A TŰZ ÖRÖK ENERGIAFORRÁS

A szén és a fosszilis tüzelőanyagok a természetben

Reményi Károly

tűz

Akadémiai Kiadó

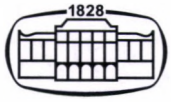
Szén, fosszilis tüzelőanyagok

A tűz örök energiaforrás

Reményi Károly

A tűz örök energiaforrás

A szén és a fosszilis tüzelőanyagok a természetben



AKADÉMIAI KIADÓ, BUDAPEST

A kiadvány a Magyar Tudományos Akadémia támogatásával készült

ISBN 978 963 05 9279 6

Kiadja az Akadémiai Kiadó, az 1795-ben alapított
Magyar Könyvkiadók és Könyvterjesztők Egyesülésének tagja
1117 Budapest, Prielle Kornélia u. 21–35.
www.akademiaikiado.hu

Első magyar nyelvű kiadás: 2013

© Reményi Károly, 2013

A kiadásért felelős
az Akadémiai Kiadó Zrt. igazgatója
Szerkesztette: Gilicze Gábor
Felelős szerkesztő: Tárnok Irén
Termékmenedzser: Egri Róbert
Nyomdai előkészítés: Eredeti Bt.
A nyomdai munkálatokat a Prime Rate Kft. végezte
Felelős vezető: Tomcsányi Péter
Budapest, 2013
Kiadványszám: TK120009
Megjelent 30,39 (A/5) ív terjedelemben

Minden jog fenntartva, beleértve a sokszorosítás, a nyilvános előadás,
a rádió- és televízióadás, valamint a fordítás jogát,
az egyes fejezeteket illetően is.

Printed in Hungary

Tartalom

1. Bevezetés. A tűz szerepe az emberi társadalom fejlődésében 9

2. A fosszilis energiaforrások kialakulása 15
2.1. Széntelepek kialakulása és elhelyezkedése 20
2.2. A szénhidrogénmezők kialakulása, fajtái és elhelyezkedése 41
2.3. A gázmezők kialakulása, fajtái és elhelyezkedése 51

3. Globális levegőparaméterek meghatározása 63
3.1. A „globális" definíció problémái (levegő-összetétel, hőmérséklet stb.) 63
3.2. Földi mérőhelyek és mérési módszerek 71
3.3. Az értékek meghatározása proxyk segítségével 73
3.4. Jégfuratokban lévő gázbuborékok 78
3.5. Faévgyűrűk 80
3.6. Mélytengeri üledékek 81
3.7. Meteorológiai mérőeszközök 83
3.8. Űrszondamérések 89
3.9. Következtetések 90

4. A szilárd, folyékony és gáznemű anyagok égése 93
4.1. Mérlegegyenletek 100
4.2. Reakciókinetika 108
4.3. Általános égésegyenlet szilárd, folyékony és gáz összetételű tüzelőanyagra 113
4.4. Égésvizsgálatok 128
4.5. Laboratóriumi vizsgálatok 128
4.6. Szemcseégés-vizsgálat lézerholográffal 132
4.7. Derivatográfos égésvizsgálat 136
4.8. Félüzemi, üzemi kísérletek. A berendezés rövid leírása 152

5. Paradigmaváltás a tüzeléstechnikában 157
5.1. Az energetika légköri szennyezései, etikai kérdések 161
5.2. Pernye 170
5.3. Kénszennyezés 171

5.4. Kénleválasztás 171
5.5. A kalcium kénlekötése 173
5.6. Nitrogén-oxidok 178
5.7. Tüzelési móddal történő NO_x-csökkentés 185
5.8. Nitrogén-oxidok leválasztása 188

6. A szén-dioxid 189
6.1. A Föld szénciklusa 189
6.2. A különböző energiaforrások fajlagos szén-dioxid-fejlesztése 190
6.3. A szén-dioxid változása a Föld történelmében 195
6.4. Az oxigén és szén-dioxid kölcsönhatása a légkörben 201
6.5. A CO_2 szerepe a földi energia-háztartásban 214
6.6. A CO_2 és a globális hőmérséklet közötti kapcsolat 217
6.7. A különböző elméletek kritikája. A szén-dioxid szerepe a klímaváltozásban 228

7. Különböző mozgalmak a CO_2-kibocsátás csökkentésére 239
7.1. Nemzetközi konferenciák és megállapodások 239
7.2. Kiotó, Koppenhága, Cancun és Durban 244
7.3. Eredmények és kudarcok 250

8. A fosszilis tüzelőanyagoknak tüzeléssel való hasznosítása 261
8.1. Szénportüzelés, tüzelőanyag-előkészítés, modern kazánok 273
8.2. Olajtüzelés 280
8.3. Gáztüzelés 282
8.4. Fluidizációs tüzelés 286
8.5. Vegyes tüzelés 295
8.6. Gáz-gőz erőművek 303

9. A fosszilis tüzelőanyagok jövője, alap-energiahordozó 307
9.1. A CO_2 szerepének reális értékelése 310
9.2. A világhelyzet 315
9.3. Magyar energiastratégia 321
10. Pusztító tüzek 331

Irodalom 335

Kedves Olvasó!

E könyv egy trilógia harmadik darabja. A 2007-ben megjelent *Megújuló energiák*at 2010-ben követte az *Energia – CO_2 – Felmelegedés* című kötet, s most *A tűz örök energiaforrás*, mely megkísérli feltárni a fosszilis energiaforrások hasznosítása és a környezet közötti kölcsönhatásokat.

Az utóbbi évtizedekben, csak részben igazolható okból, a környezetszennyezés szempontjából az energetika került előtérbe, és más veszélyes iparágakról, mint a vegyipar, a szépségipar stb. kissé elterelődött a figyelem. Az energetikai fejlesztések sok más, az energetikától távol álló szempont szerint történtek. A nagy reménnyel indult megújulók (helyesen természeti közvetlen források) rendkívüli fejlődést értek el, de a tapasztalatok kezdik kijózanítani a világot. A nagymértékű energiatárolási lehetőség hiánya, a rendszerbe illesztés problémája jelentősen megdrágítja az így fejlesztett energiát. A problémák felismerése és a reálisan hasznosítható források mértéke kezdi kikövetelni, hogy a megújulók a helyükre kerüljenek. A további fejlesztéseknél fő szemponttá válik, hogy a gazdaságossági versenyben is megállják a helyüket.

Az energetikának a legnagyobb gondot a klímaváltozásban sokak által vélt szerepe okozza. Széles körben elterjedt (elterjesztett) az a vélemény, hogy a szén-dioxid-koncentráció növekedésével együtt járó „globális felmelegedés" katasztrofális klímaváltozáshoz vezet. A fosszilis energiahordozók használatakor valóban kisebb-nagyobb mennyiségben jelentős szén-dioxid (üvegházgáz: CO_2, CH_4, N_2O stb.) kerül a légkörbe. Ezek abszorpciós tulajdonságainak következtében a légkör függőleges irányú hőmérséklet-eloszlása úgy változik meg, hogy a legalsóbb rétegek a CO_2-koncentrációnövekedéssel kissé melegebbek lesznek. Ennek a mértékét azonban lényegesen eltúlozzák, és tudományosan a Föld globális hőmérséklete és a CO_2-koncentráció közötti szoros kapcsolat nem is igazolt.

Newton aforizmává vált mondása szerint: „A természeti jelenségek magyarázatához nem szabad több okot felvenni, mint amennyi igaz, s amennyi a szóban lévő jelenség magyarázatához szükséges."

A téves felfogás azonban az energetikai tervezésben jelentős torzulást és költségnövekedést okozott. A klímaváltozás és a CO_2-növekedés összekapcsolásának még nagyobb problémája, hogy még igen költséges intézkedésekkel sem érhető el a kitűzött cél. Jelenleg azonban a téves nézet még erősen tartja magát, bár a tudományos világban már tekintélyes kutatóhelyek, személyek és vizsgálatok vitatják a globális hőmérséklet és a szén-dioxid-koncentráció közötti szoros kapcsolatot. Fontos feladat, hogy az energetikát megszabadítsuk e tehertől, és tudományos alapon és valódi gazdaságossági számítással lehessen a jövő terveket kialakítani. Az elkövetkezendő száz évben a fosszilis energiaforrások játsszák az alapvető szerepet (70–80%) a primer energiahordozó-igény kielégítésében. A források kimerülésével csak a távoli jövőben kell számolni. Mindegyik fajtával takarékoskodni kell, minden jelenlegi eljárást fejleszteni kell. Az atomenergia a jelenlegi eljárással csak 7–8%-kal vesz részt a világ primerenergia-ellátásában, a megújulók drágák és kicsi az energiasűrűségük. Ha a szén-dioxid szerepét tudományosan tisztázzuk, az elkövetkezendő évszázadokra elegendő energiaforrással rendelkezünk. Egy teljesen új elven működő energiafejlesztés felfedezése még várat magára, de bizonyosan be fog következni.

Budapest, 2013. február 12.

Rényi Károly

1. Bevezetés
A tűz szerepe az emberi társadalom fejlődésében

A tűz az emberré válás legfontosabb tényezője volt. Amikor az ember felfedezte, hogy nemcsak a villámcsapás vagy a vulkán, vagy különleges esetben egy vízcsepp tud fennmaradó égési folyamatot előidézni, hanem például dörzsöléssel bizonyos anyagok lángra lobbanthatók, akkor kezdődött az emberi társadalom kialakulása. A tűz meleget és világosságot biztosított és csökkentette a természettel szembeni kiszolgáltatottságot. Az isteni tudásból lopott el az emberi ős, amiért az istenek nagyon megnehezteltek rá. Prométheuszra szörnyűséges szenvedést bocsátottak, Zeusz azzal büntette, hogy egy sziklához láncoltatta, és a máját egy saskeselyű szaggatta, míg Héraklész le nem lőtte.

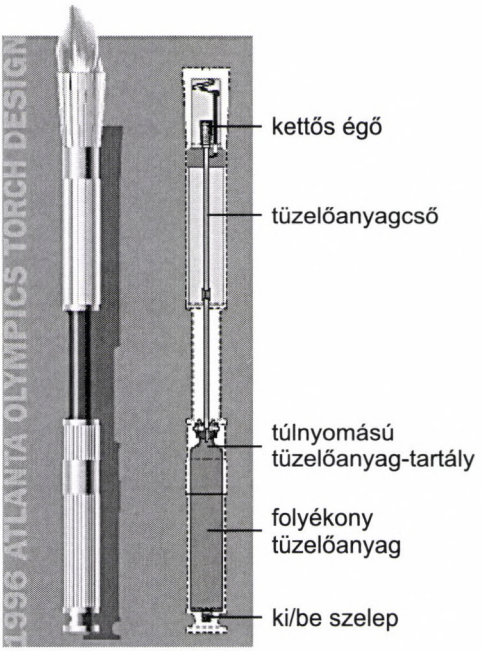
Prométheusz tettének emléke mind a mai napig élő maradt. Az olimpiai láng az ókori Görögországból származik, arra emlékeztetve, hogy Prométheusz ellopta a tüzet Zeusztól. Az olimpiai láng az olimpiai játékok jelképe, amely az ókorban az olimpiai játékok ideje alatt a helyszínen égett. Az olimpiai lángot az amszterdami 1928. évi nyári olimpiai játékokon vezették be újra, bár az első újkori olimpia 1896-ban volt. A láng a modern olimpiai játékok része. Két formában létezik, fáklyaként és a játékok helyszínén nagy lángként. Az olimpiai fáklyát több hónappal az olimpiai játékok megnyitóünnepsége előtt gyújtják meg az ókori olimpiai játékok helyszínén, a görögországi Olimpiában, Héra istennő temploma és oltára közötti területen. Tizenegy, papnőt jelképező nő végzi az olimpiai fáklya meggyújtását, és celebrálja az ünnepséget. A fáklyát a Nap sugaraival, egy fém parabolatükör segítségével gyújtják meg. Majd az első futó megindul minden kontinenst érintve az ötkarikás játékokat és a békességet hirdető lánggal, mely láng a játékok színterére a megnyitó időpontjára érkezik meg.

A fáklyát általában minden olimpiára újratervezik. Néhány alapelemet mindenképpen tartalmaznia kell:

- lángképző tüzelőanyagot,
- a tüzelőanyag-ellátási rendszert,

– olyan áramlástechnikailag kialakított berendezést, amely az égéssel a megfelelő fényt biztosítja, védi a fáklyavivőt, és viszontagságos időjárási viszonyok között sem alszik ki (szél, eső, hó, sivatag, hegyek, tengerek stb.).

Az olimpiai fáklya konstrukcióját jól szemlélteti az 1996 atlantai olimpiára alumíniumból készített fáklya. A nyomás alatti tartályból a tüzelőanyag egy csövön keresztül feláramlik egy több ezer kicsi furattal rendelkező porlasztóhoz és elgázosodás után meggyullad, majd stabilan, folyamatosan lángol. A tüzelőanyag ebben az esetben propilén volt, amely jól világító lángot adott (sajnos a nagy karbontartalom miatt kissé füstölt is).



1.1. ábra. Az 1966-os atlantai olimpián alkalmazott fáklya

A sydney-i olimpián már 35% propán és 65% bután gázkeveréket használtak, amely stabil lángot adott, jelentéktelen kormozással. A fáklya lényegesen kisebb nyomással működhetett. Tüzelőanyagként a puskaportól kezdve az olívaolajig sok mindent használtak. Az 1956-os olimpián magnéziumot és alumíniumot, ami balesetet okozott. A folyékony tüzelőanyagot először Münchenben, 1972-ben alkalmazták.

A görögök Kr. e. 776-ban tartották az első olimpiai játékokat, amelynek idején nem háborúztak. A Héra-oltárnál, a maihoz hasonlítható fémtányérral összegyűjtve a Nap sugarait egy üstben lángot gyújtottak, amely a játékok ideje alatt végigégett. Körülbelül ezer évvel ezelőtt megszüntették a játékokat, és egészen 1896-ig szüneteltek, amikor az első újkori olimpiát megrendezték Athénben.

A játékok helyszínén ma is ég egy nagy láng, amelynek megoldásai rendkívül változatosak. Az egyik konzervatív megoldásra példa az 1952-es helsinki olimpia, és különlegesnek mondható a 2012-es londoni olimpia lángja.

A tűz isteni eredetének hitét a szentlélek láng alakjában való ábrázolása is igazolja. A tűz feletti uralom megszerzésével a későbbi óriási változások, mint akár az atomkor, de az információ kora sem versenyezhetnek.

A tűz felfedezése és célszerű használata mérföldkő az emberelődök evolúciójában. Nem csupán óriási technológiai ugrás, de az intelligencia fejlődésének is ékes bizonyítéka. Korai tűzhasználó őseink a feltételezések szerint ugyan a tűzgyújtásra

1.2. ábra. Paavo Nurmi 1952-ben, Helsinkiben meggyújtja az olimpiai lángot

1.3. ábra. A 2012-es londoni olimpia

még nem lehettek képesek, de arra már igen, hogy a természetben keletkező tüzet a barlangjukba vigyék, és ott azt folyamatosan táplálják. A tűzzel a mai grillpartik és a hozzájuk kötődő szociális aktivitások barlangi előképe is megjelenik.

A tűz jelentőségét nem lehet túlbecsülni, meleget adott, fényt, előzte a veszedelmes éjszakai ragadozókat, lehetővé tette a sütést, a húsok, halak füstöléssel, szárítással való tartósítását. Számos, nyersen mérgező alapanyag is éppen a tűz használatával, a hőkezeléssel vált fogyaszthatóvá. A tűz megszelídítése a főzés felfedezésével is együtt járt. Az első tüzek és az ellenőrzött tűzhasználat jelentős lépés az emberi faj kialakulásának történetében. Lényeges, mikortól beszélhetünk róla. Mai ismereteink szerint az ehhez kötődő legkorábbi, egymillió évnél is régebbi leleteket Dél-Afrikában, a Johannesburgtól 33 kilométerre levő Swartkrans-farm közelében fekvő barlangban találták. Ezen a helyen a részletesebb feltárások a hatvanas években kezdődtek, és még napjainkban is tartanak. A barlangból igen gazdag Australopithecus robustus-leletek és egy korai faj, a Homo erectus fosszíliái is előkerültek. Ezek a maradványok az első bizonyítékai annak is, hogy az emberféléknek akár két vagy több faja is élhetett egy időben. Ennél a legkorábbinak tartott leletnél a tűz használatának közvetlen bizonyítékát az a 270 darab, egymillió évesnél idősebbre becsült, megpörkölődött, elszenesedett csontmaradvány jelenti, amelynek a műszeres és mikroszkópos vizsgálata kizárta az alacsonyabb hőmér-

sékletű erdőtűz szerepét. A kutatók szerint az elszenesedés milyensége magas hőmérsékletű (800 °C) tábortűzre utal.

A Homo erectus már 790 ezer évvel a Homo sapiens előtt használta a tüzet. A Homo erectus kihalt. Az embert a beszéd és a tárgyhasználat mellett a tűz használata emelte ki az állatvilágból.

Az első lépés a passzív tűzhasználat volt. Egy-egy tűzvész után ehető gyümölcsök és megsült állatok maradtak, amelyeket az ember ehetőnek vélt, majd elfogyasztott. Az emberek később félni kezdtek a tűztől, de lassan megtanulták kordában tartani, és elkövetkezett az aktív tűzhasználat ideje. A tűz feletti uralom a civilizációt tette lehetővé, szociológiai változásokat hozott létre. Több ezer év elteltével ennek köszönhetően alakult ki a földművelés is. A letelepedés előtt a vándorló csoportok felégettek földterületeket, amelyeket később megműveltek. Hosszú időbe telt, mire az irtásos-égetéses földművelés helyett eljött az egymással a területért harcoló csoportok ideje.

Fontos szerepe volt a tűznek abban is, hogy az ember táplálkozása gyökeresen megváltozott. A főzéssel ugyanis elbomlanak a különben mérgező növények méreganyagai és a különböző fertőzések eltűnnek, a kemény rostszálak megpuhulnak, a hús tartósabbá válik.

A tűz kémiai jelenség, éghető anyag fény- és hőhatással járó oxidációja. Közvetlen hatása az égés. A tűz általában az oxidációs folyamat kísérőjelensége. Önfenntartó folyamat. Az égés feltételei:

- éghető anyag,
- égést tápláló közeg és
- gyulladási hőmérséklet.

Az első tüzek egyidősek az éghető anyagokkal. Tüzeket okozhattak villámcsapások, vulkánkitörések. A tűz hasznos és pusztító jellegű is lehet. A természet körforgásában is részt vesz, hiszen termékeny hamuzsír kerül általa a talajba.

A tüzet a különböző korokban a kornak megfelelő ismeretek alapján különbözőképpen határozták meg. Az ókorban a négy alapelem közé a víz, a föld és a levegő mellé a tüzet tették, egyenértékűnek tartva azokkal. Kínában a tűz az öt elem egyike. Az óperzsa vallásalapító, Zarathustra gondolatkörében is fontos szerepet játszik a tűz. Egyiptomban a főnixmadár, mely elégeti magát s hamvaiból feltámad, az öröklét jelképe. A különböző népek mítoszai nagyjából egyeznek abban, hogy a tűz isteni eredetű volt. Hősnek tekintették a görög mitológiában például Prométheuszt, aki azt ellopta az istenektől, de keservesen meglakolt érte. A tűz a megtisztulás szimbóluma is, a kereszténység gondolatvilágában tisztítótűz formájában jelenik meg, de a tüzet a pokolhoz is társítják. A középkorban babonás elemek jelentek meg, azt tartották, hogy a boszorkánynak nem fáj a tűz lángja, amikor meggyújtják a máglyát. A boszorkányként vádolt személyt tűzgyújtás előtt megfojtották.

A görög mitológiában is fontos szerep jutott a tűznek, ezzel kapcsolatban a vulkánoknak és a kovácsmesterségnek. A kovácsok védelmezője, Zeusz Métisztől várt gyermeket, de egy rossz jóslat miatt lenyelte a terhes anyát. Ezzel maga lett várandós a gyermekkel, Pallasz Athénével. Métisz Zeusz gyomrában harci ruhát készített lányának, melynek készítésekor Zeusznak fájdalmat okozott. A fájdalmát Héphaisztosz szüntette meg, amikor kalapácsával ütést mért Zeusz fejére, melyből kipattant Pallasz Athéné, a háború istennője. A „tehénszemű" Héra, Zeusz testvére és felesége, Zeusznak Métisszel való hűtlenségét megtudva bosszúból apai segítség nélkül hozta világra gyermekét, Héphaisztoszt. Héphaisztosz nagyon csúnya volt, ezért Héra dühében lehajította őt az Olümposzról. A fiú egy napig zuhant, és Lémnosz szigete mellett a tengerbe esett. Nimfák mentették meg az életét. Felépülése után a szigeten megtanulta a kovácsmesterséget, majd újra felment az Olümposzra, ahol azonban összeveszett anyjával. Zeusz nem tűrhette ezt, és lehajította Héphaisztoszt a szent hegyről. Ezúttal kilenc nap és kilenc éjjel zuhant az istenség, és ezúttal Lémnosz szigetére esett, és megsántult. Első palotáját Lémnoszon építette meg, amelynek csodájára jártak az olümposziak is. Kovácsműhelyét az Etna vulkán gyomrában rendezte be. Bosszút forralt Héra ellen, és kovácsolt neki egy gyönyörű trónt, amely azonban foglyul ejtette azt, aki beleült. Az istenek királynője megörült a becses ajándéknak, és ráült a trónra, de kezei és lábai erős bilincsek szorításába kerültek. Az istenek hiába próbálták kiszabadítani, nem sikerült. Zeusz visszahívta Héphaisztoszt az Olümposzra, ahova való volt, hogy szabadítsa ki Hérát. Héphaisztosz nem engedelmeskedett. Ekkor a bor és mámor istene, Dionüszosz megkörnyékezte a szakállas és sánta istent palotájában, és annyi bort itatott vele, hogy az teljesen elkábult. Ezt kihasználva, egy öszvér hátán átvetve, a boristen felvitte Héphaisztoszt az Olümposzra. A kovácsisten feltételeket támasztott a segítségéért. Aphroditét kérte feleségül. Miután megkapta, kiszabadította anyját. Ezek után feleségül vette Aphroditét, akinek hűtlenségétől nagyon félt, ezért készített egy láncból szőtt hálót, amelyet senki sem tud elszakítani, és ezzel felesége hűtlensége esetén elfogja a csábítót. Egyszer Arésszel, a hadistennel találta összebújva hitvesét, és rájuk vetette a hálót. A rabul ejtett párt az istenek elé vitte, és igazságot követelt. Az istenek csak kacagtak a történteken. Héphaisztosz ezek után nem foglalkozott a szerelemmel, és műhelyében a küklopszok segítségével készítette el remekeit az isteneknek vagy nagy hősöknek. Az ő műhelyében készültek Zeusz villámai, Athéné rettegett Aigisz pajzsa, Héliosz aranyló szekere, amelyen az égboltot átszelte, és az aranyhajó, amelyen éjjel keletre hajózott. Héphaisztosz készítette Erósz nyilait is, Pandóra diadémját és Prométheusz bilincseit. Akhilleusz áthatolhatatlan páncélzatát és fegyvereit is ő készítette. Az összes olümposzi fegyver az ő keze munkája volt. Ott volt, amikor az első nőt megalkották. Agyagból készült az első halandó nő, Pandóra, aki később az emberiségre szabadította a bajokat.

Héphaisztosz szerszámai az üllő és a kalapács voltak. Ábrázolni is gyakran szokták úgy, hogy kezében kalapácsot tartott és az üllője fölé hajolt. Athénban nagy tisz-

teletnek örvendett, és temploma, a Theseum még ma is áll az Akropolisz lábánál. Héphaisztoszt az istenek között is nagyra értékelik, előkelő származását, tudását és képességeit dicsérik. (Mozsolics 2001)

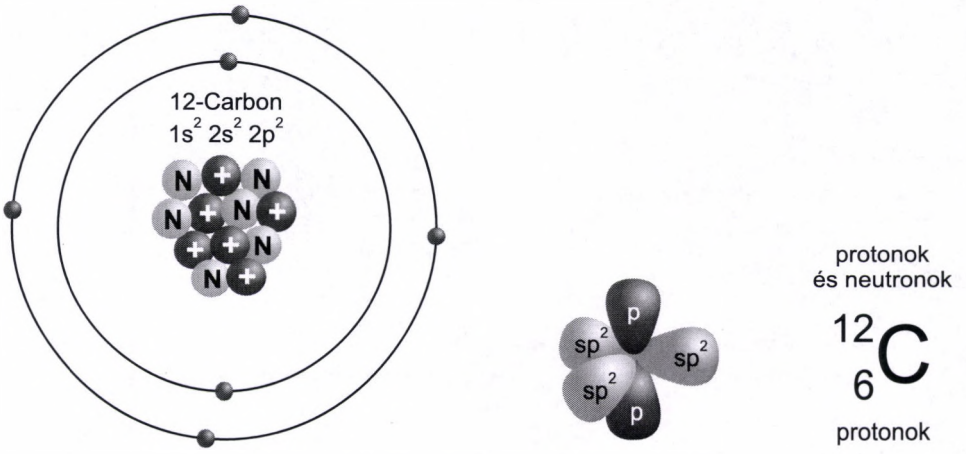
A római mitológiában Héphaisztosz megfelelője Vulcanus. Az eredeti római vallás leginkább a természeti erők és események megszemélyesítéséből állt. A Kr. e. V. századtól kezdve a rómaiak – etruszk közvetítéssel – elkezdték átvenni a görög mitológia alakjait. Így a római istenek közül soknak van görög megfelelője. Vulcanus Jupiter és Júno fia, Venus férje és Caeculus apja. Vulcanus a tűz és a vulkánok istene. A rómaiak úgy tartották, hogy műhelye Szicíliában, az Etna alatt vagy pedig a Lipari-szigetekhez tartozó Vulcano sziget alatt van. A Vulcanalia ünnepen, amelyet augusztus 23-án tartottak, halakat és kisállatokat dobtak a tűzbe az isten tiszteletére. Vulcanus a régebbi kultuszokban és mondákban hol pusztító, hol jótevő, nemritkán életet adó nemző erőként szerepel. Ő a tűzhely istensége, ő őrködik a család fennmaradásán, és segíti az államon belüli társulást és egyesülést. Ő készítette az istenek és a hősök fegyverzetét. Amellett, hogy ő az emésztő tűzisten, akinek a tűz által elpusztítandót feláldozzák, ugyanő az, aki minden tűzveszélyben lévőnek védelmet nyújt. Görög elődjének megfelelően ő az ércek megolvasztásának, feldolgozásának mestere (Majoros 1974, Szabó 1973).

A hindu hitvilágban Agni az ég és víz fia, aki villám alakjában jött először a földre, fában szunnyad és onnan a fa dörzsölésére jön elő. A villámként az égből a földre szálló tűz az istenek követeként érkezik az emberekhez. Az oltáron fellángoló tűz az indiaiak elképzelése szerint egyben az emberek követe, kéréseiknek közvetítője az istenekhez. Agni kétarcú lény, jó és gonosz egyben, az indo-árják legjelentékenyebb istene volt. A hindu felfogás szerint Agni az egész mindenségben munkál például mint a hő. Három lábbal, hét karral, hét nyelvvel ábrázolják, kos hátán lovagolva. Egy idő után Agni visszatért az égbe, és Matárisvan (az indiai Prométheusz) hozta le őt ismét az emberekhez. Ettől kezdve Agnit két száraz fa összedörzsölésével meg tudták hívni. Agni az indiai istenvilág nagyon tisztelt tagja volt. Valamilyen formában a tűzisten kultusza minden emberi csoportnál, népnél megtalálható.

A keresztény korban rejtetten élt tovább a tűz kultusza. A szentekkel is kapcsolatba hozták a tüzet. Például Szent Illéssel, aki tüzes szekéren emelkedett az égbe, Szent Borbálával, a bányászok, kohászok, tüzérek, tűzszerészek védőszentjével. A katolikus egyház nagyszombati tűzszentelő szertartása Jézus pokolra szállásának és a tisztítótűzben való tartózkodásának állít emléket. Az ünnepi szokások azonban máshogy is őrzik a tűztiszteletet. Ilyenek a karácsonyi, a húsvéti, a pünkösdi és a Szent Iván-napi tűzugrások. A tűznek megégés nélküli átugrása a szerelmespárok összeházasodásának próbája volt.

2. A fosszilis energiaforrások kialakulása

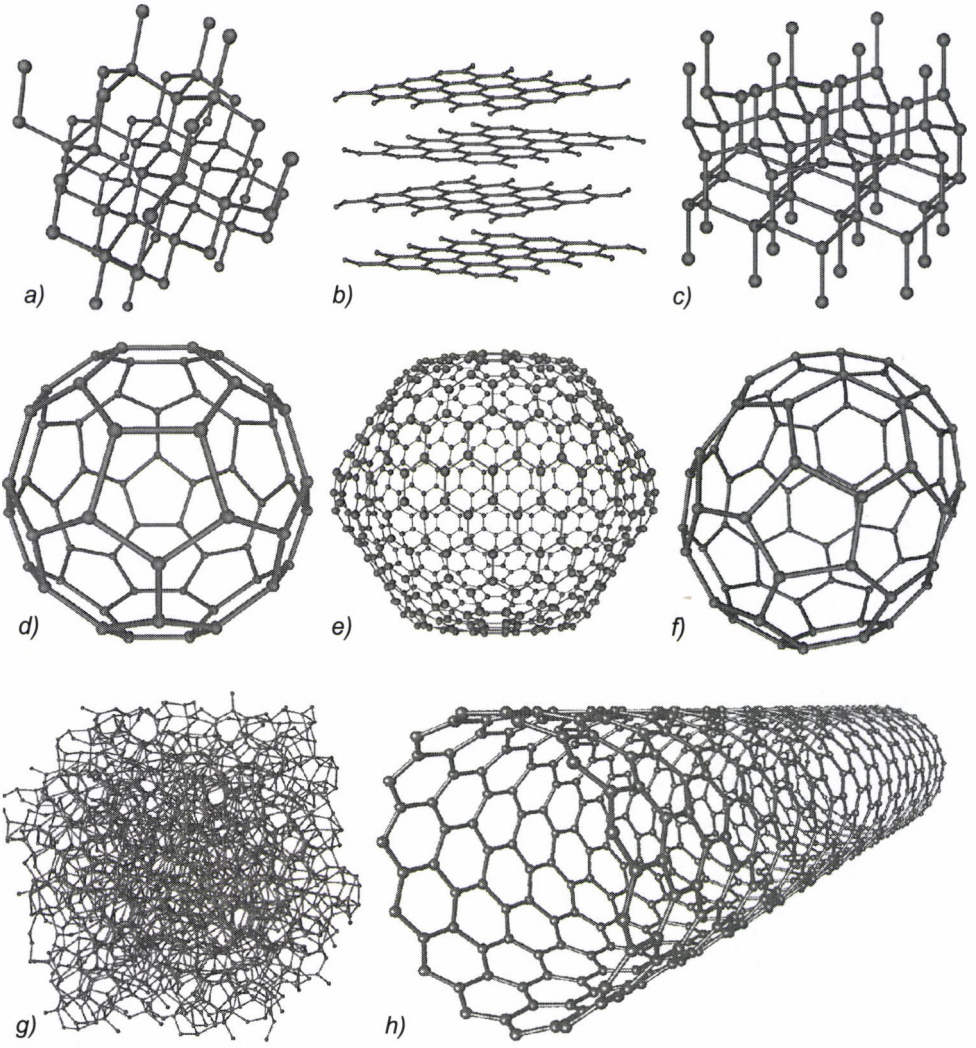
Fosszilisnak nevezett és a nem megújuló energiaforrások közé tartozik a kőszén, a kőolaj és a földgáz. A fosszilis energiaforrások alapjában szén- (C), utóbbi kettő elsősorban szén- (C) és hidrogén- (H) atomokból épül fel, ezért szénhidrogéneknek nevezzük őket. A fosszilis energiahordozók (kőszén, kőolaj, földgáz) több százmillió év alatt halmozódtak fel.



2.1. ábra. A szénatom szerkezete és az energiaszintek

A szénatom hat elektronnal rendelkezik. (2.1. ábra). Négy elektron van a külső héjon. A modellen a pályák különböző energiaszintet képviselnek, a nukleontól távolodva növekedő értékkel. A modellek nagyon leegyszerűsítve mutatják be az atomot, a valóságban az elektronok tartózkodási helye ismeretlen.

A szén allotróp módosulatai között található a természetben legkeményebb elem, a gyémánt, illetve az eddig ismert leglágyabbak között a grafitok (2.2. ábra). Más



2.2. ábra. A szén allotróp módosulatai: *a)* gyémánt, *b)* grafit, *c)* lonszdaleit, *d)* nanofoci C_{60}, *e)* C_{540}, *f)* C_{70}, *g)* amorf szén, *h)* nanocső

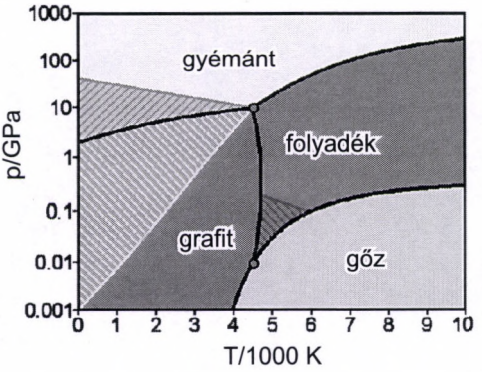
atommal való kötésre, beleértve más szénatomokat is, a hajlama gyenge. De más atomokkal képes többszörös kovalens kötést alkotni. A szénnek közel tízmillió vegyülete ismeretes.

A karbonnak van az összes elem között a legmagasabb szublimációs pontja (2.3. ábra). Légköri nyomáson nincs olvadáspontja, hármaspontja a 10,8 ± 0,2 MPa és 4600 ± 300 K (~4330 °C vagy 7820 °F), és 3900 K-nél szublimál. A karbon egy kb. 5800 K (5530 °C; 9980 °F) hőmérsékletíven szublimál. Ez független az allotróp formától. A karbon szilárd marad a legmagasabb olvadáspontú fém (volfrám, rénium) olvadási hőmérsékleténél magasabb hőmérsékleten. Bár termodinamikailag

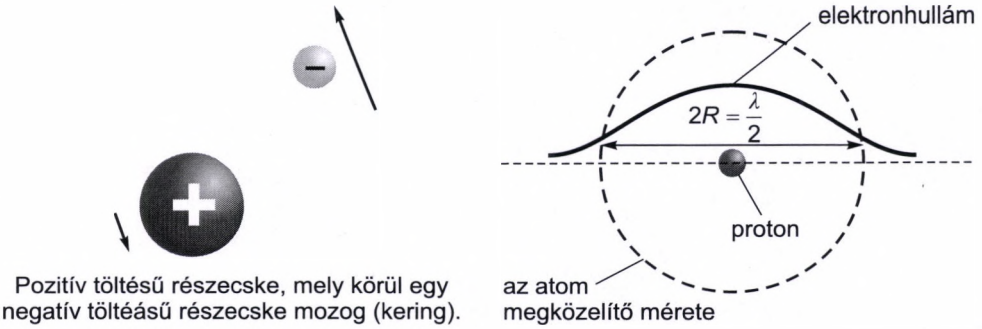
hajlamos oxidációra, de néhány elemnél hatásosabban áll ellen az oxidációnak (például a vas és a réz, amelyek szobahőmérsékleten gyengén redukálnak).

A szénhidrogének másik elemének, a hidrogénnek különösen egyszerű a modellje, mert összesen egy elektronpályán egy elektron mozog. A hidrogénatom egy pozitív töltésű részecske, amely körül egy negatív töltésű részecske mozog („kering") (2.4. ábra).

A szenek döntő hányada szárazföldi vagy a vízi világ magasabb rendű növényeiből keletkezett. Vízben lezajló folyamatnál, a lebegő élő plankton szerve-



2.3. ábra. Elméleti fázisdiagram.
A karbonnak a hőmérséklet és nyomás függvényében való fázisváltozása.
A vonalkázott területen metastabil állapot van, a két fázis együttesen van jelen



2.4. ábra. A hidrogénatom klasszikus mechanikai modellje

zetek rothadó iszappá válnak a víz alatt lezajló lassú desztillációs folyamat révén, közben különböző anyagok gáz alakban eltávoznak. A kiülepedett iszapból lesz a szapropél-szén. A kőszén kiinduló anyaga, az egykori növényzet a keletkezés helyén élhetett, de természeti erők szállítása útján is felhalmozódhatott. A tőzeg a növényvilág cellulóz- ($C_6H_{10}O_5$) és a lignin- ($C_{12}H_{18}O_9$) tartalmában, oxigénhiány mellett végbemenő folyamat során, szénülési átalakulással a következő kémiai folyamattal alakul át:

$$4C_6H_{10}O_5 \rightarrow C_9H_6O + 7CH_4 + 8CO_2 + 3H_2O$$
cellulóz → kőszén + metán + szén-dioxid + víz

$$2C_{12}H_{18}O_9 \rightarrow C_9H_6O + 7CH_4 + 8CO_2 + H_2O$$
cellulóz → kőszén + metán + szén-dioxid + víz

A Föld korát 5–4,5 milliárd évre becsülik. Az ókor kb. 570 millió évvel ezelőtt kezdődött, amelynek része a karbon időszak. Ebben az időszakban jelentős széntelepek keletkeztek. Későbbi korokban is jöttek létre széntelepek, amelyben a szenek jelen időszakra koruknak megfelelő szénültségi fokot értek el. A szén elsősorban növényi eredetű szerves anyag anaerob (oxigénmentes) körülmények között történő lebomlása során keletkezik. Az ehhez szükséges szerves anyag a földtörténet során nagy mennyiségben elsősorban a gazdag vegetációjú trópusi, szubtrópusi területek mocsárerdeiben alakult ki.

2.1. táblázat. A szénülés története földtörténeti korok alapján

FÖLDTÖRTÉNETI IDŐ TAGOLÁSA				
IDŐ	IDŐSZAK	KOR	MEGJEGYZÉS	Millió éve
ÚJKOR	NEGYED-IDŐSZAK	holocén	A GONDOLKODÓ EMBER (Homo sapiens) megjelenése	1
		pleisztocén	AZ EMBER MEGJELENÉSE HOSSZÚSZŐRŰ MAMUT JÉGKORSZAK TŐZEGKÉPZŐDÉS	
	HARMADIDŐSZAK	pliocén	Mátra- és Bükk-vidék: lignit-előfordulás Dunántúli Torony: lignit-előfordulás	8
		miocén	Cseh-medence, Handlova barnaszén Mo. Salgótarjáni, Sajóvölgyi barnaszén	20
		oligocén	Román zsilvölgyi barnaszén	35
		eocén	Barnaszén: Közép-Németország, Alsó-Rajnavidék Mo. Tatabányai-medence, Esztergom vidéke	55
		paleocén	Dunántúli-középhegység barnaszenei Hegységképződés szempontjából nyugodt kor	70
KÖZÉPKOR	kréta	felső	Kipusztulnak a „DINOSZAURUSZOK” Első madár és emlős megjelenése Kőszéntelepek keletkezése Barnaszén-előfordulások: Mo. Ajka	140
		alsó		
	jura	malm	Kaliforniai arany-előfordulás Sokfelé szén-, só-, gipsztelepek	180
		dogger		
		liász	Mo. Mecsek – feketeszén-előfordulás	
	triász	felső	DÉL-AFRIKAI GYÉMÁNT MÁRVÁNY (Carrara) GIPSZ, KŐSÓ ELSŐ „DINOSZAURUSZOK” fellépése	230
		középső		
		alsó		

2.1. táblázat. folytatása

FÖLDTÖRTÉNETI IDŐ TAGOLÁSA					
IDŐ	IDŐSZAK		KOR	MEGJEGYZÉS	Millió éve
ÓKOR	perm		zechsteini	Szász- és Csehországban kőszéntelepek Észak-Kína kőszéntelep-sorozat Kelet-Ázsiában fő kőszénképződési idő Észak-Amerika kőolaj Magyarország: uránérc	290
			vörös fekvő		
	karbon		felső	A földtörténet első nagy kőszénképződései. Ruhr-medence. Szilézia, Moszkva – Donyeck – Anglia, Kuznyeck, Türkisztán, Szibéria, Kína, Észak-Amerika keleti része	330
			alsó		
	devon		neodevon	Bányászati szempontból jelentős SZÉNKÉPZŐDÉS NEM VOLT	380
			mezodevon		
			eodevon		
	szilur	gotladium	a.k.f.		470
		ordovicium	felső		
			középső		
			alsó		
	kambrium		felső		570
			középső		
			alsó		
ŐSKOR				SZILÁRD KÉREG KIALAKULÁSA CSILLAGKOR	

Forrás: World Energy Council

A fosszilis tüzelőanyagokból történő energiafejlesztés szénvegyületek elégetését jelenti. Ez az energiafejlesztés egyik legősibb és ma is a legjelentősebb formája. Az emberiség rendelkezésére álló szénkészletek igen nagyok. A jelenlegi vagy azt valamelyest meghaladó felhasználási szintet figyelembe véve még több száz évig elegendőek. A fosszilis energia hosszabb távon meg tudja oldani az emberiség energiagondjait.

A fosszilis tüzelőanyagok tehát természetes folyamatok, mint például eltemetett elhalt élőlények anaerob bomlásának eredményei. A korai szerves szervezetek fizikai és kémiai átalakulásának eredményeként kapott fosszilis tüzelőanyagok általában több millió évesek, és koruk néha meghaladja a 650 000 000 évet. Ma-

gas széntartalmú fosszilis tüzelőanyagok közé tartozik a szén, a kőolaj és földgáz. A fosszilis tüzelőanyagok különböző szén/hidrogén aránnyal rendelkeznek, gáznemüek, illetve illékonyak a metán, továbbá folyékonyak az olajok, szilárdak a különböző szenek. A szénhidrogénmezők lehetnek csak olaj-, illetve földgázmezők, de együttesen is előfordulnak. Általánosan elfogadott, hogy elhalt növényi és állati maradványokból nagy nyomás és magas hőmérséklet mellett történt az átalakulási folyamat. Ezt a biogén elméletet először Georg Agricola 1556-ban ismertette, és később Mihail Lomonoszov a XVIII. században támasztotta alá.

A kőolaj és *a földgáz* több millió évvel ezelőtt tengerek vagy tavak fenekén szerves szervezetek – beleértve a fitoplanktonokat és zooplanktonokat – leülepedve oxigénmentes körülmények között anaerob bomlással keletkeztek. A szerves anyagba egyéb üledékek is keverednek, mint például agyag, szervetlen anyagok stb. A magas hőmérséklet és nyomás következtében különböző kémiai bomlások mennek végre. Először pirolízis, amelynek terméke az olajpalában található meg, majd további folyékony és gáznemű szénhidrogének folyamatai „katagenezis" néven ismeretesek. Energetikai üzemanyagként a szénhidrogének különböző keverékeit is használják. A szénhidrogének konkrét keveréke adja az üzemanyag jellemző tulajdonságait mint a forráspont, olvadáspont, a sűrűség, viszkozitás stb. Néhány üzemanyag, mint például a földgáz, csak nagyon alacsony forráspontú, gáz halmazállapotú összetevőket tartalmaz. Mások, mint a benzin vagy a gázolaj tartalmaznak jóval magasabb forráspontú komponenseket is.

A szárazföldi növényekből inkább szén és metán képződött. Számos szénmezőt találunk a földtörténet karbon időszakából. A földi növényekből a III. típusú pirolízissal földgázforrások keletkeztek.A kőolaj kereskedelmi hasznosítása, az állati eredetű olajok helyettesítéseként (pl. lámpákban használt bálnaolaj) a XIX. században kezdődött. A földgáz kezdetben a kőolajtermelés kedvezőtlen melléktermék volt.

2.1. Széntelepek kialakulása és elhelyezkedése

A kőszén keletkezése

A szén sokféle alakban fordul elő, megtalálható elemi állapotban (gyémánt, grafit, fullerén), ásványokban (mészkő, dolomit), szerves vegyületekben (szőlőcukor) és az élővilágban. Mesterségesen is előállítható.

A kőszén bonyolult szénvegyületek keveréke. Kialakulásának egymást követő fokozataiban nő a széntartalom: az első fokozat a tőzeg, amelyet a lignit, majd a barnakőszén (60–70% széntartalom), a feketekőszén (80% feletti széntartalom) és az antracit (90% feletti karbontartalom) követ. A részletes szénülési sort a 2. 3. táblázat tartalmazza.

2. 2. táblázat. Szénfajták a keletkezésük szerint

SZÉN		
ÁSVÁNYI SZENEK	ELEMI SZENEK	
Tőzeg	mesterséges elemi szenek	természetes elemi szenek
Lignit		
Barnaszén	faszén	gyémánt
Feketeszén	csontszén	grafit
Antracit	koksz	fullerén

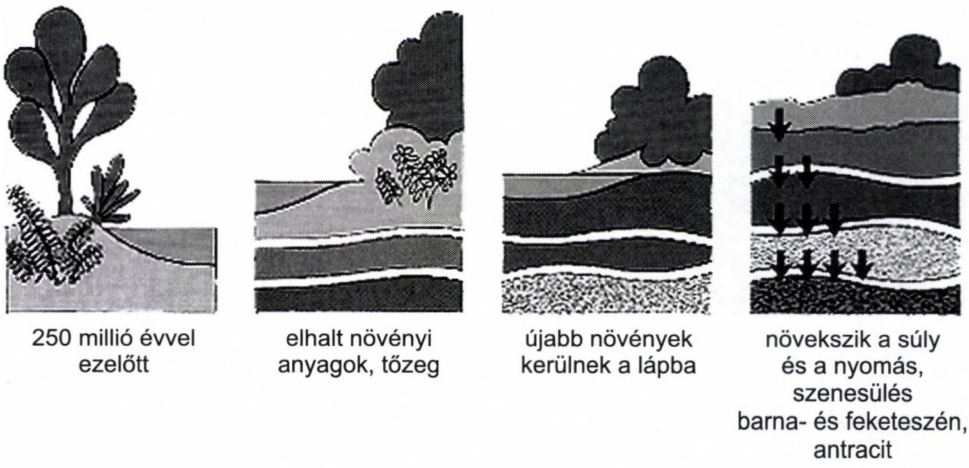
2.3. táblázat. A szenek osztályozása a szénülési sor alapján

SZÉNÜLÉSI SOR												
MEGNEVEZÉSE				FŐBB ELEMEI súly % (száraz, hamumentes állapot)			Kokszmaradék	Illóalkatrész	Nedvességtartalom	MEGJEGYZÉS		
EURÓPAI		OROSZ	AMERIKAI	C	H	O	középérték %			termikus érettségi index	szervesanyag-metamorfizáltság	
növényi anyag		–	–	50	7	43	15	85			0	
tőzeg		–	PEAT	60	6	34	10	10	80	1		
barnaszén	földes	B_1	LIGNITE	70	5	25	30	20–35	50		2	
	lágypalás	B_2					40		40	(2)	4	
	kemény	B_3							30	2	6	
	fényes	D					50		20	2,5	8	
feketekőszén	láng	G	subbituminous	80	5	15	60	25	15	3	10	
	láng-gáz											
	gáz	J	bituminous	85	5	10	70	20	10	4	12	
	zsír	K										
	kovács	SS (CC)	super-bituminous	90	5	5	80	15	5	(5)	14	
	sovány											
antracit		T	subanthracite	94	4	2	95	3–2	2–3		16	
			antrachite	95	3	2				5		
		PA	metantrachite	96	2	2					18	
		A	sub-graphite	97	1	2					20	
grafit		–	graphite	100	0	0						

A kőszén szilárd szénhidrogén (C_aH_b), amely kisebb mértékben N, S és O összetevőket tartalmaz. Jellemzően ásványianyag- és víztartalma is van. A különböző szenek szén- és hidrogéntartalma változhat, egy adott szénültségi fok mellett a C és H aránya általában tükrözi a szénültséget. Előfordulhat azért, hogy ugyanolyan szénültségű kőszénben a C/H arány különbözik.

Az északi félteke szenei (vitrinitben gazdag) és a déli félteke szenei (vitrinitben szegény) kémiailag erősen eltérnek. A macerál csoportok (vitrinit, liptinit, inertinit) kémiai összetételei különböznek. A macerálok optikailag homogén, de kémiailag különböző, nem kristályos szerkezetű szerves anyagok. Kémiai összetételük, reflexióképességük, eredetük alapján a következő csoportokra oszthatók:

- vitrinit: huminanyagok gélesedett terméke, növényi sejtfalak lignin- és cellulóztartalmából származik;
- liptinit: spóra- és pollenszemcsék, algák, magasabb rendű növények ellenálló szöveteinek, zsír- és viaszjellegű vegyületeinek lebontása során képződik;
- inertinit: hasonló anyagokból képződik, mint a vitrinit, de oxidációs úton jön létre. Elsősorban huminanyagok oxidációs terméke (Hámorné Vidó 2012).



2.5. ábra. A szén keletkezésének folyamata
(*Forrás:* Northern States Power Company: Electricity from Coal)

1. A szén kialakulása 250 millió évvel ezelőtt kezdődött. A Föld nagy részét sűrű erdő és mocsár borította. Különös fák, óriás sásfajták, elterjedt páfrányok tárolták a Nap energiáját.
2. A páfrányok és más fafajták elhaltak, és a mocsáron vékony réteget képeztek. Hosszú évek során az anyaguk összetétele változott, és létrejött a tőzeg.

3. Új növények növekedtek és elpusztultak, és a mocsár fenekére is lesüllyedtek.
4. Befedte a homok és más ásványi anyag. Az anyagok összeálltak és néha megkövültek.

A tőzegréteg súlya és a nyomása növekedett, majd a tőzegréteg elkezdett változni, először lignitté, egyre keményebb barnaszénné, végül a legkeményebb szénné, az antracittá (2.5. ábra).

A kőszén kialakulásának kezdeti folyamatában a növények elhalásuk után víz alá kerülnek, és egyrészt nem következik be a szerves anyag levegőn történő oxidációja, másrészt az iszap megakadályozza, hogy a baktériumok és gombák a növényi anyagot lebontsák. Az ilyen módon kialakult tőzeg 90% vizet is tartalmazhat. A tőzeg akkor alakul tovább kőszénné, amikor az adott terület lassú süllyedése miatt további üledékrétegek halmozódnak fel rajta. Ekkor a tőzeg a nyomásnövekedés miatt nagymértékben tömörül, és vize nagy részét elveszíti.

Biokémiai szénülésnek nevezzük a szénképződésnek azt a kezdeti szakaszát, amelyben még mikroorganizmusok végzik a lebontást. Ekkor a növényi lignin, cellulóz és proteinek huminsavakká alakulnak. A tőzegben a növényi anyag még felismerhető. Ezt követi a geokémiai szénülés, amikor a geológiai körülmények változnak, a nagyobb mértékű lefedés és a növekvő hőmérséklet hatására a növényi szerkezet eltűnik. Ebben a szakaszban jön létre a barnakőszén. A barnakőszén maximum 100 °C-ig (kb. 3 km mélység) képződik. A szénülés utolsó szakaszában a huminsavak szétbomlanak, metán szabadul fel, ekkor keletkezik a feketekőszén és az antracit. Ez a 100–400 °C hőmérsékleti tartományban történik. Ha a hőmérséklet és a nyomás tovább növekszik, a kisfokú metamorfózisnak megfelelő körülmények között az antracit grafittá alakul.

A világ szénkészletei több száz évre biztosítják a jelenlegi felhasználási ütem növekedése mellett az energetika igényeit. Előnye e tüzelőanyagnak, hogy minden kontinens jelentős szénvagyonnal rendelkezik, azaz a források eloszlása viszonylag egyenletes, szemben a szénhidrogénforrásokkal. Korábban a szén felhasználása elsősorban az előfordulás környezetében történt, azonban jelenleg világviszonylatban jelentős szénpiac alakult ki. A nagykapacitású tengeri szállítási lehetőségek a jó minőségű szenek igen nagy távolságra való elszállítását is gazdaságossá teszik. Az a korábbi alapelv, hogy az erőműveket vagy bányára, vagy fogyasztóra kell telepíteni, módosult, de természetesen a gyenge minőségű szenek (lignitek) nagy távolságra való szállítása továbbra is gazdaságtalan. A világ legnagyobb széntermelő államai Kína, USA, India, Dél-Afrika, Ausztrália, Oroszország, Lengyelország, Ukrajna, Kazahsztán és Németország, amelyek a világ termelésének 90%-át teszik ki.

Az energetika a széntermelés 60%-át használja. Világviszonylatban a villamosenergia-termelésben 40% körüli részesedéssel a prognózisok továbbra is a szenet teszik az első helyre. A magyarországi prognózisok nem követik e világtendenciát,

mert hazai szénforrásaink eléggé szűkösek és a mélybányászat jelenlegi árai magasak (ezzel ellenkező vélemények is találhatók).

A növények kémiai alkotói a szén (50%), oxigén (43%), hidrogén (6%), és nitrogén (1%). A szénülés során ezek mennyiségi aránya a szén javára tolódik el, az elemiszén-tartalom 50%-ról 100%-ra növekedhet. Az eltávozó elemek gázvegyületeket alkotnak. Ezek közül a metán a legjelentősebb. A bányászat szempontjából veszélyes, mert felszabadulva a bányaüregek levegőjével robbanásveszélyes elegyet alkot (sújtólég) (Kopp 2012).

A kőszén kőzettani tulajdonságai

A kőszén növényi eredetű és ásványi eredetű komponensekből áll, pórusaiban vizet és gázokat tartalmaz. A növényi eredetű alkotók az éghető anyagok, az ásványi eredetűek a hamuképzők.

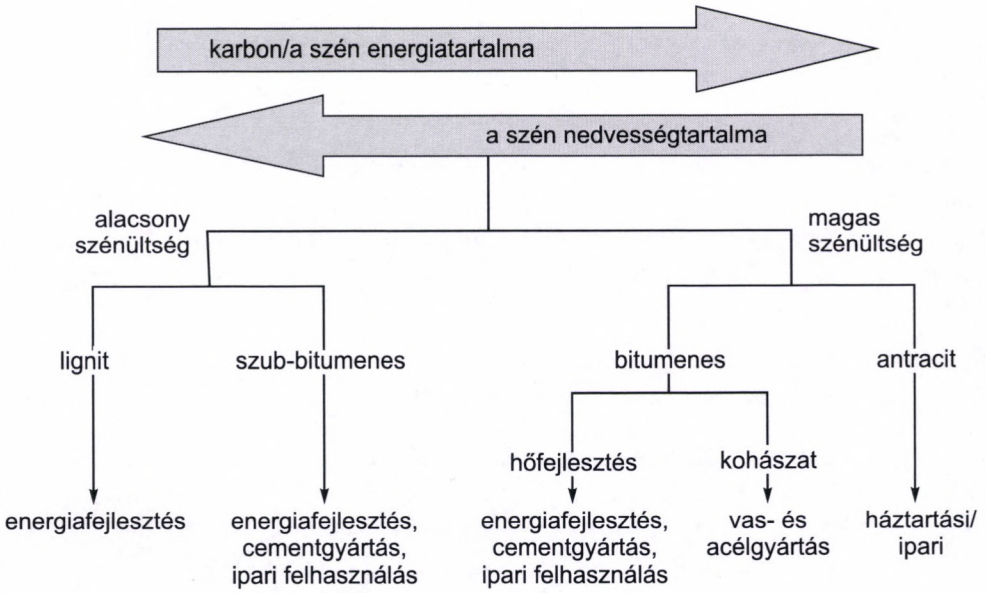
A kőszén éghető anyagai, a növényi eredetű szerves ásványok három csoportba sorolhatók: huminitek, bituminitek és oxinitek. A huminitek a növényi cellulóz és lignin átalakulásával jönnek létre, ezek alkotják legnagyobb arányban a kőszeneket. A bituminitek kiindulási anyagai a növényi zsírok, viaszok és gyanták, ezek csak néhány százaléknyi mennyiségben vannak jelen a kőszenekben. Az oxinitek az eredeti növényi alkotók oxidációs kémiai átalakulásával (például mocsárégéskor) jönnek létre. Jelenlétük a kőszenekben csak esetleges.

A kőszén ásványait, a mikroszkóposan homogén, szenesedett maradványokat eredetük és az ezzel összefüggésben lévő reflexiójuk alapján különböző csoportokba sorolják. Egyik csoportjukat alkotják a vitrinitek. A telepek szénültségi fokát mikroszkópos vizsgálattal, a vitrinitreflexió alapján állapítják meg.

A hamuképző alkotók legnagyobb részben agyagásványok, mellettük törmelékes eredetű, finomszemcsés kvarc és földpát is előfordul. Kalcit, dolomit és sziderit is lehet a kőszenekben, melyek általában lencséket alkotnak. A pirit és markazit a kőszénképződés kezdeti szakaszában, a reduktív, mocsári környezetben, baktériumok tevékenysége következtében jön létre. A kőszenekben gyakran nehézfémionok (U, Th; Ge, V stb.) dúsulnak, melyeket eredetileg a növények kötnek meg, majd a szénülési folyamat kedvez a felhalmozódásuknak.

A kőszén teleptani jellege

A kőszén-előfordulásokat képződési körülményeik alapján két csoportba osztják: limnikus és paralikus előfordulások. A limnikus kőszén-előfordulások tavak elmocsarasodásával jönnek létre. Jellemző rájuk, hogy a meddőrétegekhez viszonyítva vastagok. A paralikus előfordulások tengerszegélyi területek elmocsarasodásával keletkeznek (2.6. ábra). Általában magasabb szénültségi fokúak, és sok, vékony telepből állnak (Hámorné Vidó 2012).



2.6. ábra. A szénfajták csoportosítása (*Forrás:* World Coal)

2.4. táblázat. A szenek szénültségi sorrendje

Szénnév	Név másképpen	Karbontartalom	Fűtőérték
Antracit	Nagy szénültségű	> 86%	23 865 kJ/kg
Bitumenes	Nagy szénültségű	45–85%	23 865 kJ/kg, és több az antracitnál
Szubbitumenes	Feketelignit	35–45%	17 435–23 865 kJ/kg
Lignit	Barnaszén	25–35%	< 17435 kJ/kg

Forrás: EIA és Eurostart

Kőszénképződés időben és térben

A szárazföldi növényzet megjelenése előtt az algák szolgáltatták a kőszénképződés alapanyagát. Jelentősebb telepek csak a szárazföldi növényzet megjelenése után képződhettek. A növények megteremtették már a devonban a kőszénképződés feltételeit, de azok a karbon–alsó perm idején váltak igazán kedvezővé. A variszkuszi orogenezis során létrejött a Pangea szuperkontinens. Ez kedvezett a szárazföldi növényzet gyors elterjedésének. A kőszénképződésnek kedvező mocsári viszonyok is elterjedtté váltak, a hegyközi medencék a kiemelt területek lepusztult törmelékével gyorsan feltöltődtek. A kőszénképződés az Appalache-hegységben az alsó karbonban fokozódott, Európában a felső karbonban, az Ural hegységben pedig az alsó permben jöttek létre a kőszéntelepek. Kőszén-

előfordulások világszerte vannak a jurából, felső krétából és harmadidőszakból. Ezek elterjedése, mérete, jelentősége és a telepek szénültségi foka azonban nem éri el a karbon időszaki kőszenekét. A harmadidőszakból csak barnakőszenek ismertek.

A világ kőszénkészletének fele a volt Szovjetunió országaiban és Kínában fordul elő. További 25% található az Egyesült Államokban, a maradék 25% pedig a Föld többi országában oszlik el. Európában a legjelentősebb előfordulások Nagy-Britanniában, Németországban és Lengyelországban vannak (Hámorné Vidó 2012).

Feketeszenek

A szén a vegetációból hőmérséklet és nyomás hatására sok millió év alatt kialakult üledékes kőzet. A feketeszenek közé tartozik az antracit, a bitumenes és szubbitumenes szén, amelyek képződésének kezdete 140–250 millió évvel ezelőttre tehető. Feketeszénnek a gyakorlatban a bitumenes „lágy szenet" nevezik, bár a keménysége meghaladja a kisebb szénültségi fokú szenekét, de könnyen törik.

A hőtartalmat tekintve a legjobb minőségű szenek. A Föld számos országában megtalálható. A feketeszén minőségét elsősorban a karbontartalma határozza meg, mely 45–86%. A fűtőértéke 29 000 – 35 500 kJ/kg (21 000 000–30 000 000 Btu/tonna).

Az antracit a feketeszén néhány lelőhelyén hosszú idejű szénülés során alakul ki. A karbontartalma 86–97%. Fekete színű, fűtőértéke kb. 34 800 kJ/kg.

Barnaszenek

A barnaszén szénültségi foka szerint a lignit és a feketekőszén között helyezkedik el. Az eocén korban, 60–75 millió évvel ezelőtt sűrű láperdőkből keletkezett. A magyarországi barnaszén a Pannon-tenger mellett keletkezett, kisebb mennyiségben kréta kori barnaszén is van, 75–125 millió éves. A barnaszén (szubbitumenes) 35–45% karbontartalmú, 19 260–26 680 kJ/kg fűtőértékű, szintén magas illó- és nedvességtartalmú anyag. A készlet kb. 182 milliárd tonna.

A tüzeléstechnikában a hamutartalom is fontos. A kemény barnaszén 40%-nál kevesebb bányanedvességet tartalmaz (röviden: barnaszén); lágy barnaszénnél ez az érték 40%-nál nagyobb.

A barnaszenekben van kolloidálisan kötött víz. A barnaszeneknek tüzeléstechnikai szempontból legfontosabb összetevői az illó komponensek.

Tárolása során illó anyagok távozhatnak a szénből, és oxidációs folyamat is létrejöhet. 30–40 nap alatt 10% fűtőérték-veszteség is bekövetkezhet. A szén tárolásakor figyelembe kell venni az öngyulladási hajlamot. A vastag rétegben, 1,5–2

méter rétegvastagság felett, ha meg is ázik, a belsejében zajló lassú oxidáció hője felhalmozódik, és ilyenkor öngyulladás léphet fel.

Fontosabb barnakőszén-telepeink: Ajka, Tatabánya, Dorog, Várpalota, Salgótarján, Sajószentpéter és Budapest vidékén vannak. Legjobbak a Tata és Dorog területén található barnaszeneink. Fűtőértékük 20 000–30 000 kJ/kg között található, de kéntartalma is nagy lehet, elérheti az 5%-ot is.

Lignitek és tőzegek

A lignit a tőzegnél már keményebb szén. Fűtőértéke 9280–19 260 kJ/kg. Nagy illótartalom és nagy nedvességtartalom, helyenként nagy hamutartalom jellemzi. Kb. 45 milliárd tonna a világ tartaléka.

A lignit tartalmazza a szenek között a legkisebb fixkarbon-mennyiséget (25–35%) és legnagyobb nedvességet (20–40%), de lehet, hogy a hamutartalom ér el 60–70%-ot. Általában a kéntartalom alacsony és az illó magas, elérhet 32%-ot, illetve magasabb súlyszázalékot is.

A tőzeget felszíni fejtéssel termelik ki. Aktív kitermelés folyik 230 000 hektáron, ami a világ teljes 400 millió ha tőzegterületének 0,05%-a. Az átlagos hozam 150 t/ha. Az éves termelés 35 millió tonna. Az 50-60%-át tüzelőanyagként, a többit talajjavításra használják.

A tőzegtermelés többsége Európában van, kb. 200 000 ha, míg Észak-Amerikában összesen 25 000 ha, Afrikában, Ausztráliában, Új-Zélandon, Dél- és Kelet-Ázsiában együtt 5 000 ha. Európában a fő tőzegtermelő országok: Finnország, Írország, Oroszország, Belorusszia, Svédország, Észtország, Litvánia, Ukrajna és Lettország. Észak-Amerikában főleg a kertészetben hasznosítják. Említést kell tenni azonban arról is, hogy a tőzegfelhasználást ellenző társadalmi mozgalmak is megszaporodtak. A természetvédő mozgalmak elsősorban a balti államok ellen irányultak. A tőzeglelőhelyek 80%-a jelentős természeti terület. A mocsaras, lápos vidékek többsége még érintetlen természet. Ezért a tőzegtermelők és társadalmi szervezetek, mint például a Nemzetközi Tőzeg Egyesület és a Láp Megőrző Csoport között állandó a konfliktus. Ez utóbbi két csoport 2002-ben kiadott, „A lápok és a tőzegmezők bölcs használata" című kiadványukban útmutatót állítottak össze e területek helyes kezelésére. A tőzegkitermelés és a természeti értékek megőrzésének összehangolása különleges feladatot jelent a tőzeggel rendelkező országok számára. A tőzeg bomló, korhadt növényekből és ásványokból álló, lágy szerves anyag. A tőzegmezőn értjük a növényréteg nélkül, a legalább 20 cm víztelenített és 30 cm nem víztelenített réteget. A tőzeg energetikai értékének számszerűsítése nagyon nehéz. Az energetikai értékek meghatározása azért problémás, mert igen erősen függ a helyi viszonyoktól, a nedvességtartalomtól és az ásványi anyagok mennyiségétől, illetve összetételétől. A nedvesség- és hamumentes szerves anyag fűtőértéke eléggé állandó, 20–22 MJ/kg.

A szénbányászat kezdete a világban és hazánkban

A szénnek üzemanyagként való felhasználására utalást először Theophrasztosz (Kr. e. 371–287) görög tudósnak, a „Kövekről" (Peri lithón) című, töredékesen fennmaradt könyvében találunk. „Az ásványi anyagok között a földben képződött szén nagyon hasznos, mert ha egyszer meggyulladt, tovább ég, mint a faszén. Szén Liguriában található és Elisben, amelyek az Olympia hegyi úton megközelíthetők. A fémfeldolgozó munkások használják".

Britanniában a bronzkorban (Kr. e. 3000–2000) megtaláljuk a bányászott szenet, amelyet temetési máglyához használtak. A rómaiak Britanniában a második században, Angliában és Walesben, minden ismert, jelentős szénmezőről hasznosítják a szenet. A szénkereskedelmet nyilvánvalóan bizonyítják (kb. Kr.u. 200) a Chester közeli Heronbridge és a kelet-angliai Fenland kikötői. Innen a Közép-Angliából származó szeneket különböző helyekre szállították, ahol gabonaszárításra használták. A Britannia északi részén levő villák kandallóiból és katonai erődökből származó (Kr. u. 400 körüli) szénsalakot találtak. Számos bizonyítéka van a szénnek a vasfeldolgozásnál való hasznosításáról. Angliában a korai hasznosítástól függetlenül a szénnek igazi jelentősége Kr. u. 1000 utánra tehető.

A szénigény növekedésével nem volt elegendő felszínről bányászható szénmező és a XIII. században a mélybányászathoz ki kellett fejleszteni az aknákat és tárnákat. Ezekből a bányákból származó szenet „pitcoal"-nak (aknaszén, bányaszén) nevezték el. Az ipari forradalom időszakában rohamosan nőtt a szénigény, és az üzemekben a hőerőgépek kezdték kiszorítani a vízikereket. 1700-ban a világ szénfelhasználásának öthatodát Angliában bányászták. 1947-ben 750 000 bányász volt, amely létszám 2004-re 5000-re csökkent, összesen 20 bányában.

A szénbányászatban két alapvető módszer létezik: a felszíni és a mélybányászat. Akár 1000 m mélységig lehet a felszíni, ez alatt mélybányászat. Természetesen ezek csak a lehetséges értékek, és a kitermelés módja mindig a szénmező elhelyezkedésétől függ. A mélybányászat bonyolult és több munkaerőt igényel, de sajnos a legjobb minőségű szenek többsége ilyen módon bányászható. A kibányászott szén felhasználás előtt különböző előkészítő eljárásokon megy keresztül (osztályozás, törés, mosás, dúsítás stb.). a felhasználás igen sokirányú, energetika, kokszgyártás, elgázosítás, cseppfolyósítás, kohászat stb.

Az első szenet, 50 tonnát az USA-ban – dokumentáltan – 1748-ban bányászták. Jelenleg az USA szénfejtése évente több mint egymilliárd tonna. Nagy-Britanniában a szénből származó gázzal még az 1950-es évekig világítottak. Az ipari forradalom kezdetekor a szén döntő szerepet játszott főleg az acéliparban, a közlekedésben és az energetikában.

Magyarország a XI–XVIII. század között Európa, s egyben a világ egyik legfejlettebb bányászati nagyhatalmának számított. Világszerte ismert és elismert volt a magyar bányászati-kohászati technika.

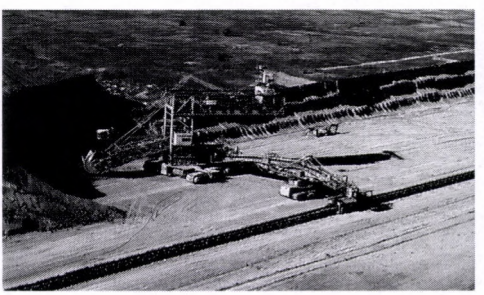
A XVIII. században számos külföldi szakember érkezett a Selmeci Akadémiára, hogy az ottani bányagépészetet és a kohászatot tanulmányozhassa. A XIX. század elejéig nem tudott működni nélküle a kohászat, az erdészet és faipar (erdőművelés, faszénégetés, faszerkezetek), a gépészet és gépgyártás, a vízépítés, az üveggyártás, az ipari méretű kovácsmesterség. A XVIII. század második harmadára tehető a hazai kőszénbányászat megindulása, amikor főként a Selmec környéki gőzgépek számára kutattak fel széntelepeket. Akkoriban kezdték el vizsgálni a kőszén mint tüzelőanyag kémiai, fizikai tulajdonságait, s hasznosításának gazdasági vonatkozásait.

A gőzgépek és a kőszén megjelenése a hazai modern civilizáció és technika első lépését jelentette. Egyre több mérnököt, műszaki szakembert képeztek, s 1735-ben Mikoviny Sámuel vezetésével Bergschule néven elindult a hivatalos képzés Selmecbányán. 1762-ben pedig Mária Terézia királynő alapított akadémiát (Bergakademie, Academia Montanistica) a tanintézet helyett. Megjegyzendő, hogy ezen az akadémián oktattak először Magyarországon egyetemi szinten természettudományokat.

A XVIII. században jelentkező energiahiány az első tudatos szénkutatáshoz is elvezette a szakembereket. A meginduló iparosodás kiszolgálására már kevés volt a fa és a faszén. Mária Terézia 1766-ban jutalmat tűzött ki annak, aki tőzeg- vagy kőszénlelőhelyet talál, vagy aki szénnel olvaszt ércet. 1782-ben II. József elrendelte a lelőhelyek összeírását. A századfordulót követően Brennbergben megtörtént az első kőszénkutató fúrás is. Azóta is Brennberget tartják az első magyar kőszénbányának, hiszen 1753-ban ott kezdődött meg a szénbányászat, illetve 1759-ben az ipari méretű bányászat. A XVIII. század végére már az ország valamennyi – később jelentőssé vált – szénterületén megkezdődött valamilyen szintű bányászati tevékenység, illetve megismerhetővé váltak a főbb előfordulások. Megindulhatott a rendszeres és iparszerű széntermelés, mely túlnyomóan helyi igényeket elégített ki.

Jelenleg a bányászkodás, ha lehetséges, külszíni módon történik, igen nagy teljesítményű, sok feladatra alkalmas berendezésekkel (2.7. ábra). Visontán a Mátrai Erőmű Zrt. a magyar villamosenergia-rendszer egyik legmegbízhatóbb alapegysége. Fő tevékenysége a villamosenergia-termelés. A 950 MW beépített teljesítménnyel rendelkező Mátrai Erőmű Zrt. az ország legnagyobb széntüzelésű erőműve. A társaság saját bányáiban külfejtéses technológiával termelt lignitből állít elő villamos energiát.

A legjobb minőségű szenek többségét azonban mélyműveléssel lehet kibányászni, és a bányászmunka továbbra is nagyon fáradságos és balesetveszélyes maradt.



2.7. ábra. A Mátrai Erőmű külfejtésének részlete (*Forrás:* Mátrai Erőmű Cégtörténet)

A dunai gőzhajózás megindulása pedig fellendítette az esztergomi, majd a pécsi bányák termelését is. Amikor a XIX. század elejéhez értek, már száz lelőhelyen bányászták a kőszenet. Fő lelőhelynek Brennberg, a Dorogi-medence és a Mecsek számított.

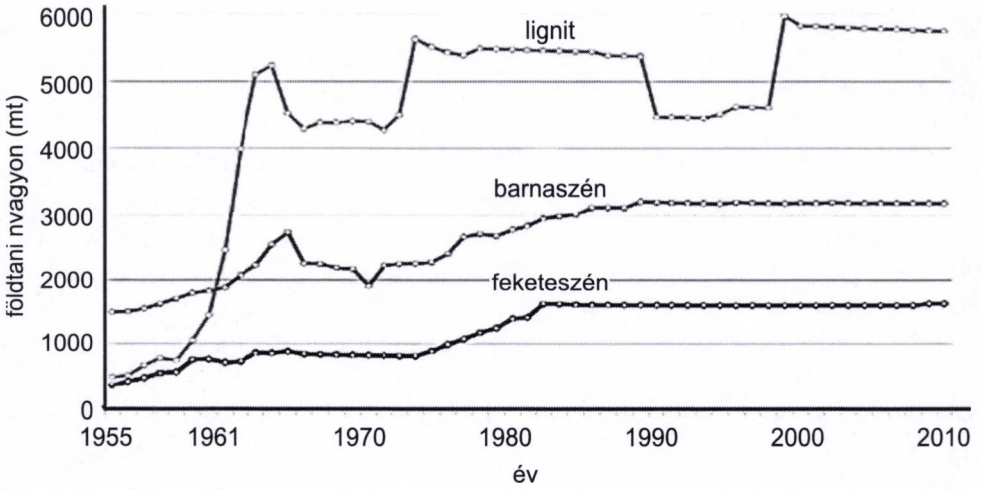
2.8. ábra. Magyarországi szénlelőhelyek (*Forrás:* Radócz Gy. 1983)

2.5. táblázat. Magyarország szénvagyona

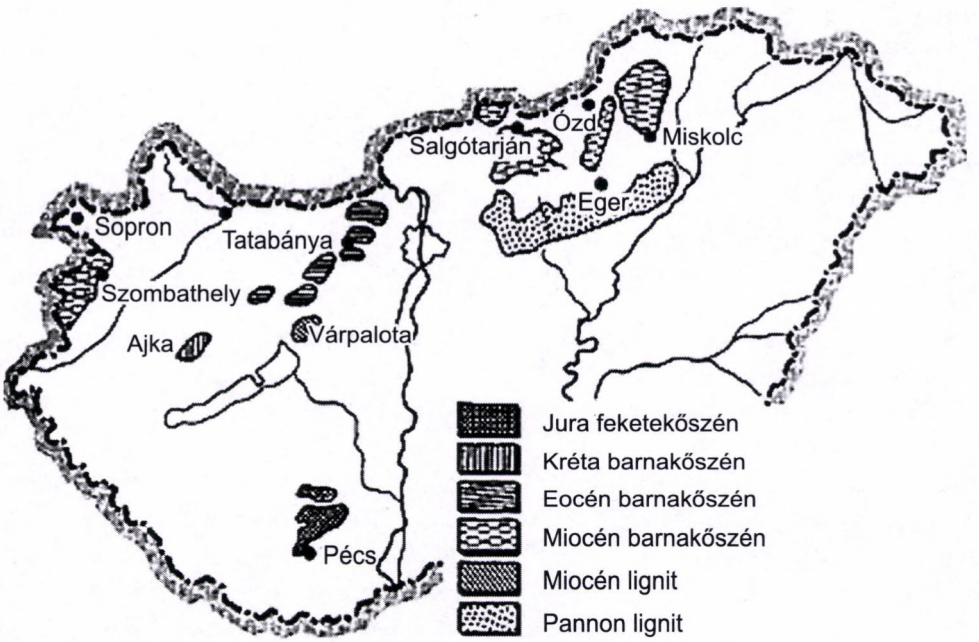
	Vagyon	2009. január 1. (millió t)	2010. január 1. (millió t)
Feketekőszén	földtani	1 986,2	1 915,5
	kitermelhető	1 596,7	1 625,1
Barnakőszén	földtani	3 198,6	3 198,0
	kitermelhető	2 244,3	2 243,8
Lignit	földtani	5 769,6	5 761,0
	kitermelhető	4 364,6	4 356,3
Magyarország összes szénvagyona	földtani	10 564,9	10 584,1
	kitermelhető	8 595,1	8 515,6

Bányászat és Geotermia 2011. november

A magyarországi szénfelhasználás történetét a gazdálkodási szempontok és az iparfejlesztés jelentősen befolyásolta. Nagy változásokat hoztak a külső és belső gazdasági módosulások. A szénvagyon egyes kategóriáinak értékét pedig az árak és a feltárási technika fejlődése befolyásolja.



2.9. ábra. Magyarország földtani szénvagyonának alakulása



2.10. ábra. A magyarországi feketekőszén-, barnakőszén- és lignitelőfordulások a földtani kor feltüntetésével (Juhász 1987 nyomán)

Mecsek hegység. – Magyarország egyetlen feketekőszén-előfordulása a Mecsek hegységben van. A kőszén nagy része kokszolásra alkalmas. A telepek az alsó jura (liász) korban képződtek. A kőszéntelepes üledékes rétegsor vastagsága Pécs környékén a 900 métert is eléri, itt az 5 méternél vastagabb telepek száma meghalad-

ja a 170-et. A bányászat az 1700-as évek végén indult, és 200 éven át működött. A bányák nagy része a metánfelhalmozódás miatt sújtólégveszélyes. A bányászat fő központjai Pécs, Komló, Szászvár, Mázа, Nagymányok voltak. A komlói bánya 2000-ben zárt be.

Ajka. – Felső kréta korú barnakőszén-előfordulás. A kőszéntelepek három telepcsoportban jelennek meg. Az alsó telepcsoport tartalmazza a legjobb minőségű barnakőszenet. A középső telepcsoport érdekessége az ajkait nevű ásvány, amely tulajdonképpen borostyánkő. A felső telepcsoport gyengébb minőségű barnakőszenet tartalmaz. Az ajkai barnakőszéntelepek jellemzője a magas uránkoncentráció. A bányászat az 1980-as években szűnt meg.

Az északkelet-dunántúli eocén barnakőszén-terület. – Limnikus eredetű barnakőszén-terület, jellemző rá a töréses szerkezet. A fő helyek Tatabánya, Dorog, Tokod, Balinka, Dudar, Oroszlány, Nagyegyháza, Csordakút, Mány voltak (Mányban 2004 végén szűnt meg a bányászkodás). Az utóbbi három előfordulásnál a kőszén közvetlenül alsó eocén bauxitra települ, így néhány vágatban mindkettőt fejtették. A bányászat itt rendkívül karsztvízveszélyes, intenzív szivattyúzást kell végezni, ami a források kiapadásához vezethet.

A nógrádi és borsodi barnakőszén-terület. – Az észak-magyarországi barnakőszéntelepek az alsó középső miocénben keletkeztek, limnikus jellegűek. A bányászat az 1800-as évek közepén kezdődött, napjainkban már csak néhány, kisebb kapacitású bánya működik.

Brennbergbánya. – Alsó miocén korú barnakőszéntelepek a Soproni-hegység nyugati részén. Magyarország első szénbányája ezen a területen működött, 1759-ben kezdték a termelést. Ma múzeum mutatja be az egykori bányászkodás körülményeit.

Várpalota, Hidas. – Várpalotán középső miocén korú lignit-előfordulás van. A bányászat az 1800-as évek második felében kezdődött. Ugyancsak miocén korú lignitet bányásznak a Mecsek hegységben, Hidas közelében.

Mátra- és Bükkalja. – Pannon korú lignit. A terület a többi hazai kőszénlelőhelyhez viszonyítva kiemelkedően nagy készletekkel rendelkezik. A becsült lignitvagyon több mint 3 milliárd tonna, míg az egyéb hazai előfordulások készletei milliós nagyságrendűek voltak. A bányászat külszíni fejtéssel történik. A bányatérségeket folyamatosan vízteleníteni kell, mert a talajvízszint a bányászat szintje fölött van. A bányászat központjai Gyöngyösvisonta és Bükkábrány. A bükkábrányi bányát 1985-ben nyitották meg. A pannon lignitek gazdasági jelentősége igen nagy, mivel jelenleg ezek az ország legolcsóbb energiaforrásai. A lignitből a mátrai hőerőműben nyernek villamos energiát.

Szombathely–Torony. – A mátra- és bükkaljai lignithez hasonlóan pannon korú lignitelőfordulás, mely Szombathelytől nyugat felé, Ausztriába is áthúzódik. Előnye az előző előforduláshoz viszonyítva az, hogy a telepek nagy része a talajvízszint felett van, és vastagságuk nagyobb, illetve egyenletesebb, mint a mátra- és

bükkaljai ligniteké. Külszíni bányászat Torony mellett folyt, az előfordulás további bányászatra perspektivikus (Hartai 2004, Magony 2008, Magyarországi kőszén-előfordulások BK, 2007)

Biomassza az energiafejlesztésben

A bio-tüzelőanyagok és a mezőgazdaság közötti kapcsolat még kialakulatlan. Az UNFAO 2008-as vizsgálatai szerint a bio-tüzelőanyagok az élemiszerárakban 10%-os növekedést okoznak. A biotüzelőanyag-termelés csökkenti az élelmiszer-termőterületet, a cellulózt használó iparra is hatással van, új, gyorsan növő fákat terveznek kifejleszteni stb. A bio-tüzelőanyagok nagy részét hasznosítás előtt elő kell készíteni, fel kell dolgozni. A bio-tüzelőanyagok a szállítási szektorban nem hasznosíthatók közvetlenül.

A biomassza mint fogalom az energiahordozók igen széles területét fogja át. Egyre nagyobb mértékben használják különböző fajtáit a villamosenergia-fejlesztésben is. Az energetikának a természeti szénciklusban játszott és vitatott szerepét mindenképpen kedvezőbbé változtatja.

2.11. ábra. Biomassza-feldolgozó üzem

A biomassza az energetika folyamatában. – A biomassza (fitomassza) – mint tüzelőanyag – előnyei:

- megújuló energiaforrásként kezelik, szén-dioxid-kibocsátása a zárt ciklus miatt a környezetre nem káros (nem helyes megállapítás a CO_2 káros minősítése);
- melléktermék lehet, tehát „gyártása" nem igényel külön energiát;
- a bányáktól távol eső helyeken is sokkal egyenletesebb eloszlásban képződik, így szállítása kevésbé költséges;
- fűtőértéke megközelíti (13–16 MJ/kg) a barnaszenekét, és meddőt nem tartalmaz;
- hamutartalma 2–8%, amely közvetlenül felhasználható talajjavításra;
- homogén formában (brikett, pellett, faaprítók) komfortossága azonos a szénével, kéntartalma alacsony, és nem tartalmaz egyéb környezetszennyező anyagot sem.

A biomassza fogalma nem egységes. A biomasszát sokféle szempontból lehet csoportosítani. A hasznosítás szempontjából például lehetnek:

- *elsődleges biomasszák* a természetes vegetáció, a szántóföldi növények, az erdő, a rét, a legelő, a kertészeti növények, a vízben élő növények;

– növényi eredetű termékek;
– feldolgozási hulladékok;
– *másodlagos biomasszák*: az állatvilág, a gazdasági haszonállatok, az állattenyésztés fő termékei, melléktermékei, hulladékai;
– az elsődleges biomasszák melléktermékei;
– állattartási melléktermékek;
– biomassza-feldolgozási melléktermékek;
– *harmadlagos biomasszák:* a biológiai anyagokat felhasználó iparok termékei, melléktermékei, hulladékai, az emberi települések szerves eredetű hulladékai;
– biomassza jellegű hulladékok;
– biomassza-feldolgozási melléktermékek;
– visszaforgatott (recycling) biomasszák.

A biomasszák energetikai hasznosítása sokféle módon történhet. A biomassza közvetlen elégetésének célja lehet:
– hőfejlesztés;
– villamosenergia-fejlesztés;
– kapcsolt hő- és villamosenergia-fejlesztés;
– kapcsolt hő- és villamosenergia-fejlesztés és hűtés;
– biomassza alapú gáztermelés;
– termikus bontás, oxigén nélkül (anaerob pirolízis) ;
– termikus bontás, kis légfelesleggel;
– rothasztás (fermentáció) ;
– biomassza alapú hajtóanyag-előállítás;
– repcemetilészter-olaj észterezéssel (RME);
– bioalkohol (erjesztés);
– piro-olaj (pirolízis).

2.6. táblázat. A fakomponensek mért és számított égéshője

Fakomponens	Égéshő számított érték (kJ/kg)	Égéshő mért érték (kJ/kg)
cellulóz	17 443	17 030–17 995
holocellulóz	–	18 344–18 441
xilán	18 037	–
xilán (deacetilezett)	17 790	
hemicellulóz	–	10 670–17 954
lignin $C_9H_{8,77}(OCH_3)_{1,58}$	25 129	–
lignin	–	21 180–26 740
etanol-benzol extrakt	–	34 500–40 500

A potenciális bioenergia. – A Föld felszínére évente érkező napsugárzás $2{,}6 \cdot 10^{24}$ J/év energiájának valamivel több mint 2‰-e fotoszintézis révén $5{,}7 \cdot 10^{21}$ J/év energiaértékű biomasszát hoz létre. Ez tekinthető a világ fotoszintézisből származó elméleti biomasszakészletének. Magyarország esetén az évi $437 \cdot 10^{18}$ J/év napsugárzás – a világarányok figyelembevételével – évente $958 \cdot 10^{15}$ J/év = 958 PJ biomasszát jelent évente. A számított elméleti energiakészlet összhangban van a Magyarországon megtermelt biomassza, 941 PJ/év energiaértékkel. (Magyarország primerenergia-felhasználása 2005. évben 1130 PJ volt.) A világ favagyona ~300 milliárd m^3, évente 3-4 milliárd m^3 a kitermelés. Hasznosítása:

- ipari fa (~50%);
- kémiai és energetikai hasznosítás (tüzelő- és rostanyag: ~50%);
- további kémiai hasznosítás (vegyszerek előállítása, kinyerése stb. elenyésző mennyiségben, de jelentős anyagi értéket képvisel) 1,5 milliárd m^3/év.

A természetben a fotoszintézissel nagy mennyiségű napenergia tárolódik. A fotoszintézis minden földi életfolyamat és energiatermelés alapvető forrása. Az összes fosszilis tüzelő- és nyersanyag (fekete- és barnaszén, kőolaj, földgáz) korábbi korok biomasszájából, tehát végső soron a fotoszintézisből származik.

A fotoszintézisnél egy gyenge oxidálószer (CO_2) oxidál egy gyenge redukálószert (H_2O), amelynek során egy erős oxidálószer (O_2) és egy erős redukálószer (szénhidrát) keletkezik. Az endoterm folyamathoz a külső energiát a napfény biztosítja. A folyamatban egy különleges anyag elnyeli a fénykvantumokat, az elnyelt energiát más molekuláknak átadja, majd visszatér az alapállapotba, hogy újabb fénykvantumokat nyelhessen el. Ezt a bonyolult feladatot a klorofill látja el. Öt különböző klorofilltípus van (a, b, c, d és f), amelyek csak kevéssé térnek el kémiai struktúrájukban. Az a és b típus a legfontosabb, mivel ezek fordulnak elő a magasabb rendű növényekben és a zöld algákban.

A növények teljesítménye óriási érték. Egy tölgyfa (kora 115 év, 200 000 levél, 1200 m^2 levélfelület, 180 g klorofill) egy napfényes nyári napon 12 kg szénhidrátot épít fel és ennek során 9,4 m^3 CO_2-t asszimilál 36 000 m^3 levegőből. Így 45 m^3 levegőt regenerál. A világon a fotoszintézissel évente $2 \cdot 10^{11}$ tonna biomassza termelődik (Scherer 1983).

A legjobb hatásfokkal az őserdőben hasznosul a napenergia, itt 30 t/ha·év, de például egy gabonatáblán 6,5 t/ha·év a biomassza-termelés. A hasznosítás módjai lehetnek: közvetlen eltüzelés, a pirolízis, elgázosítás, sajtolás, alkoholos erjesztés, metános erjesztés (biogáztermelés) stb. Bizonyos növényi magvak sajtolásával brikett, pellet, olaj nyerhető. Az olaj napraforgóból, repcéből nyerhető a legjobb hatásfokkal, hektáronként mintegy 700 kg. A felhasználás történhet közvetlen vagy átalakítás (repceolaj metil-észter) utáni elégetésükkel. Az etilalkohol desztillációval kinyerhető, közvetlenül, vagy motorbenzinbe keverve motorhajtóanyagként felhasználható.

A metános erjesztéssel kb. 50-50%-ban metánt és szén-dioxidot tartalmazó biogáz nyerhető. Fűtőértéke kb. 22 500 kJ/m^3, a földgáz fűtőértékének kétharmada, de a szén-dioxid kémiailag eltávolítható, a fűtőérték növelhető. Elsősorban melléktermékekből, például hígtrágyából érdemes előállítani, de szemétlerakókban anaerob baktériumos erjedéssel is keletkezik. A világ műszakilag hasznosítható bioenergia-készlete 170 EJ/év.

A lágyszárú növények jellemzője a hektáronkénti igen nagy növényszám, a viszonylag kis magasság, a mezőgazdaságban kialakult technológiák és a kialakult műszaki megoldások alkalmazhatósága, az évenkénti betakarítás. A fás energianövények a lágyszárúakhoz hasonlóan lignocellulózok, de évelők. Energiaerdőknek széles skálája van az energetikai célra hasznosítható biomassza-féleségek között, termesztésüket azonban sok tényező gátolja.

Az energetikai faültetvények előnyei – (Marosvölgyi 2001). Sok faj, sok termőhely jöhet számításba, akár elárasztott területeken is lehet energiaerdőt nevelni. Egy telepítéssel több betakarítás is elérhető, az energiaerdő élettartama nagyjából megegyezik a fűtőmű élettartamával (kb. 25 év). Nagy energiahozam jellemzi (200–350 GJ/ha/év), betakarításkor nagy az anyag- és energiakoncentráció, mezőgazdasági holtidényben is lehet betakarítani. A betakarítás elhalasztása nem okozza a termés elvesztését, a termesztési cél megváltoztatható, ami csökkenti a kiszolgáltatottságot. Az energetikai faültetvényeknek az energetikai-többszöröse jobb (10–12), mint a lágyszárúaké (6–9).

A fa vegyi összetétele szerint kb. 50% szén, kb. 43% oxigén és kb. 6% hidrogén, valamint kevés mennyiségű nitrogén és egyéb éghetetlen anyag. A bioenergiaforrás keletkezése fotoszintézis végterméke, a C–H, C–O, és O–H kötések oxidálhatók.

A fotoszintézis biológiai folyamatában tehát az élőlények a napfény energiáját felhasználva szervetlen anyagból szerves anyagot hoznak létre. A fotoszintézis energiatároló folyamat, amelynek során szervetlen anyagokból (CO_2 és H_2O) a klorofillt tartalmazó zöld növények a napfény energiájának felhasználásával szerves anyagot (glükózt) építenek fel és emellett még oxigén (O_2) is keletkezik:

$$6\ CO_2 + 6\ H_2O + \text{fényenergia} \rightarrow C_6H_{12}O_6 + 6\ O_2$$

A glükóz molekulasúlya 180, ebből a karbon C 40%, a hidrogén H 6,7%, az oxigén O 53,3%. A nap sugárzó energiájának hatására tehát az energiában szegény szén-dioxidból (CO_2) és vízből (H_2O) energiában gazdag glükóz ($C_6H_{12}O_6$) és oxigén keletkezik. Ez tette, illetve teszi lehetővé a napenergia felhalmozódását a jelenlegi élőlényekben és a korábban élt szervezetekben (kőszén, kőolaj).

A növények a fehér fényből csak a vörös, az ibolya és a kék színű fényt hasznosítják, ezért zöld színűek. Ez a klorofill fényelnyelési sajátosságaival van ösz-

szefüggésben. A fotoszintézist már rövid idejű megvilágítás is elindítja, ezután az átalakulási folyamatok egy ideig sötétben is folynak. Az egyes baktériumok és más élő szervezetek a napsugárzás hatására elpusztulnak.

A fotoszintézis hatásfoka: Az egyenlet alapján 6 mol CO_2-ből 1 mol glukóz képződik, amihez 2872,1 kJ energia szükséges. Egy mol CO_2-re vonatkoztatva ez 478,7 kJ-t jelent. Mivel minden energiaátalakulás veszteséggel jár, a valódi energiaigény ennél nagyobb. Noha a vörös fény kvantumainak kisebb az energiája (kb. 2 eV/fénykvantum), mint a kék fénykvantumoké (kb. 3 eV/fénykvantum), az eltérő hatásfok miatt mindkettő körülbelül ugyanannyi fotokémiai munkát végez. Mint azt kísérletileg kimutatták, CO_2-molekulánként 8-10 fénykvantum szükséges. 1 mol vörös fénykvantum (= $6{,}022 \cdot 10^{23}$ fénykvantum) energiája 171,7 kJ. 9 mol vörös fénykvantum (8 és 10 átlaga) energiatartalma $9 \cdot 171{,}7 = 1545{,}3$ kJ. A η hatásfok úgy adódik, hogy az 1 mol CO_2 asszimilációjához szükséges elméleti energiaigényt (478,7 kJ) elosztjuk a szükséges vörös fény valódi energiatartalmával (1545,3 kJ):

$$\eta_{\text{vörös}} = 478{,}7/1545{,}3 \cdot 100\% = 31\%$$

A kék fény kvantumainak energiatartalma 272,1 kJ/mol, amiből hasonló számítással

$$\eta_{\text{kék}} = 20\% \text{ adódik.}$$

Az égetés. – A fotoszintézis során keletkezett cukor elégésekor az éghető alkotók égéshőjének megfelelő hőmennyiség szabadul fel. Levegővel, oxigénnel való elégetéskor a termékek: CO_2, H_2O. Oxigénhiány esetén: CO is. A glükóz égése 2808 kJ/mol energiafelszabadulással jár.

A hidrogénégés energiamennyisége függ attól, hogy az égéstermék folyadék vagy gőz. 1 kg hidrogénre vonatkoztatva, ha folyadék, 141,97 MJ, illetve 119,6 MJ, ha gőz.

A fontosabb reakciók különböző értékkel és állapotra találhatók az irodalomban:

$C + O_2 = CO_2$ exoterm,	$\Delta H =$	–406 kJ/mol
$C + O_2 = CO_2$	$\Delta H_C =$	–44 966 kJ/kmol
$C + O_2 = CO_2$		–2818 kJ/mol
$C + O_2 = CO_2$		–40 8804 kJ
$H_2 + 1/2O_2 = H_2O$	$\Delta H_H =$	–14 4307 kJ/mol
$2\,H_2 + O_2 = 2\,H_2O$		286 121 kJ

A hidrogén égésekor az entalpia −286 kJ/mol

$$2\,H_2(g) + O_2(g) \rightarrow 2\,H_2O(l) + 572 \text{ kJ } (286 \text{ kJ/mol})$$

A fizikai és kémiai összetevőkből (pl. C, H etc) az energiatartalomnak közelítő számítására különböző közelítő egyenleteket hoztak létre:

A következő adatokkal számítható fűtőérték:

C 32,808 MJ/kg
H 120,971 MJ/kg
CO 10,112 MJ/kg

$$MJ/kg = -1{,}367 + 0{,}3137\ C + 0{,}7009\ H + 0{,}0318\ O$$

A glükózra alkalmazva a képletet: 17,77 MJ/kg érték adódik, amely a ±5%-os hibahatár felső határához közelít, ami a 2808 kJ/mol értékből 15,6 MJ/kg.

$CO_2 + C = 2\ CO$ $\Delta H = +36568$ kJ/kmol
$C + CO_2 \leftrightarrow 2\ CO$ endoterm, $\Delta H = +160$ kJ/mol
$C + H_2O \leftrightarrow CO + H_2$ endoterm, $\Delta H = +118$ kJ/mol
$C + 2\ H_2 \leftrightarrow CH_4$ exoterm, $\Delta H = -88$ kJ/mol

A kőszén kiindulóanyaga a növényzet. A tőzeg növényvilágának cellulóz- ($C_6H_{10}O_5$) és a lignin-($C_{12}H_{18}O_9$) tartalma oxigén hiányában végbemenő átalakulása során, a szénülési folyamat alatt Renault szerint az alábbi kémiai esemény zajlik le:

$$4C_6H_{10}O_5 \rightarrow C_9H_6O + 7CH_4 + 8CO_2 + 3H_2O$$
cellulóz → kőszén + metán + szén-dioxid + víz

$$2C_{12}H_{18}O_9 \rightarrow C_9H_6O + 7CH_4 + 8CO_2 + H_2O$$
lignin → kőszén + metán + szén-dioxid + víz

Érdekes összehasonlítani a különböző napenergia-hasznosítási eljárási lehetőségek elméleti hatékonyságának tájékoztató értékeit.

A biomassza által megkötött napenergia hatásfoka:

Vörös fény – kék fény 31% – 19%
Kazánban, gőzerőműben 40%
Bioenergia-hatásfok: 0,30 · 0,4 → 0,19 · 0,4 = 12%–7,6%
A fotovoltikus hatásfok: 8%–17%
Naptükrös gőzerőmű: ~8%–10%

A fa összetevőinek több mint 80%-a fagázként ég el, annak ellenére, hogy a fa szilárd anyag. Ez a gáz formájában való égés a fűtőérték kb. 70%-át adja. A fa elégésekor először a víztartalom elpárolgására van szükség, amely a fa 100 °C-ra való felhevülésével érhető el. Ezek után elkezdődik a bomlási folyamat, melynek követ-

keztében a molekulák hasadni, párologni kezdenek. Ekkor kb. 100–200 °C-on a gáz felszabadul. A fa kivágásakor annak víztartalma még igen magas, a fa tömegének kb. 50%-a körül van. Nagyjából egy év alatt szárad a fa természetes körülmények között légszáraz állapotúra. A légszáraz fa még mindig 15-20% vizet tartalmaz.

A fontosabb biomassza-féleségek tüzeléstechnikai jellemzői (2.7. táblázat). – A melléktermékek fűtőértéke függ a kiindulóanyagtól és a környezeti befolyásoló tényezőktől (tárolási feltételek, nedvességtartalom stb.), elsősorban azonban a széntartalom befolyásolja. A táblázat szerint ez az érték általában 50% alatt van (a kőszenek széntartalma 80–92%).

A hidrogéntartalom nem nagy és a kéntartalom csekély mennyiségben van jelen. A kis kéntartalom környezetvédelmi szempontból kedvező, a viszonylag kis hidrogéntartalom azonban a fűtőérték szempontjából nem előnyös.

2.7. táblázat. Néhány energetikai bioanyag jellemzője

Biomassza	Kémiai összetevők					Fűtőérték MJ/kg	Hamu %	Illó %
	C	H	O	N	S			
Búzaszalma	45	6,0	43	0,60	0,12	17,3	74,0	6,0
Kukoricaszár	47	6,3	46	0,16	0,02	17,5	76,0	3,5
Fa						18,5	85,0	0,5
Kéreg	47	5,4	40	0,40	0,06	16,2	76,0	9,0
Kérges fa	47	6,0	44	0,30	0,50	18,1	82,0	0,8
Repceolaj	77	12,0	11	0,10	0,00	35,8	10,0	0,0
Etanol	52	13,0	25	0,00	0,00	26,9	10,0	0,0
Metanol	38	12,0	50	0,00	0,00	19,5	10,0	0,0

A biomassza magyarországi helyzete. – A biomassza a növénytermesztésből, erdészetből, állattenyésztésből, az élelmiszeriparból és a kommunális és ipari hulladékokból származik. A jelenlegi fejlett technológiák már lehetővé teszik a biomassza gazdaságos felhasználását mind villamosenergia-fejlesztésre, mind fűtésre. A becslések és a statisztikai adatok szerint a hazai, energiaforrásként felhasználható biomassza éves mennyiségét a 2.8. táblázat mutatja.

2.8. táblázat. A bio-energiaforrások helyzete Magyarországon

	10^6 tonna szárazanyag
növénytermesztés	4 – 4,5
állattenyésztés	1,8 – 2,3
élelmiszeripar	0,15 – 0,2
erdőgazdaság	3 – 4
települési hulladék	25 – 30

2.8. táblázat folytatása

Hazai potenciál, fajtái és mennyisége	
Az ország összterülete	9,303 millió ha (100,0%)
Erdővel borított (2002)	1,823 millió ha (19,6%)
Erdővel borított (1967)	1,572 millió ha (16,9%)
Összes élőfakészlet	~330 millió m^3 (100%)
Éves növekmény	~12 millió m^3 (~4%)
Éves fakitermelés	~7 millió m^3 (~2%)
Fa az erőművekhez (terv)	kb. 1,5 millió m^3
Fa a Pécsi Erőműhöz (terv)	kb. 0,4 millió m^3
Fa a Borsodi Erőműhöz (terv)	kb. 0,3 millió m^3
Fa az Ajkai Erőműhöz (terv)	kb. 0,3 millió m^3

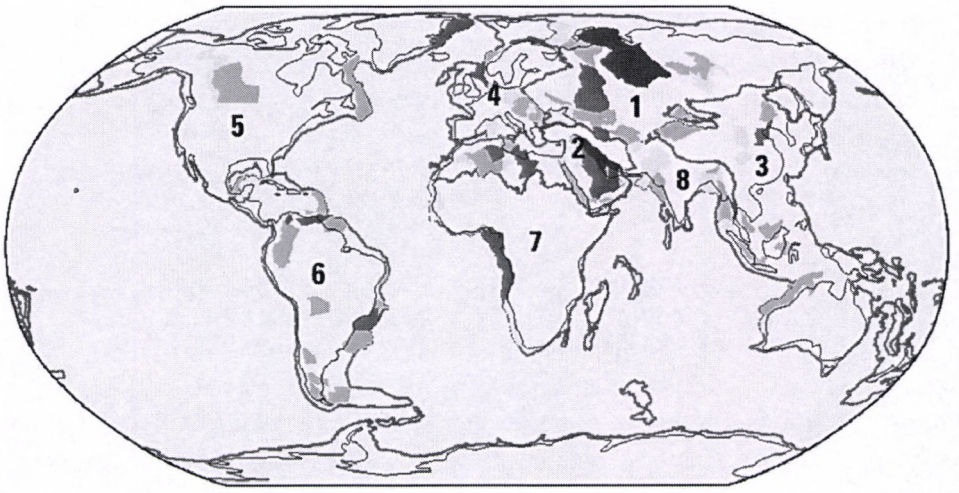
Dendromassza (itt erdőgazdálkodás)	PJ/év
Tűzifa	20–22
Energiaerdő	30–32
Vágástéri hulladék	5–7
Növényi biomassza	
Gabonatermékek melléktermékei	10–12
Egyéb növényi melléktermékek (szárak, levélzet, venyige stb.)	30–50
Termesztett energianövények	30–40
Biohajtóanyagok	4–6
Másodlagos biomasszák	
Hígtrágya	0,7–1
Állati hulladékok, melléktermékek	1,3–5
Feldolgozási hulladékok	5–7
Harmadlagos biomasszák	
Élelmiszer-ipari hulladékok	3–5
Élelmezési hulladékok	6–9
Szennyvízkezelés iszapjai	15–40
Kommunális biohulladék	30–80
Összesen	200–320

Az elsődleges biomassza-termelés során hazánkban évente kb. 54–58 millió tonna szerves anyagot termelnek a növények (szárazanyagban kifejezve), amelynek több mint a fele hulladék. A különféle becslések szerint a mintegy 25–26 millió tonna mezőgazdasági és 1–2 millió tonna erdészeti melléktermékből legalább 3,5 millió tonna, de akár 6–8 millió tonna szerves anyagot hasznosíthatnánk energetikai célra.

2.2. A szénhidrogénmezők kialakulása, fajtái és elhelyezkedése

Kőolaj és földgáz

A Föld történelme során a szerves anyag finomszemcsés szervetlen anyagokkal (agyag, márga) együtt rakódott le. A növekvő üledékréteg súlya alatt a nagy nyomás és magas hőmérséklet révén alakulnak át szénhidrogénné, és felfelé vándorolnak a pórusos szerkezetű kőzetben. Ez addig tart, amíg az anyag elér egy át nem eresztő réteget, ahol megreked és elkülönül: alul víz, felül kőolaj és esetleg fölötte földgáz helyezkedik el. A kőolaj a vándorlás miatt nem a keletkezési helyén (anyakőzetben), hanem az úgynevezett tárolókőzetben található, nehéz megállapítani, hogy hol képződött. A jelenleg gazdasági hasznosítás szempontjából jelentős kőolajtelepek nagyrészt a földtörténeti harmadidőszakban keletkeztek. A trópusi esőerdők a szénképződés folyamatában játszottak jelentős szerepet. A jövő ellátottsága szempontjából az olaj a legproblémásabb, ezért a szénhidrogének között kitüntetett szerepet foglal el. A világban elhelyezkedő fontosabb olajmezők külön is érdeklődésre tartanak számot (2.12. ábra).



2.12. ábra. A Föld nagy olajmezői. A sötétebb a nagyobb mennyiséget jelenti. A nyolc legnagyobb olajmező a következő térségben található: 1. Korábbi Szovjetunió, 2. Közép-Kelet és Észak-Afrika, 3. Ázsia és a Csendes-óceán térsége, 4. Európa, 5. Észak-Amerika, 6. Közép- és Dél-Amerika, 7. Afrika, 8. Dél-Ázsia

Az olajkészleteket 300 milliárd tonnára becsülik, a világtermelés hozzávetőlegesen 3 milliárd tonna/év. A még rendelkezésre álló készletekre vonatkozó becslések eltérők. A kőolaj és földgáz képződéséhez és felhalmozódásához a következő alapfeltételek szükségesek:

– Magas hőmérsékletű anyakőzet. Szerves anyagban gazdag agyag, agyagpala vagy karbonátos kőzet. A kőzetben, a földtörténeti múltban eléggé magas hőmérsékleti viszonyok (> 60 °C) voltak.
– Jelentős porozitású és permeabilitású (áteresztőképességű) tárolókőzet kell. Lehet homokkő, repedezett mészkő, vagy bármilyen egyéb, repedezett kőzet.
– Közlekedési lehetőség az anyakőzet és a tárolókőzet között.
– Nem permeábilis fedőkőzet a tárolókőzet rétegei fölött.
– Csapda. Az anyakőzet, tárolókőzet és a fedőkőzet olyan szerkezetté formálódjék, amelyből a kőolaj és földgáz nem tud eláramlani.

A kőolaj és földgáz kémiai összetétele

A kőolaj (nyersolaj) és földgáz szénhidrogén-molekulákból épül fel. Alapvetően szénből és hidrogénből áll, de tartalmazhat néhány százaléknyi nitrogént, oxigént és ként is, valamint nyomokban egyéb elemek, például vanádium és nikkel is megtalálható.

A természetes szénhidrogén-molekulák típusai:
– telített szénhidrogének (a szénatomok egy kovalens kötéssel kapcsolódnak)
– paraffinok (alkánok): C_nH_{2n+2}
– naftének (cikloalkánok): C_nH_{2n}
– aromás szénhidrogének (aromás gyűrűket és láncokat tartalmaznak): C_6H_6 (benzolgyűrű)
– gyanták és aszfaltének (benzolgyűrűk kapcsolódása, a C atomokat egyes helyeken N, S, O helyettesíti).

A földgáz csak esetleg paraffinokat tartalmaz, és csak olyanokat, amelyekben a szénatomszám kisebb, mint 5. A földgázt felépítő vegyületek tehát a metán, etán, propán és bután. A tisztán metánból álló földgázt száraz gáznak nevezzük, a 2–4 szénatomszámú paraffinokat is tartalmazó gázt nedves gáznak. A kőolaj 5–14 szénatomszámú paraffinokból és egyéb szénhidrogén-molekulákból áll.

Ha a paraffinok szénatomszáma meghaladja a 14-et, a kőolaj aszfaltszerű, majdnem szilárd anyaggá válik.

A kőolaj és földgáz keletkezése

A kőolaj- és földgázképződés kiindulási anyaga az elhalt élőlények szerves anyaga. A folyamatban az élőlényeket felépítő fehérje-, zsír- és szénhidrát-molekulák elemeikre (C, H, N, O) bomlanak, hogy megnövekedett hőmérséklet- és nyomásviszonyok mellett szénhidrogén-molekulákká épüljenek. Kiindulási anyagként a magas fehérjetartalmú algák vagy az állatok elhalt anyaga alkalmas szénhidrogén-képződésre.

A szerves anyag felhalmozódása oxigénszegény környezetben történhet. A reduktív üledékképződési környezet kedvez a szerves anyag megmaradásának, mert egyrészt nem oxidálódik el, másrészt az oxigénhiány miatt nincsenek olyan formációk, amelyek elfogyasztanák. A szerves anyagból rothadó iszap jön létre, ami a továbbiakban sötétszürke bitumenes kőzetté, a kőolaj és földgáz anyakőzetévé alakul.

A szerves anyag átalakulási szakaszai, a betemetődése mellett:

1. Az első szakasz a diagenezis. Ez átmeneti állapot a szerves anyag és a szénhidrogének között. A szerves anyagtól az különbözteti meg, hogy szerves oldószerekben már nem oldható. A lebontást kezdetben a baktériumok végzik, így biogén metán keletkezik, de ez elillan a légkörbe. A diagenezis 60 °C-ig tart (1–2 km mélység).
2. A második szakasz a katagenezis. A kerogénből apró cseppek formájában elkezdődik a kőolaj és földgáz elkülönülése. Ez a szakasz 60–175 °C-ig tart, ami 4 km körüli maximális mélységnek felel meg.
3. A harmadik szakasz a metagenezis. A kerogénből való direkt elkülönülés megszűnik. Csak metán keletkezik az előzőekben elkülönült szénhidrogének hőhatású átváltozásával. Az átalakulásban döntő szerepe a hőmérsékletnek van, az idő és a nyomás szerepe alárendelt. A szénhidrogén-képződés intenzitása a hőmérséklettel exponenciális, az idővel lineáris összefüggésben van (Micsinai, Pogácsás 2011).

A szénhidrogének keletkezésének alapfeltétele, hogy az adott kőzet hőmérséklete haladja meg a 60 °C-t. Ezt például paleohőmérsékleti mérésekkel lehet meghatározni. Ennek több módszere van, például:

- A spórák színe növekvő hőmérséklet hatására a sárgától a sötétbarnáig változik.
- Vitrinitreflexióval, mert a vitrinitrészecskék fényvisszaverő képessége növekvő hőmérséklettel fokozódik.
- Illitkristályossági index alapján. Az illit agyagásvány szerkezete növekvő hőmérséklettel egyre rendezettebbé válik, kristályossági foka nő.

A három módszert együttesen alkalmazzák.

A kőolaj és földgáz a rétegterhelő nyomás hatására változtatja a helyét, a tárolókőzetbe való eljutásig. A tárolóban magában is mozog az anyag, amíg be nem következik a csapdázódás. A mozgás a felhajtóerő, a kapilláris nyomás és a hidrodinamikai hatás miatt következik be.

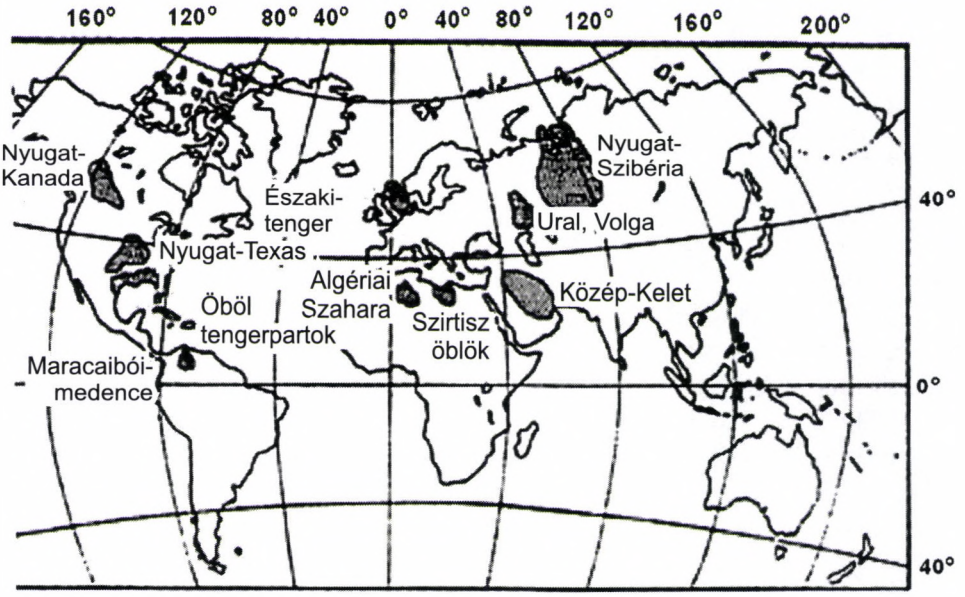
Felhalmozódás akkor következik be, amikor a nem permeábilis fedőkőzet megakadályozza a további szétterjedést, és a szénhidrogének a tárolókőzetben (rezervoár) létrejött csapdában megrekednek.

A tárolókőzet fontosabb jellemzői:

- Porozitás a pórusok összes hézagtérfogatának a teljes kőzettérfogathoz viszonyított aránya. A tárolókőzetek porozitása 5-30% között változik. Fajtái:
  - elsődleges porozitás,
  - másodlagos porozitás,
  - abszolút porozitás: az összes pórus együttes térfogata,
  - affektív porozitás: az összeköttetésben lévő pórusok térfogata.
- A permeabilitás a kőzetek áteresztőképessége. Mértéke a négyzetméter. 1 m^2 az áteresztőképesség, ha 1m^2 felületen 1 Pa dinamikai viszkozitású folyadék 1 m^3/s sebességgel átáramolva 1 m hosszon 1 Pa nyomáscsökkenést okoz.

A csapda a szénhidrogének felhalmozódási helye. Típusai:

- szerkezeti csapda,
- litológiai csapda,
- sztratigráfiai csapda,
- kombinált csapda: az összes csapda együttes figyelembevételével képzett jellemző.



2.13. ábra. A Föld tíz legnagyobb szénhidrogén-területe (olaj és gáz)

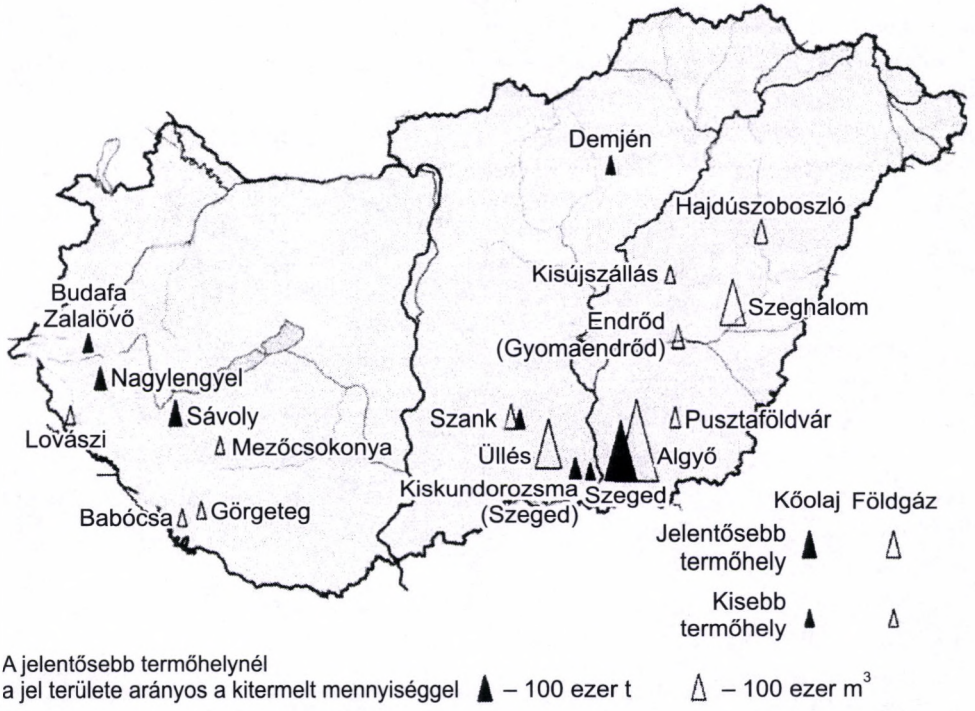
A kőolaj és a földgáz szerves vegyületek, szénhidrogének. A molekulát felépítő atomok kapcsolódási sorrendjét a molekula konstitúciójának nevezzük. Az azonos összegképletű, de eltérő kapcsolódási sorrendű molekulák pedig egymás konstitúciós izomerjei. A kőolaj több ezer szénvegyület keveréke. Ezek többsége cseppfo-

lyós és ebben oldott szilárd halmazállapotú telített szénhidrogén. Az alkotórészeket eltérő forráspontjuk alapján választják el egymástól. Ezt a módszert frakcionált desztillációnak nevezik.

2.9. táblázat. A motorhajtóanyagok jellemzői

Frakció neve	Párlási hőmérséklet (°C)	Jellemzői
motorbenzin	50–150	C_5–C_{10} közötti telített szénhidrogének, annál jobb, minél több izooktán
világítóolaj	150–250	C_{11} C_{12} ma traktorok és repülőgépek meghajtására szolgálnak
gázolaj	250–350	C_{13}–C_{15}
kenőolaj	350 felett	C_{16}–C_{28}
pakura	maradék	tüzelésre lehet felhasználni

A hazai szénhidrogén-termelés döntő részét 2–3 nagyobb termelési terület és azok környező mezői képezik.



2.14. ábra. Magyarországi olaj- és földgáztermelési helyek (2002)

A szénhidrogének anyakőzete szerves anyagban gazdag üledékes kőzet. A Magyarországot felépítő paleozoikumi és a mezozoikumi kőzetek között találhatók ilyen jellegűek. A hazai kőolaj- és földgázanyakőzetek elsősorban a harmadidőszaki, reduktív környezetben keletkezett medenceüledékek (2.14. ábra). A szénhidrogén-képződésnek kedvezett az is, hogy Magyarországon a geotermikus gradiens értéke meghaladja a világátlagot.

Az anyakőzetből távozó szénhidrogének a tárolókőzetekben halmozódtak fel. A magyarországi tárolókőzetek főleg pannon homokkövek, de lehetnek eocén, oligocén és miocén törmelékes üledékes kőzetek, illetve töredezett mezozóos mészkövek és dolomitok is, amelyekbe a fiatalabb anyakőzetből oldalirányú migrációval jutottak a szénhidrogének. Hazai szénhidrogén-övezetek:

- Kisalföld (Mihályi, Répcelak): Pannon üledékekben felhalmozódott CO_2 gáz (I).
- Zalai-övezet (Budafa, Nagylengyel, Lovászi, stb.): A tárolókőzet elfedett, repedezett triász és kréta mészkő, dolomit, illetve pannon homokkő. A telepek már nagyrészt kimerültek (II).
- Duna-Tisza köze (Kiskunhalas, Szank): A tárolókőzet miocén konglomerátum, homokkő (III).
- Tiszántúl (Pusztaföldvár, Battonya, Algyő, Hajdúszoboszló): A tárolókőzet miocén és pannon homokkő. Ebben az övezetben vannak az ország legnagyobb kőolaj- és földgáztelepei. Az algyői a legjelentősebb hazai szénhidrogén-előfordulás, itt a tárolókőzet pannon homokkő. Hajdúszoboszló a legjelentősebb földgáztelep (IV, V).
- Észak-Magyarország (Mezőkeresztes, Demjén, Fedémes, Bükkszék): Nem jelentős telepek. A tárolókőzet oligocén homokkő, az olaj nagy sűrűségű, nehezen kinyerhető.

Kátrányhomok és olajpala

A kátrányhomok sötétszürke-fekete színű, besűrűsödött olajjal átitatott homok. Létrejöttekor a kis szénatomszámú paraffinok mennyisége lecsökken, és 26–30 szénatomszámú paraffinok dúsulnak fel, ami a kőolaj sűrűségének és viszkozitásának jelentős növekedéséhez vezet. A kátrányhomokok a Föld kőolajkészletének jelentős hányadát képezik, de kitermelésük nehéz és költséges. Legjelentősebb előfordulásuk a kanadai Alberta államban van, itt külfejtésekből bányásszák a kátrányhomokot, és lepárlással nyerik az olajat.

Az olajpala szürke színű, vékonylemezes-leveles megjelenésű, kis térfogatsúlyú, agyagra emlékeztető kőzet. Szervesanyag-tartalma a 80%-ot is elérheti.

Magyarországon több olajpala-előfordulást is feltártak, de hazai viszonyok között a kőzetet talajjavításra használják. A kőzet kiindulási anyagát elsősorban az algák szolgáltatták, alginit néven is ismert.

Alginit-előfordulásokat a következő helyeken tártak fel:

- A Dunántúli-középhegységben (Pula, Gérce, Várkesző). A vulkáni tevékenység során keletkezett medencékben krátertavak alakultak ki, amelyekben dús algatenyészet telepedett meg, biztosítva az alginitképződést. A telep vastagsága átlagosan 50 méter.
- Várpalotán az olajpala a miocén lignittelep fedőjében található. Vastagsága átlagosan 45 méter.
- Szarvaskő mellett (Nyugat-Bükk) miocén barnakőszéntelep fedőjében igen jó minőségű, 50–80 cm vastagságú olajpalatelep található.

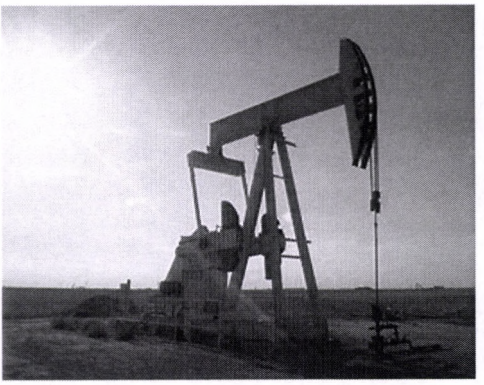
Konvencionális olajmezők

A konvencionális olajkitermelési módszerek szerint először a telepeket természetes energiával művelték (elsődleges). Az 1940–50-es évektől, ahol szükséges volt, vizet vagy gázt sajtoltak be (másodlagos), ezzel 1,5-2-szeresére növelve a gazdaságosan kitermelhető mennyiséget. Az elsődleges és másodlagos művelési eljárásokat együttesen klasszikus kitermelő módszereknek is nevezik. Az 1960–70-es évektől kidolgozták az ún. harmadlagos eljárásokat, amikor energiahordozók besajtolásával (elegyedő gázok, termikus energia, kémiai anyagok stb.) történik a kitermelés. Ezek az úgynevezett EOR módszerek (Enhanced Oil Recovery – forszírozott hatékonyságú eljárások), melyekkel bizonyos esetekben a vízelárasztáshoz képest 10–12% többleteredményt lehet elérni.

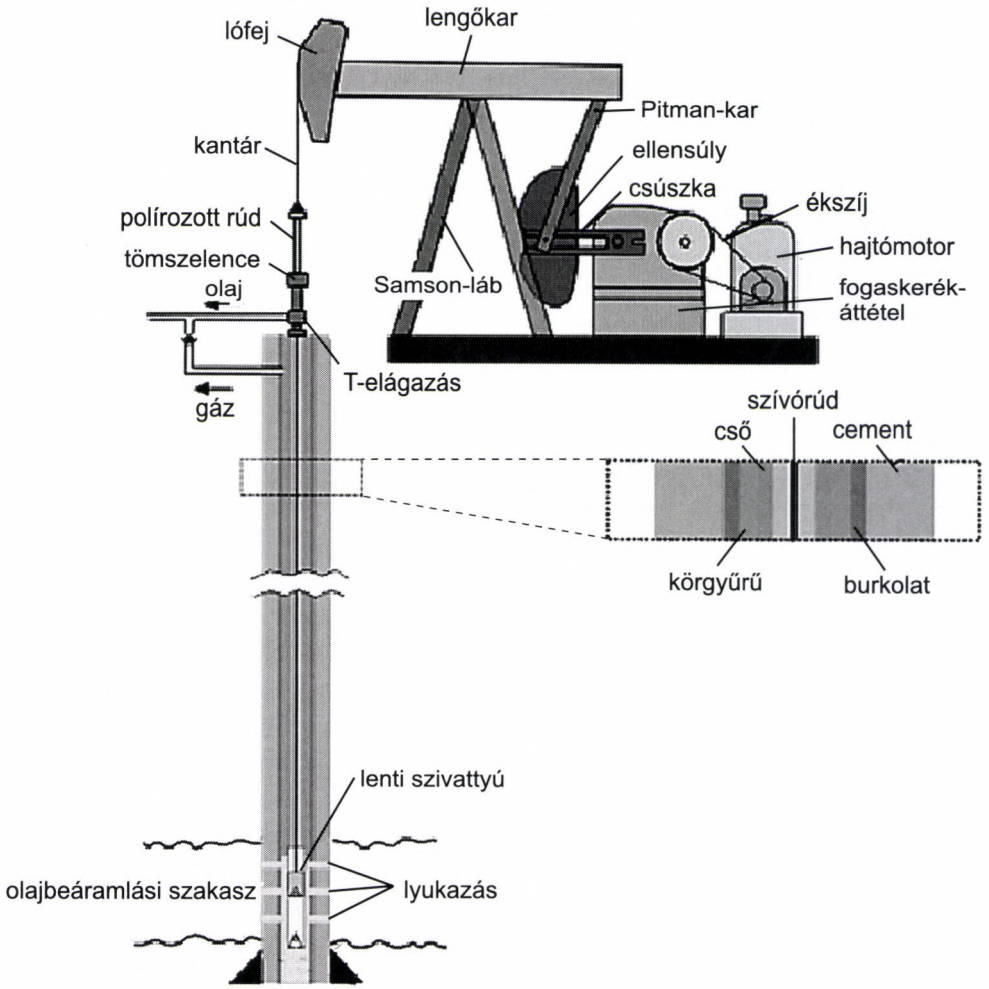
Az olaj a legkritikusabb üzemanyag. A cseppfolyós és gáz halmazállapotú szénhidrogén-tartalékok számszerűsítése azonban sokkal kevésbé problémás.

A források maximális mennyisége sokkal nagyobb pontossággal becsülhető, az olaj esetén megközelítőleg 30%-os hibával. Komoly újrabecslése történt azoknak a tartalékoknak, amelyeket a már feltárt lelőhelyek tartalmaznak. Az ún. konvencionális olaj maximálisan feltárható tartalékának mennyiségi becslése az elmúlt 30 év során gyakorlatilag változatlan maradt (Nyerges 2003).

1973 és 2000 között gyakorlatilag a konvencionális olajtartalékok becsült mennyisége változatlan. Valószínűsíthető, hogy a világ jelenlegi olajtermelése a 3,7 Gt olajegyenérték/év mennyiségről legfeljebb 5 Gt olajegyenérték/év mennyiséget ér el 2010 és 2020 között, mielőtt 2030 körül visszaesne a 4,5 Gt olajegyenérték/év szintre. 2050-re minden valószínűség szerint a jelenlegi szint körüli értékre fog a teljes termelés beállni, kb. 3,5 Gt olajegyenérték/év mennyiségre.



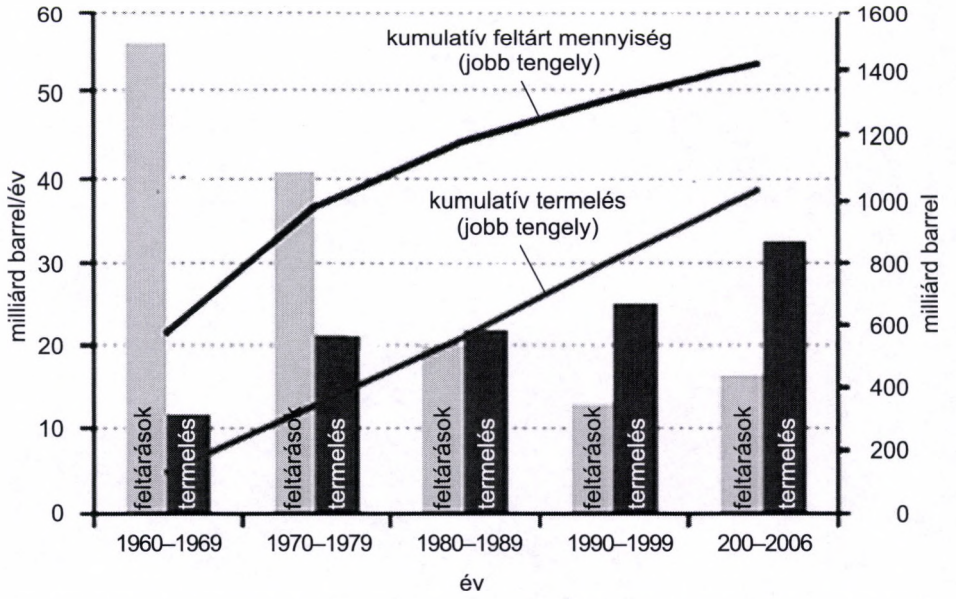
2.15. ábra. Olajkút Texasban



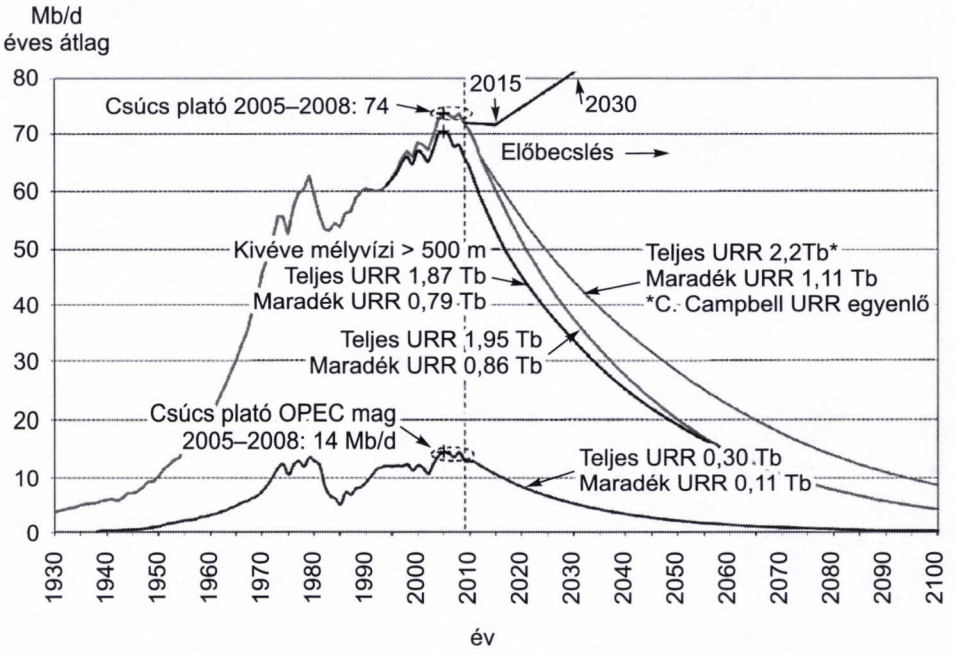
2.16. ábra. Az olajkút működési elve

Indiában az olajtermelés százalékosan stagnál, 2009-ben az energiahordozók összetétele 10% gáz, 30% olaj, 52% szén, 1% nukleáris és 5% vízenergia. 2030-ig az összetétel várhatóan nem változik jelentősen. Kanadában sokat várnak az olajhomoktól, a 2020–2030 közötti termelésnél már 95 000 b/d mennyiséget érnek el. Új-Zélandban a 15 milliárd tonnával az egy főre eső szénmennyiség a világon a legnagyobb. Új-Zéland a széncseppfolyósítással 10 000 b/d mennyiséget olajáron tud gyártani gazdaságosan, ha az olaj ára 100 és 150 USD/bbl értéket ér el.

Az előrejelzés 80 állam 300 fontos olajprojektjén alapszik (2.18. ábra). C. Campbell prognózisa 250 milliárd barrellel több, mint az alap-előrejelzés, ami azonban nem változtatja az olajcsúcs helyzetét. A további források az Északi-sarkról, Irakból és a brazíliai Santosból keletkezhetnek.



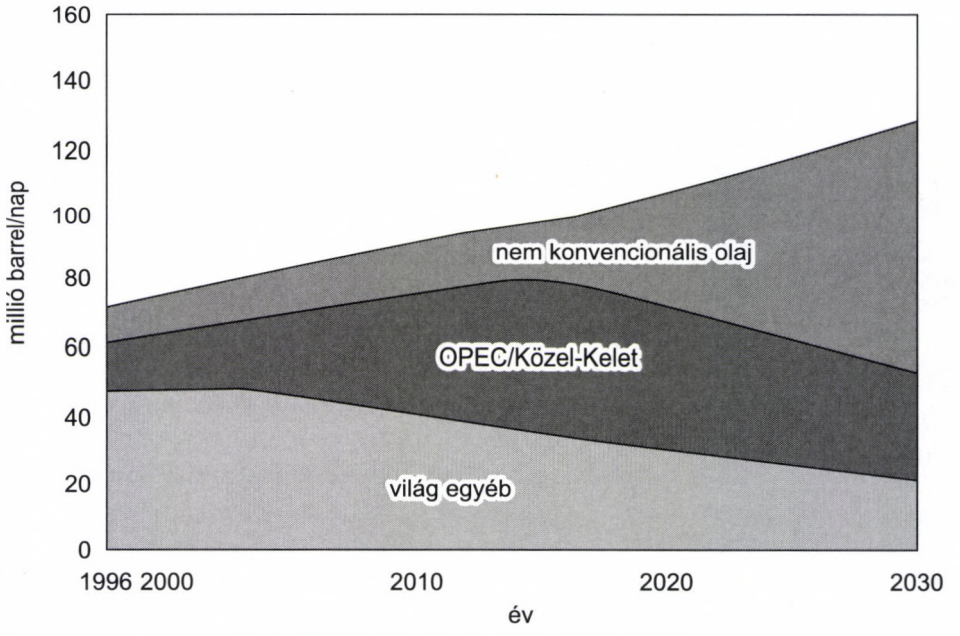
2.17. ábra. Olajfeltárás és -termelés (International Energy Agency adatbázisa nyomán)



2.18. ábra. A világ nyersolaj-, cseppfolyós szénhidrogén- és a kanadai olajhomok termelése. A termelési arány alulról felfelé: projekt/régió előrejelzés, 2009–2012 között; az exponenciális illeszkedés 2013-tól 2100-ig, az URR (Ultimate Recoverable Reserves) Végső Kitermelhető Készlet, 2008 év végén; OPEC-mag: Szaúd-Arábia, Kuvait és Egyesült Arab Emirátus; +csúcs év. Forrás: IEA (olajhomokkal)

Az IEA a jövő olajtermelésére két kétségbe vonható feltételezés alapján készített egy nagyon optimistának ítélhető prognózist (2.19. ábra). A két feltétel:

1. A világon a nem konvencionális olajmezők feltárásába nagyon jelentős beruházásokat hajt végre. Ezzel az ebből való olajtermelés az elkövetkező 25 évben meghaladja a konvencionális olajtermelést.
2. Az olajhiány kiküszöbölésére ez ideig az OPEC-nek a Közel-Keleten a jelenlegi olajtermelésének kétszeresét kell biztosítania.



2.19. ábra. Egy optimista becslés (IEA)

Olajpala és olajhomok

Az évmilliókkal ezelőtt tavakban és tengerekben szerves anyagokat tartalmazó üledékek képezik az alapanyagot az olajpala és olajhomok képződéséhez. Olajpala szerte a világban sok helyen található. A legnagyobb készletek az Egyesült Államokban vannak a Green River formáció területén, amely Colorado, Utah és Wyoming államokat érinti. Ezek a források 1,2–1,8 trillió barrel mennyiségre becsülhetők. Természetesen a jelenleg hasznosítható érték jelentősen kisebb, kb. 800 milliárd barrel, ami azonban háromszor nagyobb a Szaúd-Arábia olajkészleténél.

Az olajpala szürke színű, vékonylemezes-leveles kőzet. Szervesanyag-tartalma a 80%-ot elérheti. A szerves anyag algákból, spórákból és pollenekből áll. Hevi-

téssel, kémiai pirolízis segítségével olaj és gáz állítható elő belőle. A költségigény magas, jelenleg kevéssé hasznosítják.

A nem konvencionális olajforrás, az olajhomok-, az olajpalakészletek kitermelésének és hasznosításának a technológiája jelenleg még nem vagy csak részben kidolgozott. Ilyenek még a bitumen és a nehézolajok. Mindegyik közös jellemzője a bennük lévő szénhidrogén nagy sűrűsége. Az IEA a kinyerhető olajmennyiséget 1850 Gb-re becsüli. A konvencionális készletek 3700 Gb-es értékével várhatóan 5550 Gb áll rendelkezésre.

Magyarországon több olajpala-előfordulást tártak fel. Kiindulási anyagát elsősorban algák adták, ezért alginitnek is nevezik. Az olajhomok és olajpala kitermelése nagyon vízigényes, átlagosan egy hordó olaj kitermeléséhez 3, míg olajpala esetén 2-5 hordónyi vízre van szükség. Az ilyen kőolajkészletből jelentős mennyiséget elsősorban Kanadában hasznosítanak, Albertában az olajhomok felszíni eljárással bányászható. Kanadában az olajhomok kitermeléséhez használt víz elsődleges forrása az Athabasca folyó, jelenleg az olajtermelők évi 2,3 milliárd hordó vizet emelhetnek ki belőle. A felhasznált víznek csak 5–10%-a kerülhet vissza a folyóba, a többi, toxikus szennyvizet hatalmas, akár 50 km^2-es felületű tavakba töltik. A nem konvencionális kőolaj kitermelésének módszerei jóval energiaigényesebbek, mint a hagyományos olajtermelés, és a környezetszennyezése is lényegesen nagyobb annál. Az olajhomok kitermelése háromszor, az olajpala kitermelése akár nyolcszor akkora szénkibocsátással is járhat.

2.3. A gázmezők kialakulása, fajtái és elhelyezkedése

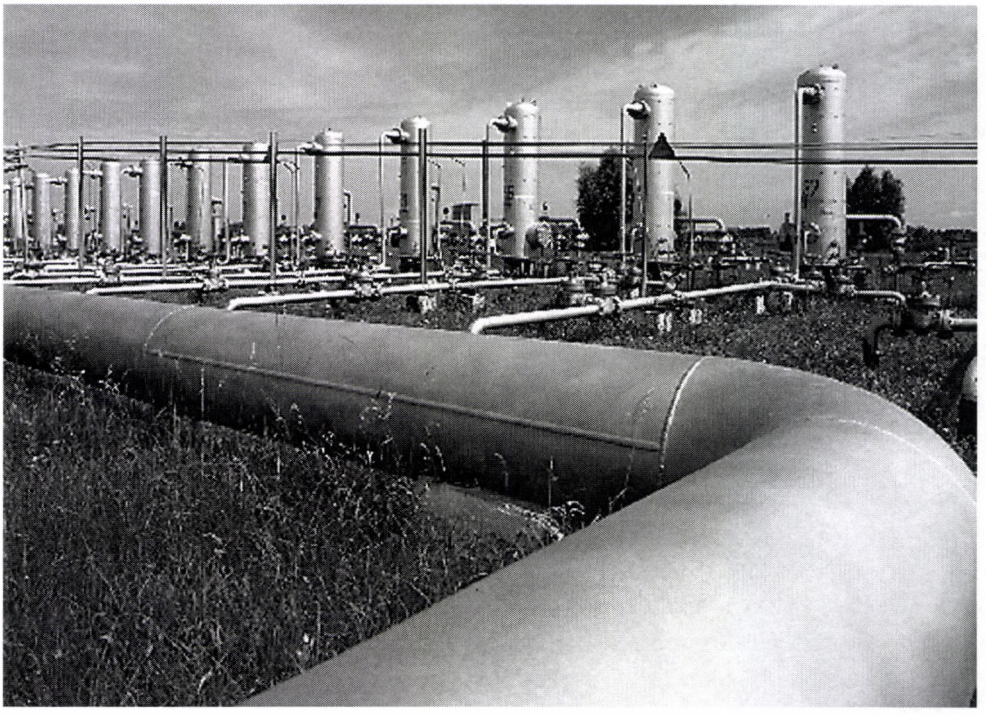
Konvencionális gázmezők

Az energiafejlesztés biztonsága szempontjából a gáz a legbiztonságosabb. Az Energy Security Forum szerint a piac bonyolultsága kihat a biztonságra is. Az energiaszektor beruházásai késnek, ami a gazdaságosságot rontja. Oroszország 2020-ig 20–25%-kal növeli a hazai energiafelhasználást. Oroszországban van a világ gáztartalékának 34%-a. Növelték a tartalékot 4 Tm^3 (141 Tcf) gázmennyiséggel. A gáztartalék 90%-a Nyugat-Szibériában van, és legnagyobb részét Európába szállítják. Jelentősek a fejlesztések Kelet-Szibériában és a Jamal-félszigeten. Kelet-Szibériából 2010–2020 között kb. 110 milliárd m^3 (3,9 Tcf) gázt lehet nyerni. A Gazprom két új vezetéket épít. Az Északi Áramlat 55 milliárd m^3 (1,9 Tcf) évenkénti gáz szállítására alkalmas. A Balti-tengerben helyezik el, és 2012-ben indult a szállítás. A Déli Áramlat 63 milliárd m^3 (2,2 Tcf) gázt szállíthat a Fekete-tengerben lefektetett vezetékkel. Folyik a tervezése a déli területen haladó Nabucco nevű földgázvezetéknek is.

Palagáz

A nem konvencionális gáz megjelenésének hatását még nem lehet tisztán értékelni. Észak-Amerikában 2002 óta 2009-ben volt az ár a legalacsonyabb, bár a recesszió miatt a fogyasztás 2%-kal esett. Az USA piacán a hazai gázkitermelést és az LNG (Liquefied Natural Gas) helyzetét újraértékeli. Az utóbbi években a magas gázár miatt a nem konvencionális gázforrások területén (gázpala, tömör homok, metándús szénbányák (Coal-Bed-Methan, CBM)) intenzív kutatások folytak. A korábbi felmérésekhez képest több gáz áll rendelkezésre. A nem konvencionális gázok jelenleg gazdaságtalanok, bár a gázpala szerepet játszhat a jövőben.

A geológusok szerint világszerte 142 medencében 688 agyagpalamező van. Kevés még a termelőkapacitás, a legtöbb Észak-Amerikában található. Az agyagpalagáz potenciális mennyisége óriási. Ez lényegesen változtatná a gázpiacot beleértve az LNG-termelést is. Az agyagpalagáz-kitermelés infrastruktúrája meglehetősen költséges. Jelenleg a 142 medencében 32 működő infrastruktúra létezik. A feltételezések mellett reálisan, mennyiségileg nehéz a forrásokat ismertetni. A legmegbízhatóbb tanulmányok szerint (IGU 2003, VNIIGAS 2007, USGS 2008, BGR 2009) a teljes palagázforrás 456 Tm^3 (16 110 Tcf) összevetve a konvencionális gázforrással, ami 187 Tm^3.



2.20. ábra. Gázvezeték mentén lévő tisztítóállomás

A palagáz esetén mint potenciálisan jelentős energiaforrásnál a következőket kell figyelembe venni:

A jelenlegi források leginkább Oroszország európai részén és Délkelet-Ázsiában találhatók. Az orosz konvencionális gáz és palagáz nagy részét Európa és a fejlődő Délkelet-Ázsia fogyasztja el. A palagáz az USA-ban a földgáz árát viszonylag alacsonyan tartja. Vizes technológiájú kinyerésekor a termelési költségek növekednek, hatása pedig jelentős a CO_2-kibocsátás szempontjából. Több palagáz esetén visszaszorulnak a tisztaszén-technológiák és a szén-dioxid-leválasztó eljárások (Pápay 2011).

Az LNG tulajdonságai és gyártása

Az LNG-állomásokat a feladatuk szempontjából különböző csoportokba sorolják:

- import terminál (import terminal) – a tengeren érkező LNG fogadására és tárolására alkalmas;
- export terminál (export terminal) – tárolására és tartályhajók megtöltésére alkalmas berendezésekkel rendelkezik;
- cseppfolyósítás (liquefaction) – a földgáznak (–162 °C, –260 °F) való lehűtésével folyékony állapotba (LNG) hozó folyamata;
- cseppfolyosító üzem (liquefaction plant) – a földgáz cseppfolyósításhoz (LNG) szükséges berendezésekkel rendelkező üzem;
- cseppfolyós földgáz (LNG – Liquefied natural gas) – hűtés által cseppfolyós állapotba hozott földgáz;
- csúcscsökkentő üzem (peak-shaving facilities) – az alacsony földgázigény periódusban az LNG tárolására alkalmas üzem, amely a magas fogyasztás időszakában, a csúcsterhelés mértékének csökkenését biztosítja;
- visszagázosítás (regasification) – Az LNG-t melegítéssel ismét gázállapotba hozza.

Az LNG a közel- és középjövőben a földgáz árának növekedésével nyer teret, esetleg az árak csökkenését segíti elő. Hosszú távon növekedhet a jelentősége, a palagáz kinyeréséhez szükséges infrastruktúra kölségeinek csökkenésével. A legnagyobb LNG-szállítók azok az országok, amelyeknek jelentős gázvagyonuk is van. Ilyenek: Algéria, Ausztrália, Brunei, Indonézia, Malajzia, Líbia, Nigéria, Oman, Katar, Trinidad és Tobago.

Az LNG-szerződésekben az árat jelenleg három fontos szempont határozza meg. Az olajszerződések alapján indexelt árat alkalmaz Japán, Korea, Tajvan és Kína. Olaj, olajtermékek és egyéb energiák által indexelt árat alkalmaznak elsősorban a kontinentális Európában. Az USA és Nagy-Britannia a piac általi beárazást alkalmazza.

Az árindexelés képlete:

$$CP = BP + \beta X$$

ahol

BP: állandó vagy árbázison meghatározott érték

β: gradiens

X: indexelés.

A képlet különösen Ázsiában használatos. Az olajárak változásával az LNG ára is változik.

2.21. ábra. LNG-tartályhordozó, 56 000 literes űrtartalmú széria, szállítja Naturgass Vest, Norvégia

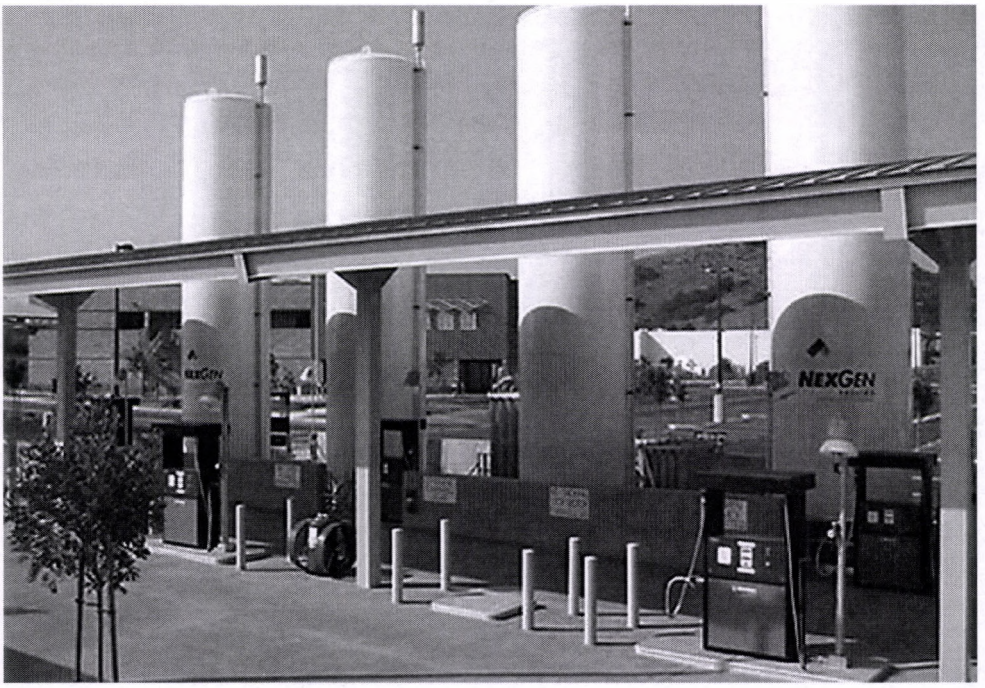
Az LNG-üzemanyag-hálózat ellátására különleges szigetelésű szállítóeszközöket és tárolókat alkalmaznak. Az LNG-t használó járművek biztosítják az elpárologtatást, úgyhogy a hűtési rendszerbe is bekapcsolják. Az USA-ban 5000 LNG-jármű van üzemben, Európában 250 (Nagy-Britannia, Spanyolország).

Nagyon fontos, hogy az egyéb szénhidrogének „éghetőségi" határértékei (flammability limit „LFL"), – például a benziné 1,4% – alacsonyabbak, a földgáznál, illetve az LNG-gőznél, a propáné 2,1%, a földgázé 5%. Az ólommentes benzin gyulladási hőmérséklete kb. 260 °C (500 °F), a gázturbina-üzemanyagé kissé nagyobb, mint 204 °C (400 °F). A propán és bután keverék a keverési aránytól függően 482–593 °C (900–1100 °F), míg a földgázé 593–650 °C (1100–1200 °F).

A szabadba kiömlő LNG elpárolgásakor a levegővel keveredve különböző koncentrációjú zónák keletkezhetnek. Egyes helyeken elérve a gyulladási határértéket meggyulladhatnak. Ez még nem jelent feltétlen robbanást is, csak égést, de robbanás is létrejöhet. A szabadban a metán égési sebessége kicsi (~4m/h).

A biztonsági előírások egyre szigorodnak az LNG mind nagyobb előtérbe kerülésével. 1965–2008 között kb. 25 baleset volt az LNG-gyártás, -tárolás és -szállítás során.

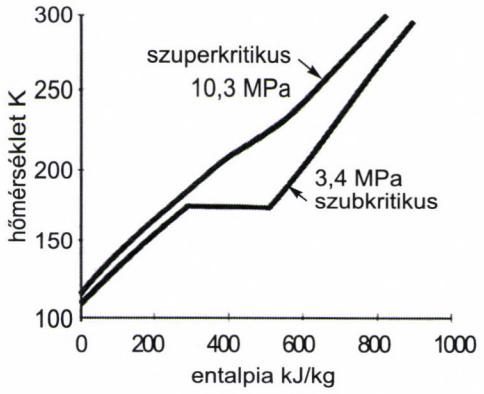
Az LNG-gyártásnál először eltávolítják a (C_{5+}) nehéz szénhidrogéneket (kondenzálás). Ekkor lehűtik a földgázt a kriogén hőmérsékletre (–40 °C és –60 °C között) és ekkor a C_1–C_4 marad gázfázisban, a C_5 folyadékként kicsapódik. Néha a hűtési hőmérsékletet egészen –70 °C és –90 °C közé csökkentik, amikor a C_{3+} is leválasztható, amit propiléngyártásra használnak (propánfeltárás). Ezután –90 °C és –110 °C-ra hűtve a C_{2+} leválasztható etilént nyerve (etilénfeltárás). Az LNG-gyártáshoz végül a C_{2+} is eltávolításra kerül a földgázból. Ezután –160 °C-ra lehűtve a földgázt és leválasztva az N_2-t, az LNG a tárolóba kerül.



2.22. ábra. A világ legnagyobb LNG/LCNG állomása. Kaliforniában a Chart-NexGen építette. A tárolási kapacitás 4 × 60 000 liter, 6 LNG-adagoló és 3 LCNG-adagoló

Tulajdonság	Érték
Jele	LNG
Olvadáspont	54,36 K
Forráspont	111,6 K
Párolgási hő (101 325 kPa)	212,9 kJ/kg
Fajhő (101325 kPa, 0°C)	1,70 kJ/kg
Viszkozitás	188,0 kg/ms x 10^6
Hővezetési tényező (k)	151,4 mW/mK
Kritikus hőmérséklet	154,576 K
Kritikus nyomás	5,04 MPa
Hármaspont	54,35 K – 151 MPa
Folyékonyan a sűrűség (101325 kPa és 0°C)	442,6 kg/m^3
Állapota szobahőmérsékleten (20 °C)	gáz
Az LNK visszagázosítása –162 °C-ról +10 °C-ra	510–577 kJ/kg

A földgázt a kriogén hőmérséklet-tartományba három folyamattal lehet lehűteni:
- mechanikai hűtéssel,
- Joule–Thompson- (JT) hatás nyomáscsökkentéssel,
- gázexpanzió-turbinával.



2.23. ábra. A metán fázisdiagramja

Mechanikai hűtés. – A mechanikai hűtési körben propánt, etánt, metánt, nitrogént stb. alkalmaznak. Ezek a gázok a földgázban általában megtalálhatók. A tiszta komponensnek egy adott nyomáson a párolgási hője állandó. A rendszer hatékonysága alacsony, a beruházási költségek magasak (capex: Capital Expenditure)

Joule–Thompson- (JT) hatás nyomáscsökkentés. – Ha egy folyadékot egy szelepen nagy nyomáscsökkentéssel áramoltatunk keresztül izentrópikus folyamatban (minimális környezeti veszteség, állandó entalpia), az alacsonyabb nyomáson a hőmérséklete lecsökken. Ezt Joule–Thompson-folyamatnak nevezik, a szelepet JT-szelepnek.

Gázexpanzió-turbina. – Ha a nagynyomású gázt egy turbinában (centrifugális vagy axiális) expandáltatjuk, meghajtva egy másik berendezést, a gáz izentrópikus (entrópia állandó) folyamat mellett nagymértékben lehűl.

Bioszénhidrogének

Az utóbbi években gyorsan nő az alternatív motorüzemanyagok jelentősége (etanol, metanol, biodízel) (Gyulai 2006).

Metanol. – Biomasszából a metanol gyártása nem újkeletű. Korábban a falepárlás melléktermé ke volt. 1923-ban a BASF gázból katalitikus szintézissel kezdte a metanolgyártást. Jelenleg is a földgáz a metanolgyártás legfontosabb alapanyaga (de néhány szén- és nehézolaj-frakció is alkalmas). Biomassza alkalmazása is lehetséges.

A biomasszából történő gyártás fő elemei:
- gázosítással szintézisgáz előállítása,
- gázdúsítás (gáztisztítás, CO-beállítás és CO_2-leválasztás); a metanolszintézis igényei szerint,
- metanolszintézis és -tisztítás, a szintézisgázból metanolgyártás.

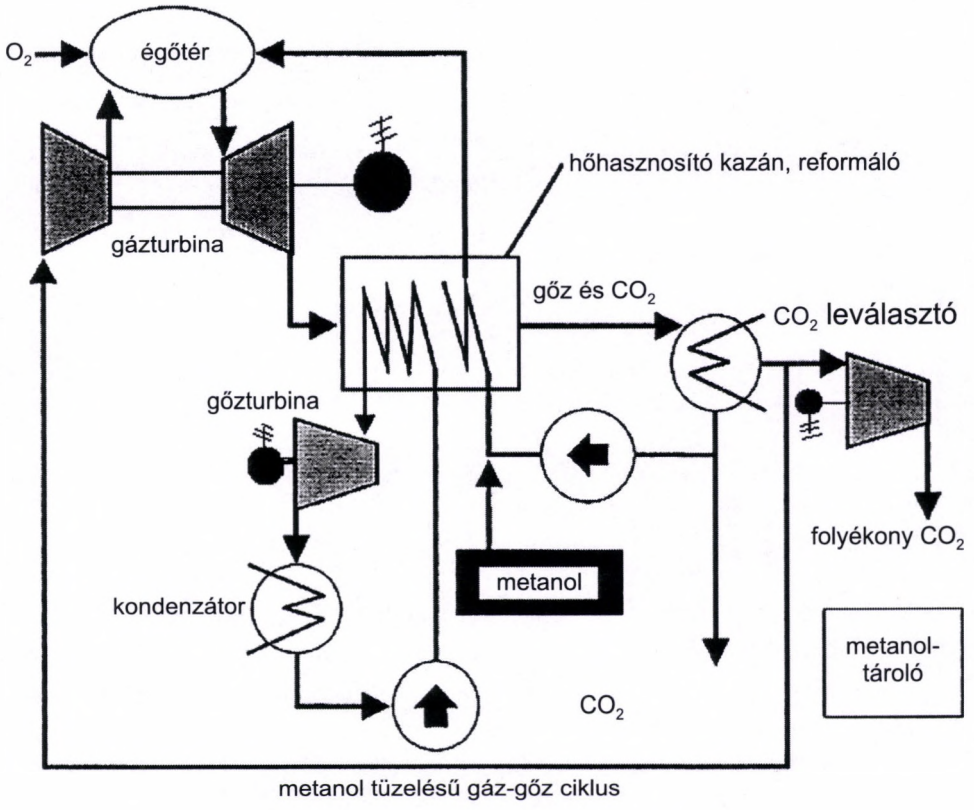
A metanolszintézissel való metanolgyártáshoz van már tapasztalat, akár földgáz, akár szén az alapanyag. Biomasszából történő gyártáshoz nitrogénmentes szintézisgázt kell biztosítani. A metanol színtelen, mérgező folyadék, forráspontja 64 °C,

fűtőértéke 19,8 MJ/kg, párolgáshője 1100 kJ/kg, H/C=4, O/C=1, CO_2-potenciálja 69,9 kgCO_2/GJ.

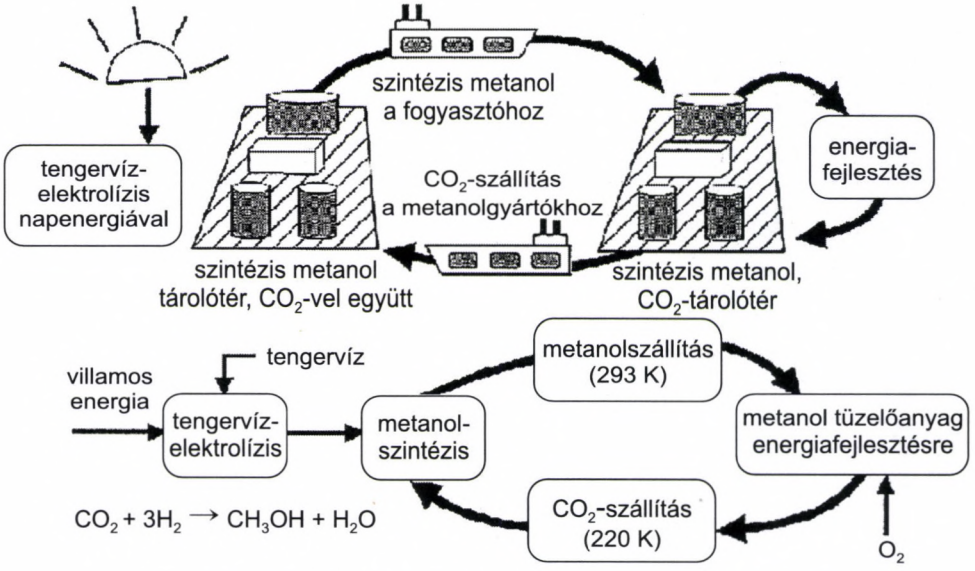
A metanol (CH_4O; CH_3-OH) a benzinnél nagyobb oktánszámú, nagyobb kompressziótűrésű, és ezért nagyobb hatásfokú és teljesítményű a vele üzemeltetett motor. A benzinhez képest kisebb a CO-, CO_2-, HC- és NO_x-kibocsátás. A fűtőértéke azonban fele a benzinének, és égési melléktermékként formaldehid is keletkezik.

A metanolszintézis-üzem tipikus elemei: nagynyomású, oxigénbefúvásos gázosító; a szilárd és kondenzálódó szennyezéseket teljes mértékben leválasztó berendezés; a berendezések működését széles tartományban szabályozó berendezés; a metanolszintézishez szükséges gázösszetételt (2:1; H_2:CO) beállító reaktor; és a metanolátalakulási szintézis végső lépését biztosító nagynyomású katalizátoros reaktor.

A metanolszintézisnél alkalmazott elgázosító lényegesen különbözik a gázturbinák számára tüzelőanyagot gyártó gázreaktortól. A gáztisztítási előírások lényegesen szigorúbbak a metanolszintézisnél, ezért sokkal magasabbak a költségek. Fontos feladat a magas hőmérsékletű gáztisztító berendezés hatékonyságának növelése.



2.24. ábra. Gázturbina – metanol – gőzkazán – gőzturbina



2.25. ábra. Elektrolízis napenergiával – metanolgyártás – energiafejlesztés

Etanol. – Az etanolgyártás gyorsan fejlődik. A fő fejlesztési irány a cellulóz és hemicellulóz fermentációjához kapcsolódik. Korábban csak tiszta cukrokat és keményítőt lehetett fermentálni. A fejlesztés tehát a biomasszák közül a fa és fű fermentációjára irányult, a lehetőségek kiszélesítése és a költségek csökkentése céljából.

Az etanol gyártási folyamata:
- a biomassza-alapanyag előkészítése,
- hidrolízissel a biomasszának szabad cukorrá való átalakítása,
- a cukrok fermentációjával etanolgyártás,
- a víz-etanol keverék desztillációja.

A biomasszából való etanolgyártás biológiai folyamatokon alapszik. Mikroorganizmusok energia- és széntartalma használódik fel a saját átalakulásukhoz. A cellulóz fermentációját már kikísérletezték, a hemicellulózé még csak kutatási állapotban van.

Az etanol (C_2H_6O; $CH_3–CH_2–OH$) fűtőértéke 26,8 MJ/kg, H/C=3, O/C=0,5; CO_2-potenciálja 71,8 kg CO_2/GJ. A „megújuló" tüzelőanyagok közé sorolható, a fűtőértéke alacsonyabb a benzinénél. Az etanol a benzinnél kompresszióstűrőbb, de benzinnel keverve korróziót okoz. Etanolos üzem esetén a motor a benzinhez képest kevesebb mérgező légszennyezőt és ózont bocsát ki.

Az USA-ban a 2001-ben gyártott mennyiség 8,8 milliárd literről 2003-ra 11,2 milliárd literre emelkedett. Néhány ország termelését mutatja a 2.10. táblázat.

2.10. táblázat. Néhány fontosabb, etanolt gyártó ország termelési mutatója

Ország	Termelés (2001) 10^6 liter/év
Ausztrália	150
Brazília (2002)	12 600
Kanada	240
Kína	3 000
EU-15	2 000
India	1 800
Mexikó	70
Thaiföld	150
USA (2003)	11 200

Biodízel. – A biodízel-termelés az utóbbi években jelentősen emelkedett az EU-ban. A bekeverési arány 20% (B20), ami majdnem minden dízelmotorban használható. A motornál nem szükséges átalakítás, de néha növekszik a kenőanyag-felhasználás. Nagyobb bekeverési arányt is el lehet érni modern motoroknál, bár még nincs minden probléma megoldva. Az EU vezet a biodízelgyártásban, jelenleg a beépített kapacitás 2300 millió liter/év. A dízelpiac 1%-át jelenti a biodízel. Számos növény alkalmas biodízelgyártásra. Az USA leginkább a szójából termelést támogatja, és fejlesztés folyik mustármagból alacsony költségű biodízel gyártására

Bio-tüzelőanyagok keveréke. – A flexibilisüzemanyag-működésű járművek (flexible-fuel vehicle, FFVs) a bioetanol és a benzin különböző részarányú keverékét tudják használni, egészen 100%-ig (E100). Kb. 70 millió FFVs fut ma az USA-ban 85% bioetanolt (E85) használva. Biodízelt keverni lehet hivatalosan tetszőleges arányban. A B20-as 20% biodízelt tartalmaz, van 80%-os petróleumdízel és B100, 100%-os.

A bioüzemanyagok kisebb motorátalakítást igényelnek, nem mindegyik gyártmánynál lehet végrehajtani. A biodízel energiatartalma 8%-kal kisebb, mint a petróleumdízelé. Hideg időben a biodízel előnyös. A statisztika szerint 2007-ben a bioüzemanyag-termelés 34 Mtoe értéket ért el, ami az utakon történt teljes üzemanyag-felhasználás 1,5%-a.

A termőföld kb. 1%-át használják bioüzemanyag-termelésre, amit esetleg 2,5%-ra terveznek. Jelenleg a teljes bioüzemanyag-termelés 80%-a Brazíliára és az USA-ra esik, főleg bioetanol formában. Az előrejelzések szerint a következő évtizedben a bioüzemanyag-felhasználás a közlekedésben a 2004. évihez viszonyítva 55%-kal növekedik.

Bio-tüzelőanyagok keverékeit a flexibilisüzemanyag-működésű járművek, a bioetanol és a benzin különböző részarányú keverékét tudják használni, egészen 100%-ig (E100).

Biogáz. – A szerves anyagoknak oxigénmentes (anaerob) körülmények közötti bomlásakor, illetve a biomassza zárt térben történő elgázosításakor (erjesztés, rothasztás) baktériumok segítségével fejlődő gáz a biogáz. A növényi anyagok alkotóiból (cellulóz, hemicellulóz stb.) alakul ki. A kémiai összetétele a sokféle anyag összetételének megfelelően igen változó.

A fermentációs folyamathoz a mikroorganizmusoknak megfelelő körülmények, jól aprított anyag és közel semleges (pH = 7–7,5) környezet szükséges. A bomlási folyamat kezdőhőmérséklete 30–35 °C, és a folyamat exoterm lévén a hőmérséklet emelkedik 50–60 °C-ra is. 1 kg szerves anyagból 0,25–0,6 m^3, 20–30 MJ/m^3, főleg metánból (50–65%) és széndioxidból (25–40%) álló biogáz keletkezik. A biogázban található még 0,3% nitrogén, 1–6% hidrogén, 0,1% szénmonoxid, 0,2% kénhidrogén stb. is. A fűtőérték a metán szén-dioxid arány növelésével növelhető lenne, de ehhez a szén-dioxid redukálását metánná biológiai úton fokozni kellene. Néhány anyagra tájékoztató értékeket mutat a 2.11. táblázat.

2.11. táblázat. Biogázgyártásra alkalmas mezőgazdasági szerves anyagok

Szerves anyag	Biogáz mennyisége m^3/t
Marhatrágya	90–310
Sertéstrágya	340–550
Baromfitrágya	310–620
Istállótrágya	175–280
Kukoricaszár	380–460

Az anaerob, baktériumos, gázfejlődéssel járó erjedés időtartama hőmérsékletfüggő, 30–40 °C-on 15–24 nap, 50–60 °C-on rövidebb, de nagy rendszerekben 50–60 nap is lehet. A szervesanyag-tárolók és erjesztőkamrák leggyakrabban betonból készülnek, a tárolás végleges megoldás, de ideiglenesen, kisebb házi rendszereknél fóliazsák is lehet. A biogáz 6–12% levegővel keveredve robbanásveszélyes és gyúlékony. A mérgező és korróziót okozó kén-hidrogént el kell távolítani (például kevés levegő áramoltatásával oxidálni). A tisztított biogázt jelenleg leginkább villamosenergia-fejlesztésre és fűtésre használják.

A biogáztermelésre létesített berendezés elsősorban a biomassza jellegétől, a hasznosítás minőségi és mennyiségi igényeitől függ. Kisebb és közepes mennyiségek esetén depóniákat és kútrendszereket alkalmaznak. Nagyobb mennyiségű biogázigény esetén elgázosító berendezéseket építenek. Modern elgázosítók épülnek fixréteges és fluidizációs (buborékos és cirkulációs) berendezésként is. A biogáz gázturbinával, kombinált ciklusú folyamatként kedvező energetikai jellemzőkkel rendelkezik.

A lőpor nagy gázfejlődéssel égő robbanóanyag. Égése heves, hirtelen igen nagy mennyiségű gáz (égéstermék) keletkezik. A gáz nagy nyomást gyakorol a kiterjedését gátló falakra, mint például a puska vagy ágyú csövére, vagy pl. a csövet elzáró lövedékre.

A robbanószer olyan anyag, illetve anyagkeverék, mely igen nagy mennyiségű kémiai energiát tárol, és égése során nagyon rövid idő alatt nagy energia leadására képes (robbanás).

Robbanóanyagok és -tárgyak (piktogram)

Robbanóanyag-bárca: figyelmeztető szállításkor. Elhelyezendő jelzés csomagoláson és szállítóeszközön.

2.26. ábra. Robbanást és tűzveszélyt jelentő piktogramok

A robbanószerek közös ismérve, hogy az égést tápláló anyag mellett az égéshez szükséges oxigént is tartalmazzák. A robbanókeverékek külön tartalmazzák az éghető anyagot és az oxidálószert, valamint az égést befolyásoló egyéb anyagokat. A robbanóanyagok esetén az oxigén a homogén vegyületben kötött formában van jelen. A robbanószer oxigéntartalmát az ún. „oxigénhányados" fejezi ki. Ha ez 1, akkor pont annyi oxigén van a vegyületben, mint amennyi szükséges. Vannak 1 fölöttiek is (pl. a nitroglicerin) Ezeket általában más, 1-nél kisebb, tehát „oxigénhiányos" robbanószerekkel keverve használják úgy, hogy a kapott keverék oxigénhányadosa körülbelül 1 legyen (pl. nitrocellulózzal kocsonyásított nitroglicerin).

Szerves és szervetlen lőport különböztetünk meg. A szerves lőpor (más néven: füst nélküli lőpor) nitrocellulóz (NC) alapú, a szervetlen lőpor (más néven feketelőpor, régies nevén puskapor) szilárd anyagok keveréke. Alkotórészei: faszén, salétrom és kén. A kén biztosítja a szén gyors elégését, amelyhez a szükséges oxigént a salétrom szolgáltatja. A szén elégése által keletkezett szén-dioxid mintegy ezerszer

nagyobb térfogatú, mint amilyent a lőpor elfoglalt, és e térfogattá való kiterjedésével lövi ki nagy erővel a lövedéket a csőből. A feketelőpor névleges égési sebessége 400 m/s, míg a szerves lőporoké 800 m/s.

A feketelőpor elméleti optimális összetétele 73,9% kálium-nitrát (salétrom), 14,6% szén és 11,5% kén, de a rendeltetésétől függően a keverési arányok ettől eltérhetnek. A pirotechnikában használatos feketelőpor szabványos összetétele: 75% kálium-nitrát, 15% szén (elsősorban puha fából nyert), 10% kén. A feketelőpor különböző keverési arányainak megfelelően, 270–320 °C-nál gyullad meg.

A feketelőport Kínában az alkimisták találták fel az örök életet adó elixír kutatásakor. Az alkimisták már az első századtól használták salétrom és kén keverékét különféle „gyógyszerekben", és egyes feltételezések szerint a kínaiak már 492-től ismerhették. Az első írásos feljegyzések a Kr. u. 800-as évek közepéről származnak. Franciaországban (Bordeaux-ban) már 1326-ban gyártották. Németországban (Augsburgban) 1340-ben állították fel az első lőporgyárat.

A feketelőport a világon először hazánkban használták a bányászatban „jövesztésre", Weindl Gáspár, Tirolból származó magyar bányamester révén 1627. február 8-án a selmecbányai Felsőbiber aknában. Módszerét később egész Európában átvették.

A napóleoni háborúk idején gondot jelentett a feketelőpor nagy füstje. A nitrocellulóz alapú lőgyapot 1846-os feltalálása fordulópont volt. Utána 1884-ben sikerült először a lőgyapotnál biztonságosabb anyagot találni, amit füst nélküli lőporként 1886-ban mutattak be. A feketelőpor jelenleg a pirotechnikai ipar egyik legfontosabb alapanyaga.

A robbanás fizikai lefolyása alapján két fő csoport létezik: a tolóhatású és a heves robbanószerek.

A tolóhatású robbanószereknek kisebb a hatóerejük, égésük során nagy mennyiségű gáz keletkezik. Jellemzően oxidálószer és tüzelőanyag keverékei, égési sebességük kisebb mint 1000 m/s. Gyúlékonyak, normál körülmények között nagyon lassan is éghetnek (a feketelőpor 1cm/s) lefojtva képesek robbanásra. Ebbe a csoportba tartozik a feketelőpor, nitrocellulóz, füst nélküli lőpor.

A heves robbanószerek nagyobb hatóerejűek, jellemzően robbanó vegyületek, égési sebességük nagyobb mint 1000m/s. Hatásukat rövid idő alatt fejtik ki, energiájuk kisebb, mint a tolóhatású robbanószereké, de igen koncentrált. Idetartozik a TNT, nitroglicerin, nitropenta (PETN).

A ma használatos robbanóanyagok általában kezelésbiztosak, azaz ütésre, súrlódásra nem robbannak. Többségük, ha nyílt lánggal meggyújtják, egyszerűen robbanás nélkül elég. Robbanást iniciáló robbanóanyagokkal lehet elindítani. Az iniciáló robbanóanyagok ütésre, lángra robbannak. Ezekből ún. „gyutacs"-ot készítenek. Legalulra „brizáns" robbanóanyagot helyeznek, e fölé kerül az iniciáló robbanóanyag, erre pedig egy kevés, nagy hőfokon, oxigén nélkül elégő anyag kerül (pl. valamilyen perklorátkeverék, feketelőpor). Az iniciáló, robbanást kiváltó anyagok a robbantószerek.

A robbanás során a hang- és fényjelenségek mellett nagy hőmérséklet- és nyomáskülönbségek alakulnak ki.

3. Globális levegőparaméterek meghatározása

3.1. A „globális" definíció problémái (levegő-összetétel, hőmérséklet stb.)

A Föld a beeső napsugárzástól függően dinamikus, de termikus egyensúlyban van. A klímakutató-állomások, különösen az utóbbi időben, számos korszerű eszközzel gyarapodtak. Vonatkozik ez a Föld hőmérsékletmérésére alkalmas műszerekre is. Vannak mérőközeggel, sugárzási elven, hővezetési elven stb. működő hőmérsékletmérők. A mért értékek azonban a megismerni kívánt változások mértékét tekintve, mondhatjuk, gyakran lényegesen eltérnek egymástól. Több tized fok a különbség például a ballonos vagy az űrszondás mérések között, nem is beszélve az ugyanazon elven mérő kutatóállomások adatairól. Ha figyelembe vesszük, hogy a vitatott iparosítási időszak kb. százötven éve alatt a változás (Intergovernmental Panel of Climate Change szerint, IPCC WG-I, 2007, 237.) 0,74 °C±0,18 °C volt, néhány tized fok is jelentős. A hőmérséklet mint paraméter és mint mérési feladat elsőrendűen fontos. Lényeges, mert a Föld egyik „globális" jellemzőjéről beszélünk. Ahhoz, hogy ténylegesen az is legyen, a jellemzendő „tárgy" minden szükséges paraméterét és a mérés módját világosan és helyesen kell megadni.

A 3.1. táblázatban található néhány kutatóállomásnak a földfelszín és az alsó troposzféra hőmérséklet-változására vonatkozó mérési eredménye. Bár az eltérések egy-egy oszlop adatain belül néhány századot jelentenek, de ez egy évszázadra nézve (tízszeres) – egyenletes melegedést feltételezve – eléri a teljes várható hőmérséklet-változás értékét. Ez azonban azt is igazolja, hogy a modellek közötti nagy eltérések kétségbe vonják azok megbízhatóságát, mert a legszínvonalasabb kutatóintézetek (IPCC) prognózisai az azonos energetikai szcenáriók mellett az évszázad végére 2,1 és 4,9 °C felmelegedést jósolnak. Lehetséges az is, hogy a modelleket saját érvényességi területükön kívül egyesek indokolatlanul használják.

Az adott időtartamhoz tartozó átlag az illesztett egyenes meredekségét, a „tól–ig" határok pedig az ezt az értéket 90%-os valószínűséggel tartalmazó (tehát abból

mindkét irányban csak 5-5% eséllyel kilógó) ún. megbízhatósági (konfidencia-) intervallumot jelzik. Meg kell jegyezni, hogy egyes esetekben nem ugyanazon a tengerszint feletti magasságon megfigyelt hőmérsékletek trendjeiről van szó. Ez azért lényeges, mert a légkör alsó kb. tíz kilométerén belül minél magasabbra megyünk, annál kisebb mértékű a változás a mérések és a modellek tanúsága szerint. A különbségek egy része tehát nem a megfigyelések bizonytalanságában, hanem a mérések tárgyának különbségeiben rejlik. (Vö. IPCC WG-I, 2007, 241–253. és 265–277. oldalain foglaltakkal.)

3.1. táblázat. Különböző mérési eredmények összehasonlítása

	1958–2004 között	1979–2004 között
Földfelszín		
NOAA (időjárás-állomás/óceán)	0,11±0,02 °C	0,16±0,04 °C
NASA (időjárás-állomás/óceán)	0,11±0,02 °C	0,16±0,04 °C
HadCRUT2v (időjárás-állomás/hajók)	0,13±0,02 °C	0,17±0,04 °C
RATPAC (rádiószonda)	0,11±0,02 °C	0,17±0,05 °C
HadAT2 (rádiószonda)	0,11±0,03 °C	0,18±0,05 °C
NCEP50 (újraelemzés*)	0,12±0,03 °C	0,12±0,07 °C
ERA40 (újraelemzés*)	0,11±0,03 °C	0,11±0,06 °C
Alsó troposzféra		
RATPAC (rádiószonda)	0,07±0,03 °C	0,02±0,07 °C
HadAT2 (rádiószonda)	0,08±0,04 °C	0,03±0,08 °C
UAH (űrszonda)		0,04±0,08 °C
RSS (űrszonda)		0,13±0,08 °C
UMd (űrszonda)		0,20±0,07 °C
NCEP50 (újraelemzés*)	0,13±0,06 °C	-0,04±0,10 °C
ERA40 (újraelemzés*)	0,10±0,04 °C (1958–2001)	0,07±0,10 °C

*Az újraelemzés (reanalízis) a térben szabálytalanul elhelyezkedő megfigyelések olyan interpolációja, amely nem valamilyen geometriai vagy statisztikai összefüggést használ fel ahhoz, hogy megadja a légköri állapotjelzők értékeit a szabályos rácshálózat pontjaiban, hanem azokat a rájuk érvényes megmaradási egyenleteket megoldó, operatív időjárási modell utólagos lefuttatása származtatja (Gray 2006).

Sajnos a bonyolult éghajlati modellek elég nagyvonalúan határozzák meg az eredményeket, és saját függvényeik szerint kiszámolják a többfokos változásokat, azután konszenzussal állapodnak meg valamilyen középértékben, bár a 2007-es IPCC-jelentés már próbál javítani a korábban kifogásolható átlagoláson. Az állítások megadják a modelleredmények teljes szórásának határait vagy pedig valami-

lyen megbízhatósági intervallumát (például IPCC WG-I, 2007, 749). A konszenzus nem nevezhető tudományosnak. A hő- és hőmérsékleti folyamatok tisztázásával, egyszerű, vitathatatlan, fizikai törvényekkel végzett számításokkal megbízhatóbb globális értékeket lehet kapni.

Légkör nélküli Földet elképzelve a felszínről visszaáramló összes sugárzás megegyezne a beeső napsugárzásnak a légkör külső határán jelenleg is a világűrbe távozó értékével. A napsugárzás ~30%-a földfelületről visszaverődik, ~70%-a abszorbeálódik (elnyelődik), melegíti a felületet, és emittálódik (kisugározódik). A besugárzás és a visszavert sugárzás fizikai tartományai különbözőek, színképeik eltérnek egymástól. Az energetikai számítások szempontjából ennek a különbségnek nincs jelentősége, mert itt csupán a folyamat energetikai oldalát vesszük figyelembe. Az összes hullámhosszt integráló sugárzásmérő az összes sugárzást (azaz a felszín saját sugárzását és napsugárzás visszaverődését) érzékelné, és kb. 278,6 K-t mutatna. (Ezen azt értjük, hogy ilyen hőmérsékletű abszolút fekete test sugározna ki ugyanennyi energiát). Ekkor a Föld belsejének hőárama sem lenne elhanyagolható a glóbusz napsütötte és árnyékos oldalainak felmelegedése miatt.

A részsugárzást mérők használhatók az emberi szem által látott sugárzástartományban vagy mérhetnek a hosszúhullámú hősugárzás alapján hőmérsékletet. A mért értékek különböző kérdésekre adnak választ. Az összes sugárzás az energiaáramlási viszonyokra, a részsugárzás (annak hullámhosszától függően) a Föld láthatóságára, illetve magának a földfelületnek a hőmérsékletére ad adatokat.

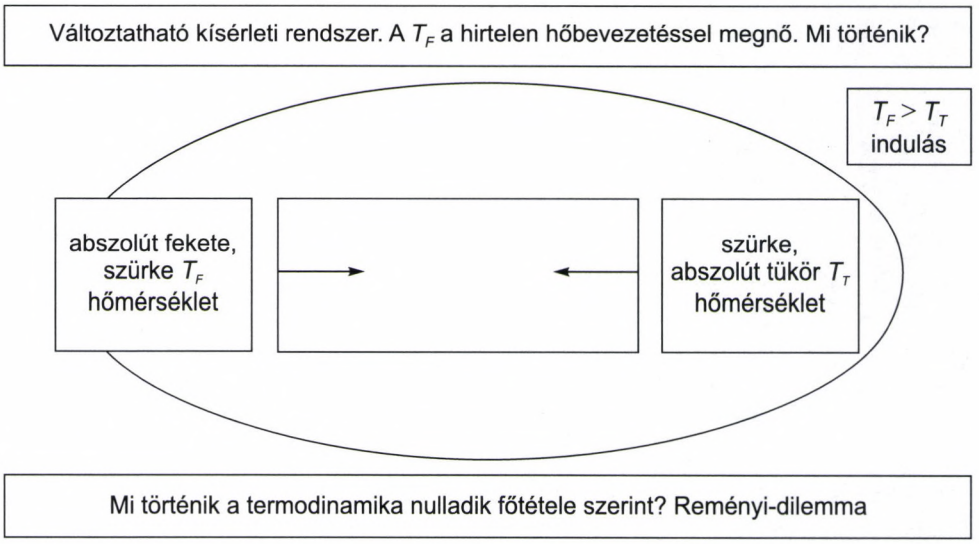
Ha a légkör jelen lenne ugyan, de nem nyelné el a sugárzás egy részét, akkor a teljes napsugárzás elérné a földfelületet, amely ~30%-ot visszaverne, ~70%-ot pedig abszorbeálna, és szintén emittálná az űrbe, légköri abszorpció nélkül. A sugárzási elven mérő műszerek gyakorlatilag a légkör nélküli Földnél mértekhez hasonló értékeket mutatnának. A légkört a földfelülettel a hővezetéses és a konvektív hőcsere melegítené fel. Fontos a földi hőáram szerepe és a légkör hőterjedési tulajdonsága (hővezetés, áramlások stb.).

A feketetest-sugárzás olyan képzeletbeli testnek – az abszolút fekete testnek – a sugárzása, amely az elektromágneses sugárzás minden hullámhosszán képes elnyelni vagy kibocsátani. A szürke test felületi sugárzási intenzitásának megoszlása olyan jellegű, mint a fekete test sugárzása, az azonos hullámhosszon és hőmérsékleten kisugárzott energiamennyiség azonban arányosan kisebb.

A sugárzással létrejövő energiaáramlási folyamat alakulásáról eszmefuttatást végezve, a hőmérséklet értelmezéséhez különböző esetek adódnak.

Az irodalomban található számtalan, de különböző módszerrel mért eredménynél nagyon fontos lenne a körülmények pontos megadása a következtetések levonásához és az összehasonlításokhoz.

Az egy fekete, egy szürke és egy tökéletesen tükröző test között létrejövő sugárzási viszonyok több változatban történő átgondolására szolgál a szélső értékeket is bemutató, egyszerű 3.1. ábra.



3.1. ábra. Sugárzási változatok

A két test esetén a különböző vizsgált változatoknál változnak a hőmérsékletek, az abszorpciós és emissziós tényezők. Az egyéb geometriai és fizikai jellemzők megegyeznek.

1. számú folyamat: A T_F és T_T hőmérsékletek egyenlők. A T_F hőmérséklet hőbevezetéssel megemelkedik. Az 1. felületről megindul a hősugárzás a 2. felület felé az 1. felület emissziós tényezőjének megfelelően, ha nincsen hőutánpótlás, az 1. felület hőmérséklete csökkenni kezd. A 2. felület abszorbeálja (és visszaveri) az oda érkező sugárzást. Szürke testnél elkezd a hőmérséklete növekedni, és a pillanatnyi hőmérsékletének, továbbá az emissziós tényezőjének megfelelően visszasugároz az 1. felület felé. A folyamat végén a két hőmérséklet megegyezik egymással (definiálni kell, milyen hőmérséklet), az egyensúlyi érték az emissziós tényezőktől és a hőmérséklet-különbségtől függ.

A redukált abszorpciós és emissziós tényező két különböző feketeségi fokú felületre:

$$\varepsilon_n = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}.$$

A sugárzásos hőcserében az 1. felület által a 2. felületnek átadott mennyiség (amelyből az 1. lehűlése és a 2. felmelegedése számítható):

$$q_{12} = \varepsilon_n \sigma \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \frac{\text{kJ}}{\text{m}^2\text{h}}.$$

Egyik szélső eset, amikor az egyik felület, a T_F tökéletesen fekete, a másik a T_T tökéletesen tükröző. Ekkor a T_T felület hőmérséklete nem növekedhet, mert nincs sugárzáselnyelés. A felület közelében elhelyezett összessugárzás-mérő prométer (energetikus megnevezés) azonban a visszatükröződésnek megfelelő hőmérséklet-emelkedést mér. Következtetni pedig egyrészt azt lehet, hogy ebben az esetben ε_F =1 és ε_T=0, azaz ε_n=0, amit a szövegben kifejtettünk. Másrészt azt is kimondhatjuk, hogy abszolút fekete test és abszolút tükrözés nem létezik.

Átlaghőmérsékletek. – Jelentős szerepe van a napállandó értékének, amely az irodalomban szintén neuralgikus kérdés. Korszerű műholdas értékek szerint jelenleg „elfogadott" az 1366 Wm^{-2}. Más napállandóval, ami szintén gyakori irodalmi adat (S_n=1385 Wm^{-2}), a különbség 1,4%, ami 1 °C csökkenést okoz T_e-ben. Az 1366 Wm^{-2} értékkel és feketetest-feltételezéssel a légkör határára egyensúlyi hőmérsékletet számíthatunk. Egyértelmű, világos számítás, a teljes földfelületre vonatkoztatás miatt a 4-gyel osztott energiaáramból számított érték.

$$T_e = 100 \cdot \sqrt[4]{\frac{1366}{45,67}} = 278,6 \text{ K} = +5,6 \text{ °C}$$

A légkörön keresztül jutó, a Föld felületét elérő sugárzásból, a Földről visszaverődő (albedó) és a Föld sugárzását együtt (összes sugárzást) mérő prométer a földfelület fölött közvetlen energiaáram alapján az energiamérleg szempontjából értelmezhető hőmérsékletet mér. Ez megegyezik egy feketetest hőmérsékletével. A sugárzási elven mérő eljárásoknál a műszer érzékelőjét pontosan ismerni kell. A más elveken történő mérések összehasonlításakor különös figyelemmel kellene eljárni és publikálni (ami nagyon gyakran elmarad).

A teljes Föld átlaghőmérsékletét (dinamikus termikus egyensúly) tekintve, a légkör határán, az űrbe való összes visszasugárzás összegének meg kell egyeznie a napállandóval, és így az összes sugárzást mérő prométernek az egyensúlyi hőmérséklettel azonos értéket kell mérnie.

Ebben az esetben nem kell számolni a bolygó albedójával, amely érték („megegyezés") a fenti számításokkal megegyezően 30%.

A légkör hőmérsékletének szempontából (gyakran átlagnak vagy globálisnak nevezik) a világűrből és a Föld felületéről jövő, főképpen hosszúhullámú sugárzásokból, a légkör által abszorbeált energia a meghatározó (természetesen konvektív hőcsere, keveredés stb. is szerepet játszanak). A valós légkörben a tényleges hőmérséklet kialakulásához hozzájárul az alulról felfelé melegítő turbulens hőcsere és a felszínről párolgással távozó, hőjét csak a felhőkben hőmérséklet-emelkedésre váltó ún. latens hő. A légkör energiabevételét meghatározó sugárzási értékek (egy mérleg szerint) földi és éves átlagban (Wm^{-2}): rövidhullámú napsugárzás 67, hosszúhullámú kisugárzás 26, a kettő együtt 93. Más adatok szerint az érzékelhető

hő 24, a latens hő 78, utóbbi kettő együtt 102 Wm^{-2} (forrás: IPCC WG-I, 2007, 96., FAQ 1.1 Fig. 1.). Az abszorbeált energia a légkör emissziós (abszorpciós) tényezőjétől, azaz a légköri gázok koncentrációjától függ. Magának a levegőnek a hőmérséklete érintkező hőmérővel jól mérhető; valós érték, a klíma fontos jellemzője. Más elven, például valamely gázösszetevő (például oxigén) mikrohullámú sugárzásával is mérhető a levegő hőmérséklete, de az összehasonlításkor a közös nevezőre hozásnál különös gonddal kell eljárni.

Ha a légkör nélkülinek képzelt, de akár az albedót is figyelembe vett Föld felületét eléri a napállandónak megfelelő teljes sugárzás, azt tükrözéssel és szürke testként teljes egészében visszasugározza. Az összes sugárzást mérő pirométer a légkör határán mért egyensúlyi hőmérsékletnek megfelelő értéket méri. Ez a 255 K (–18 °C) a földfelület hőmérsékletére helyes átlagérték. A Föld közvetlen környezetének energetikai áramával kapcsolatban keveset mond. Az albedóval visszavert energia ugyanis nem tudja melegíteni a Földet, de energetikailag hasznosítható, például naperőművekben. Ezeken a helyeken, tehát az összessugárzás-mérő hőmérsékletnek van jelentősége. Például itt is közvetlenül kapcsolódik az energetika és a meteorológia.

Légkör nélküli Földről sem meteorológusok, sem éghajlatkutatók nem szoktak beszélni. A 255 K az ún. csillagászati hőmérséklet, ami ténylegesen valahol a légkör légnyomásközepe táján, azaz a légkör tömegét felező 500 hPa szinten (5-6 km magasságban) mérhető rádiószondákkal vagy műholdakról. Ezzel a hőmérséklettel sugározna ki az az abszolút fekete test, amely a nap sugarainak 70%-ával (1 mínusz albedószorosával) gazdálkodik. Az energiaáramlási viszonyok miatt bizonyos esetekben mégis célszerű az absztrakció. A légkör nélküli Földnek közvetlen a felszín alatti hőmérsékleténél nem lehet figyelmen kívül hagyni a Föld belsejéből a felszín felé tartó hőáramot. Ez viszonylag csekély, de létezik, és bár a felszín közeli hőmérséklet közel van a nullához, de pozitív érték (Európában kb. 80–100 cm mélyen 6–8 °C). Itt emlékeztetni kell arra az elterjedt vélekedésre, hogy a légkör nélküli Föld hőmérséklete az albedót figyelembe véve, de a légkörös Föld felületére érkező sugárzással számolva –18 °C (255 K) lenne. Ez nélkülöz minden a valós állapotot, de elméleti feltevésekben sokszor használják.

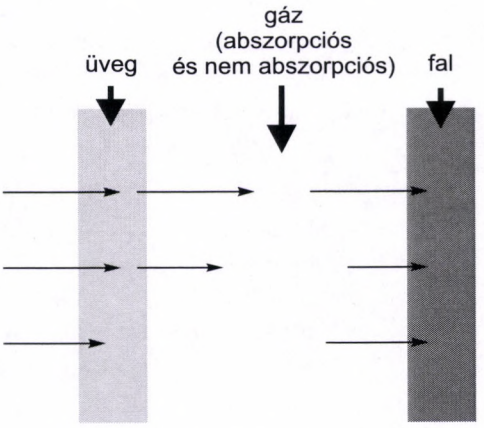
A Föld és a világűr közötti energiaáramlásnál a Föld fekete testként szerepel (tükrözés + szürkesugárzás = 1; R+E=1). Az energiabeáramlás azon 30%-a, amely nem képes melegíteni a bolygót, mert változatlan hullámhosszon visszaverődik, nem járulhat hozzá a bolygó melegítéséhez, de a bolygó energiamérlegének felírásakor számolni kell vele, és az ember energiafejlesztő berendezéseiben is hasznosítható.

A hőmérsékleteknél meg kell mondani, miről beszélünk. A legbiztosabban az energiaáramlásból összes sugárzással, a biztonságosan ismert fizikai, geológiai és biológiai paraméterekkel meghatározott globális hőmérséklet állapítható meg. Nagyon fontos a fizika, a geológia és a biológia paramétereinek ismeretében a valós légköri viszonyok megismerése és a legkorszerűbb eszközökkel való mérése, to-

vábbá az értékek és a változások elemzése. Ugyanilyen fontos azonban, hogy a következtetéseink és intézkedéseink során a korlátainkat figyelembe vegyük. Fontos, hogy az eredmények összehasonlításánál körültekintően járjunk el, és az általánosításoknál azonos alapelvek legyenek. A közléseknek az érdekelt szakterületek szintjén átláthatóknak kell lenniük, és ne hit alapján kelljen elfogadni azokat. A nagy különbségek esetén ne konszenzus döntsön, hanem a számítások összehasonlítása. Ha a nagy különbségek maradnak, akkor ki kell jelenteni: ilyen mértékű a bizonytalanság, és milyen döntéseket szabad vele hozni.

Az üvegház és a légkör. – A Föld és a légkör termikus energiakapcsolatára gyakran használt üvegházhatás, bár az érthetőséget megkönnyíti, ténylegesen azonban nem teljesen felel meg a valós helyzetnek. Néhány eszmefuttatással kíséreljük meg a viszonyok bemutatását.

1. eset. Az üveg nem abszorbeál, a gáz nem abszorbeál (CO_2 nélküli levegő), a fal abszorbeál. A napsugárzás teljes mennyisége áthalad az üvegen, a gázon, ezek nem melegszenek, a fal visszaver, abszorbeál, melegszik az abszorbeált hőtől. Vezetéssel és konvektív módon melegíti a gázt és az üveget. A fal a napsugárzástól és az albedótól függően magas hőmérsékletet ér el.



3.2. ábra. Az üvegházi sugárzások (merőlegesen beeső sugárzást feltételezve)

2. eset. Az üveg, a gáz és a fal is abszorbeál. A falhoz az üveg és a gáz abszorpciójával csökkentett sugárzás érkezik. A gázt a saját abszorpció, valamint az üveg és a fal sugárzásából abszorbeált energia melegíti, továbbá a fal és az üveg vezetéses és konvektív hőátadása. A fal hőmérséklete a beeső sugárzás csökkenésével tovább csökken. A gáz hőmérséklete emelkedik (függ az abszorpcióktól, az albedóktól, az áramlási viszonyoktól, az anyagminőségektől stb.). Az üveg hőmérséklete is magasabb lesz az abszorpció miatt.

Azaz a valós légkör is elnyeli és szórja a napenergiát. Az üveg jelenléte az oka annak, hogy sokkal kisebb a fali hőcsere a külső térrel konvektív úton.

Az üvegház, a Föld és a légkör.– A földfelszín a falnak felel meg, a légkör az üvegnek, zárt elkülönített gáztérfogat nincs, ami lényeges különbség. Ha a légkör és a földfelület is abszorbeál, a földfelszínre a légkör nélküli esethez képest gyenge „takaró" hatással kevesebb sugárzási energia érkezik. A hőmérséklet a két anyag abszorpciójától és a visszasugárzás és visszaverődés mértékétől függ.

Nézzük az albedóval való számolás buktatóit!

A napállandó: (1366 W/m^2), ennek negyede, kerekítve 342W/m^2. A felületi hőmérsékletet a beeső sugárzással és az albedóval számoljuk ki:

$$\text{Légkör nélkül: } T_{LN} = 100 \cdot \sqrt[4]{\frac{1366(1-0{,}3)}{45{,}67}} = 254{,}8 \text{ K} = -18{,}2 \text{ °C}.$$

Légkörrel: a légkör által visszatükrözött és abszorbeált sugárzás 107 W/m^2, a földfelületre ér 342–107=235 W/m^2 (fiktív hőmérséklet számítható).

A légkör üvegházhatású összetevői a Föld szilárd (helyhez kötött) felületét árnyékolják is. Kevesebb napsugárzás éri el, relatíve „hűti", mint a „takaró". Ezek hiányában a Föld felületét a légkörön kívüli sugárzás érné el. Az albedóval – (az abszorpciónál lényegesen bizonytalanabb érték) – való számolás sok értékproblémát, továbbá értelmezési nehézséget rejt magában. Energetikai számításoknál a sugárzással (összes energiaárammal) való hőmérsékletmérésnél az érzékelő bár külön tudja választani, hogy a sugárzás melyik része származik hősugárzásból, illetve visszavert sugárzásból, a naperőműveknél tükrökkel vagy lencsékkel összegyűjtve sugározzák a napsugárzást a gőztermelőkre, az összes energia hasznosul.

A földi éghajlatra való befolyás becsléséhez általánosítható jelenségek ismeretére van szükség. Sajnos ismereteink vagy nagyon általánosak, vagy a részletesebbek, pontosságuk nem megfelelő. Két dolog egyértelműen kimondható: egyrészt, hogy a Föld a világűrben dinamikus, de termikus egyensúlyban van, másrészt, hogy a légkör szén-dioxid-koncentrációja a Föld felülete fölötti légkörben „viszonylag egyenletes" eloszlásban a közelmúlt időszakban növekedett. E két megállapítást felhasználva a fizikai törvények további fontos megállapításokat tesznek lehetővé. A kiszámolt eredmények hasznosításával azonban nagyon óvatosnak kell lenni.

Érdekes, elgondolkodtató számításokat lehet elvégezni az alapadatokkal csak részben valós feltételezésekkel.

Napsütötte félteke. – Légkör nélkülinek képzelt Föld fekete testként viselkedik, és az egyenlítőnél a zenitben tartózkodó Nap esetére számítható, pillanatnyi hőmérséklet: (a földfelszín hőmérsékletére feltételezés, a belső hőáramlás miatt, napsugárzás nélkül egy közelítéssel 0 °C).

$$T_{zN} = 100 \cdot \sqrt[4]{\frac{1366}{2 \cdot 5{,}67}} = 331{,}3 \text{ K} \rightarrow 58{,}3 \text{ °C}.$$

A félteke egyik szélétől a másik széléig haladva a beeső sugárzás közel 0 – 683 – 0 W/m^2 közötti változásával a hőmérséklet közel 0 – 58,3 – 0 °C között változik. Az átlag:

$$T_{\text{átl}N} = 100 \cdot \sqrt[4]{\frac{683}{2 \cdot 5{,}67}} = 278{,}6\text{K} \rightarrow 5{,}6 \text{ °C}.$$

Légkörrel: A légköri visszatükrözés 410 W/m^2. Az abszorpció értéke 385 ppm CO_2-koncentrációnál 0,22. A zenitnél felületet éri: (1366 – 410).0,78 = 956.0,78 = 745,7 W/m^2

$$T_{zNL} = 100 \cdot \sqrt[4]{\frac{745,7}{5,67}} = 340,8 \rightarrow 67,8\ °C.$$

Az eddigi maximum 1922, Líbia: 58,0 °C.

A Földre sokféle reális feltételre alapozott számítás is elvégezhető. Nagyon hasznosak lehetnek az absztrakcióval létrehozott feltételekkel végzett eszmefuttatások is, de végtelen vitákba is bonyolódhatnak. A meteorológia tudománya nagyon sok más tudománnyal van kapcsolatban, tehát célszerű lenne a jelenleginél lényegesen gyümölcsözőbb együttműködés. A huszadik évszázad közepén az üvegházgázok hatásának mértéke lett komoly vita tárgya, de igen nagy mértékben eltérnek a vélemények egymástól. A viszonylag rövid, néhány évtizedes kutatási múlt eredményeinek állandó korrigálása szükséges – visszamenőleg is. Egyesek szerint ez a tudomány fejlődése, mások szerint ez ilyen mértékben azért nem fogadható el. A meteorológiában különösen a méréssel végzett kísérletek problémásak, mert a más tudományoknál alapvető feltételként számító ellenőrző mérések lehetőségei rendkívül korlátozottak. Energetikusként és termodinamikusként a földi energiaviszonyok tárgyalásakor az eredmények és a következtetések megállapításai számos esetben nem mondhatók megalapozottnak. A globális (egészében tekintett) értékeket elsősorban a vitathatatlan, energia- és anyagmegmaradási tétel kiindulással kell számolni. A részleteket az adott körülmények között kell hasznosítani. Szükséges az igen nagy mértékű modellezési munka további erőfeszítéseikor a finomítás folytatása.

3.2. Földi mérőhelyek és mérési módszerek

A meteorológiai mérések hálózatának létrejöttét a krími háborúban történtek segítették, mert 1854. október 25-én, a balaklavai csatában egy nagy erejű vihar megsemmisítette az egyesült angol–francia hajóhadat. Az akkori hírköző eszközökkel lehetőség lett volna az orkán jelzésére. Le Verrier francia csillagász javasolta III. Napóleon császárnak egy nemzetközi jelzőszolgálat megszervezését.

Kiépült és fejlődött a Föld meteorológiai megfigyelőhálózata. Jelenleg minden állam maga méri az adatokat (hőmérséklet, szélirány és -sebesség, légnyomás és a változása, csapadék, stb.), és a mért értékeket cserélik ki egymás között (Vissy 2005).

Az adatgyűjtés eszközeit és módszereit a Meteorológiai Világszervezet szabályozza.

A méréseket
- azonos paraméterekkel rendelkező műszerekkel,
- azonos módon,
- azonos időben (UTC) végzik.

Részletes leírások tartalmazzák
- az egyes műszerek pontossági követelményeit,
- a mérőhelyen történő elhelyezés feltételeit,
- a megfigyelés, leolvasás vagy adatgyűjtés módját,
- a különböző korrekciókat.

Néhány fontosabb paraméter előírásai:
Sugárzás
- sugárzás erőssége (sugárzási egyenleg komponensei),
- sugárzás időtartama (napfénytartam),
- mértékegységei:
- sugárzás erőssége: W/m^2,
- időtartama: óra,
- sugárzási egyenleg rövidhullámú komponensei (meteorológiában rövidhullám a 4 μm-nél kisebb hullámhosszú sugárzás),
- globális sugárzás (közvetlen + szórt),
- reflexsugárzás,
- albedó: a felszín sugárzás-visszaverő képessége rövidhullámú tartományban,
- a reflex és a globális sugárzás hányadosa.

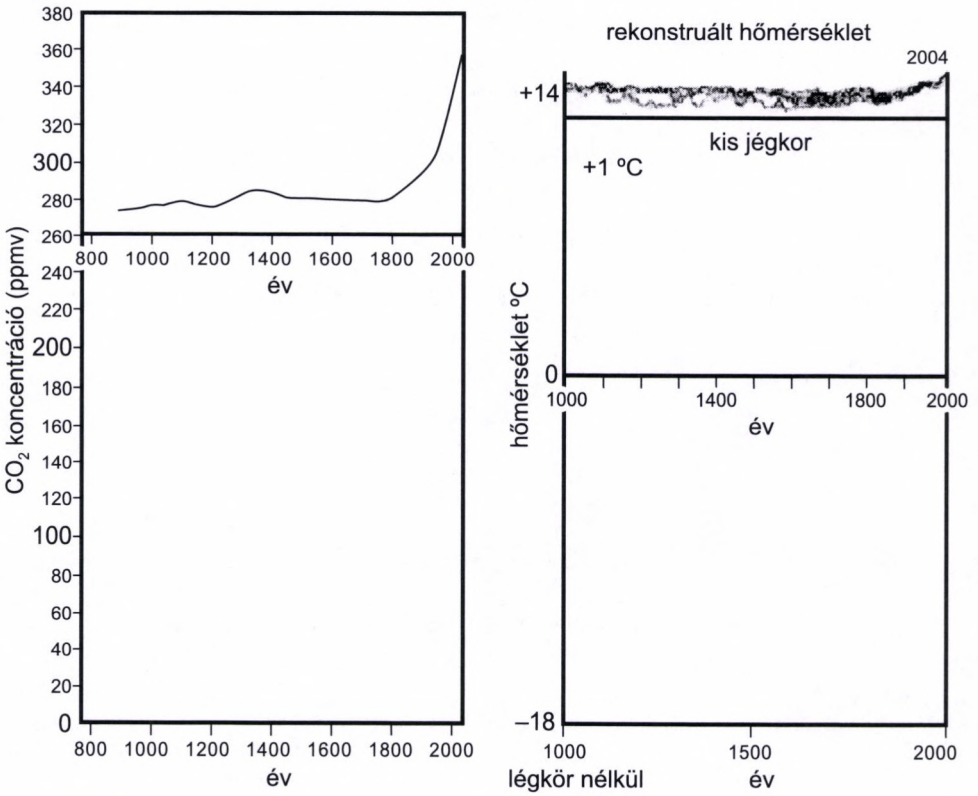
Hőmérséklet
- a levegőmolekulák mozgási energiájával arányos mennyiség,
- mérése: különböző hőmérők(folyadék, fém, elektromos)
- mértékegysége: Celsius (°C),
- egyes országokban Farenheit (°F)
- műszer elhelyezése: közvetlen hatásoktól védett helyen (hőmérőház-árnyékolás), a felszín felett 2 m, a felszín felett 5 cm (fűszinti).

Légnyomás:
- az egységnyi felület felett található légoszlop súlya,
- mérése: barométerek (folyadékos, aneroid, elektromos)
- mértékegysége: Pascal ($Pa = N/m^2$), meteorológiai gyakorlatban a hPa,
- műszerszinti légnyomás: a felszíni meteorológiai állomáson mért légnyomásérték,
- tengerszinti légnyomás: a tengerszintre átszámított légnyomásérték.

A levegő nedvességtartalma, melyet különböző paraméterekkel fejezhetünk ki (légnedvességi mérőszámok). Leggyakrabban a relatív nedvességet használjuk.

- relatív nedvesség: a tényleges és a telítési gőznyomás arányát fejezi ki (gőznyomás: egységnyi térfogatban a vízgőz részleges nyomása, telítettség: ahol megindul a kicsapódás–hőmérséklet függvénye),
- mérése: különböző nedvességmérőkkel,
- mértékegysége: dimenzió nélküli, százalékban adják meg,
- műszer elhelyezése: közvetlen hatásoktól védett helyen (általában a hőmérőházban – árnyékolás) a felszín felett 2 m-rel.

A rendkívüli elismerésre méltó kutatásokkal végzett éghajlati mérések pontossága még nem ad alapot azokra a klímaváltozásra vonatkozó határozott megállapításokra, amelyek alapján hozott intézkedések a kedvezőtlen következmények megelőzését szolgálnák. Elsősorban a szén-dioxid szerepének az eltúlzására gondolunk. Már a szén-dioxid és a globális hőmérséklet változásának a saját diagramrendszerben



3.3. ábra. A teljes skálán ábrázolva a CO_2-koncentráció és a hőmérséklet alakulása az utóbbi 1000 évben, jégzárványok vizsgálatából rekonstruálva, illetve a Hawaiin (Mauna Loa) 1958 óta végzett mérések alapján

való arányos ábrázolása is kételyeket ébreszt a két paraméternek a szoros, számszerű kapcsolatát illetően, bár ez nem tudományos érv.

A meteorológiai állomásokon a felmelegedés tárgyalásához mért, két legfontosabb paraméter – a szén-dioxid és a globális hőmérséklet – változásának megítéléséhez, a saját koordinátarendszerének teljes tartományában ábrázolt értékek érzékeltetik a változások arányát. Ez kétségbe vonja a két paraméter az irodalomban található összekötésének jogosságát (természetesen ez csak szubjektív érvelés).

A valamennyire is értékelhető műszeres légköri mérések csupán néhány évtizedre tekintenek vissza, ezért a múlt feltárására, de a jelenlegi vizsgálatoknál is proxykat is használnak. Ezek például éghajlati viszonyok fontos paramétereinek (hőmérséklet, gázösszetevők, stb.) meghatározására alkalmas kémiai, biológiai stb. paraméterek. A minták helyéül kőzetek, vizek, vegetáció, fosszíliák, tengeri üledékek stb. szolgálnak (McElroy 2002).

A környezeti számításokhoz a Föld fizikai és kémiai alapparaméterei lényegében kellő pontossággal ismeretesek. A Föld, mint reakciótér:

Paraméterek: m = 5,98·1024 kg; $\rho = 5520$ kg/m^3;

Atmoszféra (5,2·1018 kg);

Hidroszféra , litoszféra: (1,38·1021 kg);

Bioszféra (1015kg)

r = 6370 km; A = 0,51·109 km^2 (70,8% vízfelület, 29,2% szárazföld).

Az atmoszféra összetétele és tulajdonságai:

M = 28,97 g/mol

Víztartalom: 0,5–15 g/kg (telített levegő 17,3 g/m^3 20 °C-on)

N_2 78,1%; O_2 20,9%; Ar (0,9%); CO_2 (0,035%); O_3, N_2O, CO, N O_2, NH_3, SO_2, H_2S (<105%)

Az atmoszféra összetétele időben és térben változó.

3.3. Az értékek meghatározása proxyk segítségével

A következőkben a globális hőmérsékletadatokról esik szó a jégfuratok, a mélytengeri üledékek és az űrszondák mérései alapján, továbbá a szén- és oxigénizotópok szerepéről a kormeghatározásban. Elsőként a stabil izotópok módszerét vesszük vizsgálat alá.

A Föld köpenyének felső része csaknem homogénnek tekinthető, amit a középóceáni hátságokon képződő bazaltok és a köpenyből a vulkáni működéssel felszínre hozott xenolitok (idegen kőzetdarabok) $\delta^{18}O$ értékei is jeleznek ($\delta^{18}O = 5,5 \pm 0,2‰$). Ez az átlagos összetétel gyakorlatilag megegyezik a Holdról származó kőzetek $\delta^{18}O$

értékeivel (5,5‰), ami a Föld és a Hold anyagának közös eredetét támasztja alá. A középóceáni hátságokon a köpenyből feláramló bazalt összetételével szemben az idős óceáni kéreg egésze jelentős inhomogenitást mutat. A tengerfenéken megszilárdult lávakőzetek a fenti értékekhez képest jelentős ^{18}O-, míg a több kilométeres mélységben levő kőzetek kismértékű ^{16}O-dúsulást mutatnak. Ennek oka a tengervízzel kis hőmérsékleten lejátszódó felszíni, illetve a leszivárgó tengervízzel több száz °C-on a mélyben történő kőzet-víz izotópcsere.

A stabilizotóp-geokémia hagyományosan öt elem, a hidrogén, a szén, a nitrogén, az oxigén és a kén stabilis izotópjainak természetbeni eloszlásával és annak törvényszerűségeivel foglalkozik (Stephan 2008, Schoeninger et al 2000).

Méréstechnikai okokból kifolyólag a stabilizotóp-geokémiában nem abszolút izotóparányokkal dolgoznak, hanem nemzetközi standardhoz viszonyított eltéréssel, amit úgynevezett „δ" értékkel jelölnek. A δ érték jelentését képletben kifejezve, az adatok feldolgozásakor egy referenciaértéktől való eltérés értékének a referenciaértékhez való viszonyát használják.

$$\delta‰ = \frac{(Ratio_{standard} - Ratio_{referens})}{(Ratio_{referens})} \times 1000,$$

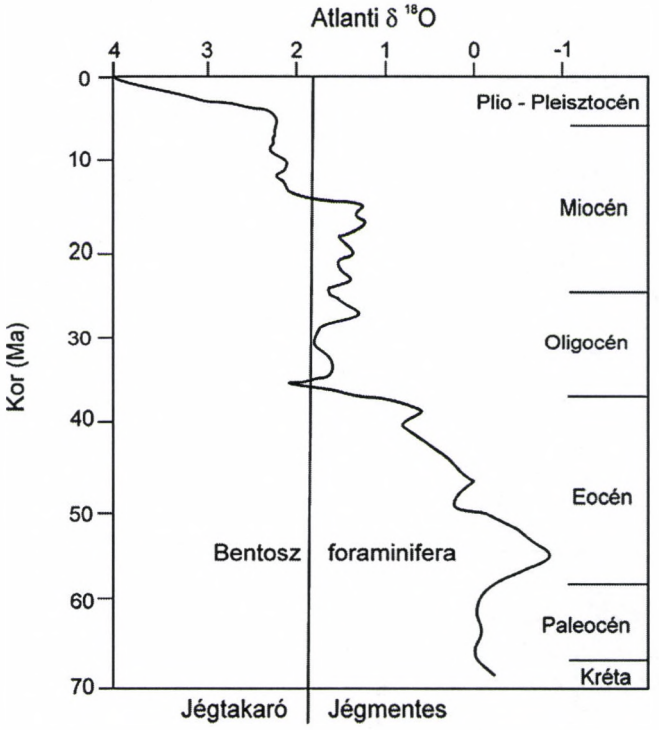
ahol az $^{18}O/^{16}O$ és a $^{13}C/^{12}C$ jelentése pl. a nemzetközi PDB szabvány

A képletben a referens minta a vizsgálandó anyagot, a standard egy nemzetközileg elfogadott mintát jelöl. A szén esetében ez a V-PDB (Pee Dee Belemnite), a hidrogén és oxigén esetében a V-SMOW (Standard Mean Ocean Water), a nitrogénre a gyors légköri keveredés miatt az antropogén szennyeződéstől mentes levegő (standardjelölés „AIR"), a kén esetében a V-CDT (Canon Diablo Troilite). A „V" jelölés a bécsi („Vienna") Atomenergia Ügynökség által kalibrált standardokhoz történő viszonyításra utal. Az 1000-rel való szorzás jelzésére a δ érték dimenziója ‰ (tehát ez nem koncentrációt jelent).

A karbonátminták stabilizotóp-arányának meghatározása után a kapott eredmény egy izotópgörbe, amely például a kagyló teljes életidejét lefedi. Az izotóp-összetételt megadó, úgynevezett δ-érték számítási módjából adódóan minél pozitívabb egy δ-érték, annál több nehéz, minél negatívabb, annál több könnyű izotópot tartalmaz a vizsgált anyag. (A stabil oxigén- és szénizotópos összetétel mérését az MTA Geokémiai Kutatóintézetében egy korszerű, vivőgázos tömegspektrométerrel végezik.)

A görbék elemzésekor több szempontot is figyelembe kell venni. A szezonalitást egyrészt a görbe alakja, lefutása, másrészt a kilengések mértéke mutatja. Az ellaposodott görbe stagnáló állapotot, többnyire meleg, növekedésre optimális időszakot jelez. A pozitív irányú kilengések hirtelen párolgásra utalnak, mivel a párolgás során elsősorban a könnyű izotópokból álló molekulák távoznak, így a maradék víz a nehéz izotópokban (jelen esetben a ^{18}O-ban) dúsul fel. A negatív irányú eltolódás

csapadékosabb időszakra utal: a csapadékvíz több könnyű izotópot tartalmaz a párolgás által nehéz izotópban dús tóvízhez képest. Mivel korabeli feljegyzések nem léteznek, csak közelítő adatokat lehet megismerni az elmúlt korok csapadékmennyiség-változásairól.



3.4. ábra. A $\delta^{18}O$-izotóparány változása a krétától napjainkig (Raymo–Ruddimann 1992)

A nagy melegben elsősorban a könnyű izotópok alkotta molekulák tűnnek el (elpárolognak), így a szárazság idején például a fa évgyűrűiben több nehéz oxigénizotópnak kell lennie. Csapadékosabb időszakban ennek az ellenkezője igaz, az évgyűrűk leginkább könnyű oxigénizotópokat tartalmaznak.

A szénnek két stabil (nem radioaktív) izotópja van: a szén-12 (^{12}C) és szén-13 (^{13}C). Előfordul kis mennyiségű instabil szén-14 (^{14}C) a Földön. A szén-14-nek a felezési ideje 5730 év, és régen eltűnt volna a Földről, ha a Föld légkörében a kozmikus sugárzás nem hozná létre szüntelenül, ez a folyamat nitrogént alakít át szén-14-gyé. Amikor a kozmikus sugarak belépnek a légkörbe, különböző átalakulásokon mennek keresztül, beleértve a neutronok termelését. A neutronok a légköri nitrogénmolekulák (N_2) egyik atomjával ütközve a következő folyamatot hozzák létre:

$$^{14}_{7}N^{*} + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{14}_{6}C^{*} + {}^{1}_{1}p.$$

A szén-14-termelés legnagyobb mértékben a 9–15 km-es magasságban játszódik le és magas geomágneses tartományoknál, de a szén-14 egyenletesen szétterjed az egész légkörben, és reakcióba lép az oxigénnel, ennek eredménye szén-dioxid lesz. A szén-dioxid bejut az óceánokba és feloldódik a vízben. Hozzávetőleges elemzések azt feltételezik, hogy a kozmikus sugárzás állandó mértékű hosszú időszakokon keresztül, ilyen módon a szén-14 is állandó mennyiségben keletkezik, tehát az aránya a nem radioaktív szénhez viszonyítva a Föld légkörében és az óceánok felszínhez közeli részén állandó. Nagyjából 1 részecske jut egybillió egyéb részecskére (600 milliárd atom/mólonként). A kozmikus sugárzás fluxusának időbeni változatait kompenzálni lehet a görbék kalibrációjával. Ha ezeket a görbéket használjuk, akkor a pontosságuk és az alakjuk lesz a korlátozó tényező egy adott minta radiokarbonos kormeghatározásában.

A növények felveszik a légköri szén-dioxidot a fotoszintézis folyamatában, és azt az állatok megeszik. Így cseréli minden élő dolog folyamatosan a szén-14-et a környezettel élete során, az anyagcsere révén. A $^{14}C/^{12}C$ arány nagyjából állandó, a tény megismerését, hogy kis mértékben változhat, a dendrokronológiai ellenőrzések tették lehetővé. Mihelyt elhal az élőlény, ez a csere megáll, és a szén-14 mennyisége fokozatosan, pontosan meghatározott sebességgel csökken a radioaktív bomlással. Felezési ideje, mint említettük, 5736 év. Ezért elvileg a fosszilis energiahordozókban évmilliók alatt az összes ^{14}C-nek le kellett volna bomlania, tehát bennük ilyen nem lenne. Sajnos igen kicsi mennyiségben azonban megtalálható.

$$^{14}_{6}C^{*} \rightarrow {}^{14}_{7}N^{*} + {}^{0}_{-1}e^{-} + \bar{\nu}$$

A béta-bomlás miatt β-részecskék kibocsátásával a szén-14 átalakul stabil (nem radioaktív) nitrogén-14-re. Ez a csökkenés használható egy elhalt anyag korának meghatározására. A vízi növényekbe olyan oldott karbonátokból is jut szén, amelyek feltehetően nagyon régiek, és ennek következtében hiányosak szén-14 izotópban. Az eljárás kevésbé megbízható ilyen növények esetén, valamint olyan állatokból származó mintáknál, amelyek ilyen növényekkel táplálkoztak. Általánosságban a módszer korlátait jelentik a különböző korú szénforrások, sőt a betemetődés után is kerülhet más eredetű szén a szerves anyagba.

A meghatározott dátum pontossága nagymértékben függ a minta tömegétől. A megfelelő mérési pontosság eléréséhez általában nagytömegű minta szükséges. A számított kor pontossága fordítottan arányos a radioaktív bomlással elbomlott szénatomok észlelt számának négyzetgyökével. 10 000 darab szénatom bomlásának kimutatása már 80 éves pontosságot jelenthet, ehhez 1–5 gramm tiszta szén kell. Ekkora szénmennyiséget viszont 0,025–1 kg szerves anyag tartalmaz.

A légköri szén nagyon kis hányada a kozmikus sugárzás hatására radioaktív lesz. A radioaktív szénrészecskék aránya ma a légkörben:

$$\frac{{}^{14}_{6}C}{{}^{12}_{6}C} = \frac{1}{8{,}6 \cdot 10^{11}}.$$

A ${}^{14}_{6}C$ izotóp 5700 év felezési idővel bomlik le.

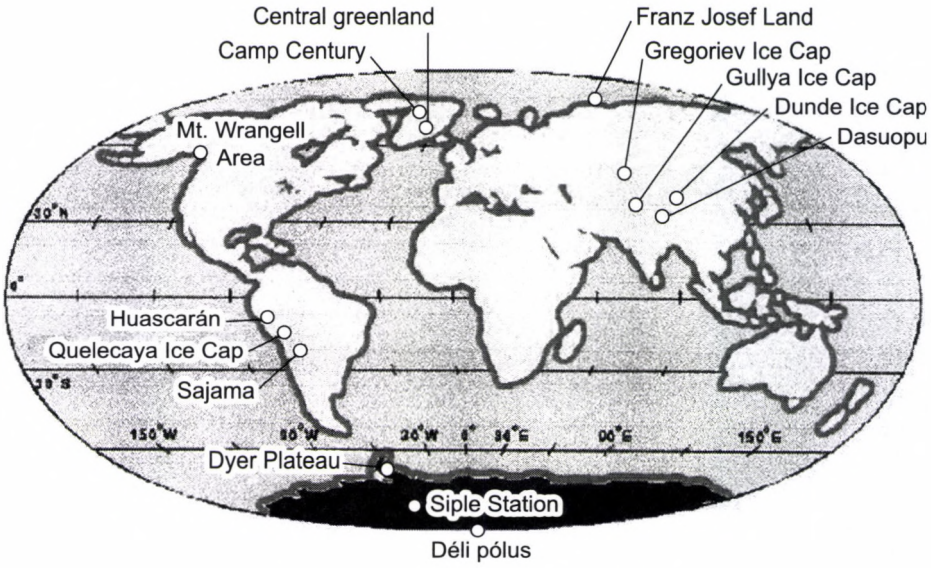
$${}^{14}_{6}C^{*} \xrightarrow{\beta} {}^{14}N + e^{-} \rightarrow \frac{T_1}{2} = 5700 \text{ év}.$$

Az élő fában ugyanannyi az arány, mint a légkörben. Minél öregebb a minta, annál kevesebb radioaktív szenet tartalmaz. A friss minta és a lelet radioaktív széntartalmának (aktivitásának) arányából a lelet kora meghatározható. A módszer kb. 50 000 évre visszamenőleg használható.

3.4. Jégfuratokban lévő gázbuborékok

Az időjárás és a klíma előrejelzéséhez radikálisan meg kellett újítani a mérési rendszereket és fejleszteni a mérőeszközöket. Az érzékenység javítása az érzékelés és a mérési eljárások alapos tudományos megújítását igénylik. Ennek kapcsán szólunk az alábbiakban a jégfuratokkal vett mintákról.

Jelenleg a Földön 15,8 millió négyzetkilométert borít hó, jég, gleccser. Ez a kontinentális felszín 10%-a (kb. Dél-Amerika területe), a teljes földfelszín 3,1%-a.



3.5. ábra. Főbb jégfurat-kutatóállomások

Ezért a jégfuratok alapján mért adatok rendkívül fontosak, de a teljes Földre való kivetítéskor értékükön kell kezelni.

Az utolsó jégkorszak leghidegebb időszakában (kb. 18 000 évvel ezelőtt) hó és jég borította a mai Németországot, Lengyelországot, Brit-szigeteket, Kanadát, az USA egy részét (pl. New Yorkot). A Föld teljes kontinentális felszínének 32%-át.

Az eljegesedésre az okokat keresve születnek az éghajlati ingadozásokat magyarázó elméletek:

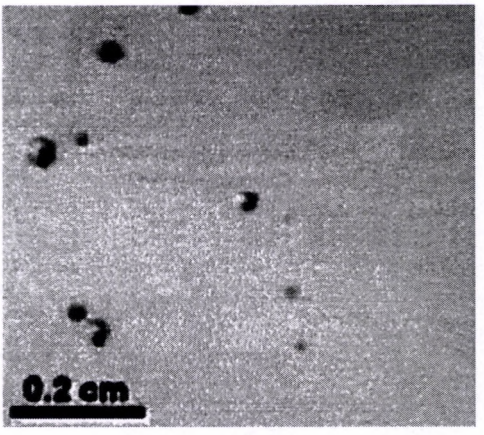
- csillagászati hipotézisek,
- fizikai hipotézisek,
- geológiai hipotézisek.

A Nap sugárzásának intenzitása 200–250 millió éves ritmus szerint változik, 1%-os változás 0,72 °C globális hőmérsékletváltozást (dT) jelent. Az egyik legmegbízhatóbb geológiai módszer a jégfurat-analízis, amelynél már ~3 km mélyre is eljutnak. (I. fele: ~10 000 év, II. fele: ~250 000 év). A mélységi vizsgálatoknál több százezer évre visszamenőleg következtetni lehet az akkori viszonyokra. Legfontosabb jégfuratprojektek: GRIP (Egyesült Európai Grönland Jégfurat Projekt – Greenland Icecore Project), GISP2 (Amerikai Jégfurat Projekt – Greenland Ice Sheet Project); NGRIP (North Greenland Ice core Project).

A jégfuratokban talált gázbuborékokból többféle következtetést lehet tenni.:

- lokális (pl. hófelhalmozódás, ebből csapadék, T),
- regionális (pl. szél szállította tengeri só),
- globális (pl. jégbe zárt gázok, pl. CO_2, CH_4 stb.).

A parányi élőlények kalcium-karbonát anyagú vázában az oxigénizotóp összetételének változásai a jégtakaró egykori előrenyomulására, illetve visszahúzódására engednek következtetni. A jégtakaró növekedése, vagyis a lehűlés során ugyanis a ^{16}O-izotóp nagyobb mennyiségben fagy be a jégbe, mint a ^{18}O-izotóp. Így az óceánok vizének izotóparánya a jégbe fagyott oxigénizotóp arányváltozásait tükrözi, amelyek a földtörténet során az óceánokban élő, mészvázú élőlények héjában mért izotópváltozások formájában maradtak fenn, és szolgáltatnak értékes információkat a klímaváltozásokról.



3.6. ábra. Jégbe zárt gázbuborékok.
Akkori atmoszférában ~ 300 évig van légcsere.
Ha CO_2 vagy CH_4 nő, > T nő

3.5. Faévgyűrűk

Az „Évgyűrű Elmélet" alapötlete Leonardo da Vinci nevéhez köthető, akinek egyik naplójában utalás található arra, hogy a fák évgyűrűiről megállapítható a száraz és csapadékos évek sorrendje. 1837-ben Charles Babbage vetette fel az évgyűrűk tanulmányozásának kérdését, és elméletileg alkalmasnak találta kormeghatározásra is.

A régészet egyik legfontosabb datálási módszerét végül egy csillagász-fizikus professzor, Andrew Ellicott Douglass, az arizonai egyetem Stewart Obszervatóriumának igazgatója dolgozta ki, ültette át a gyakorlatba, és mutatta be az első eredményeket. Ezek szerint, ha a napfoltciklusoknak hatása van a földi időjárásra, akkor annak a fák évgyűrűin is tükröződni kell. A 11 éves periódus kétségkívül megfigyelhető a fák évgyűrűiben.

A növények által felvett légköri szén-dioxidot az állatok megeszik, elhalásuk után a cserefolyamat megáll, és bennük a szén-14 mennyisége fokozatosan, pontosan meghatározott sebességgel csökken a radioaktív bomlással. Felezési ideje 5736 év.

A növények a szenet a légkörből veszik fel. A szén beépül a növényekbe, bennük nem termelődik több radioaktív szén, és ha a fát kivágják, már nem épül bele több szén. Az élő fában ugyanannyi az arány, mint a légkörben. Minél öregebb a minta, annál kevesebb radioaktív szenet tartalmaz.

3.7. ábra. Idős fa évgyűrűi

3.6. Mélytengeri üledékek

Termodinamikai számítások alapján mutatták ki, hogy az ^{18}O és ^{16}O izotópok karbonátokban és vízben történő megoszlása hőmérsékletfüggő. Ha a tengervíz oxigénizotóp-összetételét a földtörténet során állandónak tekintjük, a megoszlás hőmérsékletfüggésének és a karbonát izotóp-összetételének ismeretében annak képződési hőmérséklete egyszerűen számolható. Az úttörő jellegű munkát követően számos paleo-hőmérséklet számítási képlete jelent meg, ami adott vízösszetételre vonatkozott. Igen komoly probléma azonban a tengervíz izotóp-összetételének meghatározása. Számos szerző szerint a tengervíz oxigénizotóp-összetétele nem változik jelentősen a földtörténet során, aminek oka az óceáni bazaltokkal történő kölcsönhatás pufferhatása. Ugyanakkor a negyedidőszak során bizonyított a jégsapkák kialakulásának a tengervíz $\delta^{18}O$ értékét módosító hatása.

A glaciális időszakokban a jégsapkák növekedése elvonja a könnyű izotópokat, ezáltal a tengervíz és a belőle kiváló karbonát $\delta^{18}O$ értéke pozitív irányba tolódik el.

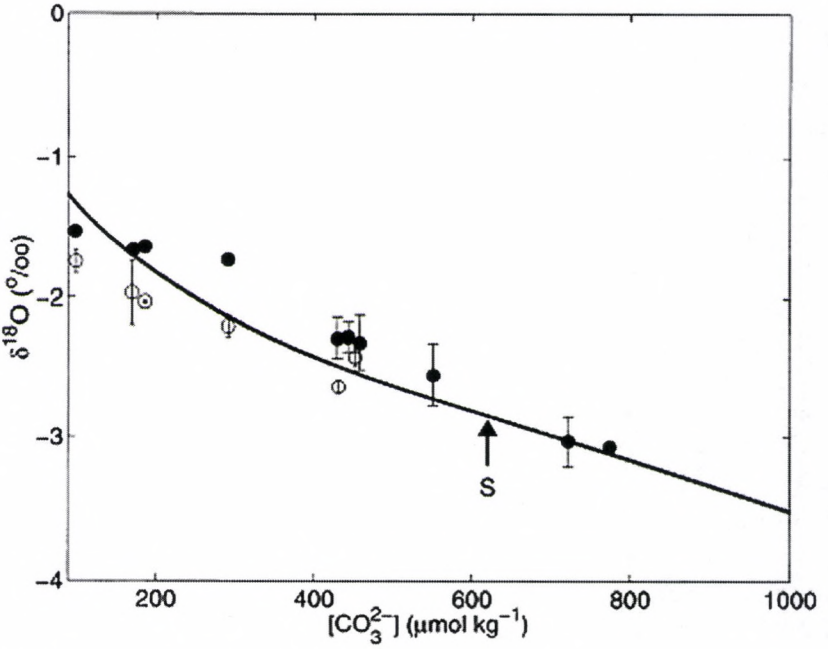
A vízösszetétel meghatározásának bizonytalansága mellett a paleohőmérséklet-számítások esetén bizonyítani kell, hogy a vizsgált kőzet az eredeti képződési feltételeknek megfelelő izotóp-összetételeket megőrizte. Az utólagos átalakulás (pl. hidrotermás oldatok vagy felszíni mállás hatására) az izotóp-összetételeket megváltoztathatja, és ezáltal a számított hőmérsékletadatok nem használhatók. Az utólagos hatásokat részletes kőzettani vizsgálatok segítségével kimutatták, és így mindezen tényezők figyelembevételével hasznos adatokat nyújt a vizsgált kőzet képződési hőmérsékletére.

A paleohőmérséklet-adatok mérési technikája fejlődésének köszönhetően, a mélytengeri likacsosházúak leülepedett kalcium-karbonátban mért $^{18}O/^{16}O$ alapján nyert geológiai és biológiai ismeretekből megállapítható, hogy a pleisztocén glaciális ciklusban globális hőmérséklet-ingadozás volt. A mélytengeri lerakódás folyamatának lassúsága miatt az $^{18}O/^{16}O$ adatok származási időpontjainak megállapítása nem teszi lehetővé a pontos hőmérséklet-eloszlás megállapítását.

A stabil oxigénizotóp-csökkenés [CO_3^{2-}] és a pH-növekedés esetén a tengervíz karbonát-kémiája változik. A tengerben (a friss vízben is) a pH-növekedéssel a HCO_3^- és a [CO_3^{2-}] keverékekből képződő karbonátok okozzák a karbonátokban jelentkező oxigénizotóp csökkenését. A stabil oxigénértékek paleohőmérséklet-jelzőként szolgálnak. A tengervíz pH-jának 0,2–0,3 egységgel való növekedése a likacsosházúaknál a kalcit ^{18}O tartalmának 0,22–0,33‰-es csökkenésével jár, ami a tengervíz hőmérsékletének a növekedését jelzi.

Kim és O'Neil (1997) szerint a vizsgálatok jól szemléltetik a nem egyensúlyi folyamatoknál a több hatás szerepét. Bemutatják, hogy a víz és a karbonátok között

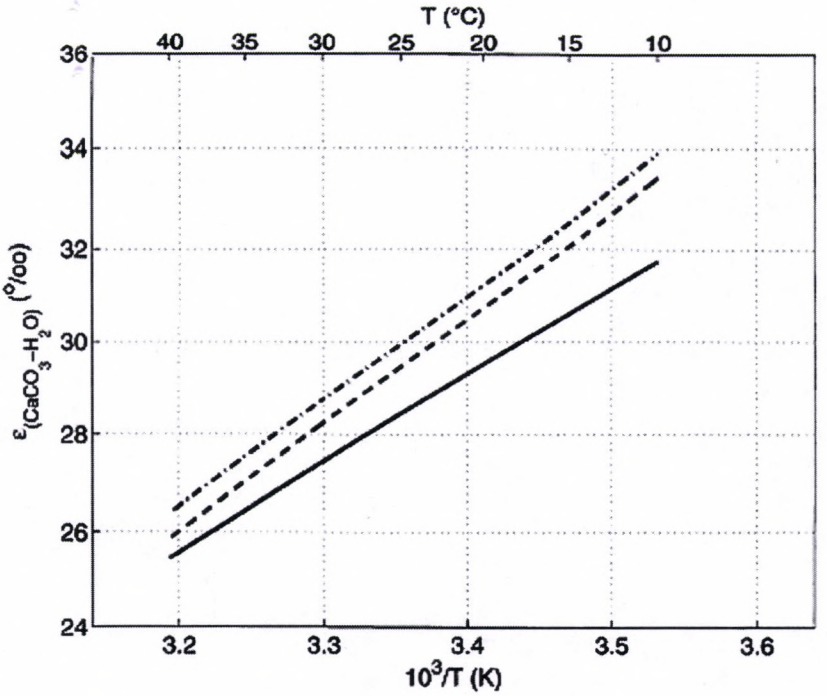
az oxigénizotópok megoszlása nemcsak a hőmérséklettől, hanem a pH-értékétől is függ. A rendszer egyensúlya az oldatkémia területe.



3.8. ábra. Az ábrán látható a likacsosházúak kalcitja (zárt/ nyitott körök: sötét/világos) és az $S = [[H_2CO_3] + [HCO_3] + [CO_3^{2-}]]$oxigénizotópos összehasonlítása az elméletileg várthoz képest (folytonos vonal), a $[[CO_3^{2-}]$ függvényében. A kagyló $\delta^{18}O$ értékek $[[CO_3^{2-}]$ szerinti változásának átlagos hajlásszöge (Spero et al. 1997) szerint ΣCO_2 állandó, kísérletileg megállapítva –0,0022 ± (μmol $kg^{-1})^{-1}$ a sötét vonalra vonatkoztatva. Az elmélet alapján az átlagos hajlásszög –0,0024 ± (μmol $kg^{-1})^{-1}$ (Zeebe 1999)

A tengeri kagylók kalcium-karbonátjában megkötött ^{18}O-je és a hőmérséklet között meghatározott kapcsolat van. Ha ismert a kagyló életteréül szolgáló víz relatív ^{18}O-tartalma, akkor a hőmérséklet ±1 °C pontossággal meghatározható. A tengervíz relatív ^{18}O-tartalma a sókoncentrációval növekszik, tehát a felszíni víz esetében a sókoncentrációval és a hőmérséklettel is. A kalibrálás különleges figyelmet érdemel, a vízösszetevők különböző változatai sztochasztikus eloszlásúak (Spero et al. 1997). Az oxigénizotóp-összetétel mellett a szénizotópok arányait is meghatározzák. A szénizotóp-összetétel a víz tápanyag-ellátottságáról ad információt, bár e tekintetben bonyolultabb a kép, hiszen a kagyló a vízből származó szén mellett a saját életfolyamatai során képződött (metabolikus eredetű) szenet is beépítheti. A szénizotóp-összetétel megváltozása ezért a környezeti változás mellett a kagyló metabolikus folyamatait is tükrözheti.

A szervetlen kalcitoknál a hőmérséklet-növekedés a ^{13}C és a ^{18}O aránnyal fordított korrelációt mutat. Ezért az izotóphatásnál például egyedül a karbonátok



3.9. ábra. A kalcit- és a víz-oxigénizotóp összehasonlítása Kim és O'Neil (1997) szerint különböző Ca^{2+} és HCO_3^- függvényében, pl.: 5 mmol kg^{-1} (folyamatos vonal), 15 mmol kg^{-1} (pontozott – szaggatott vonal).
Megjegyzés $\varepsilon_{(CaCO_3-H_2O)(CaCO_3-H_2O)} = [\alpha_{(CaCO_3)-H_2O)} - 1] \cdot 1000$ [ez az érték kissé különbözik a $10^3 \ln(\alpha)$-tól]

izotóparányát veszik figyelembe, és ez az alapja a „karbonát csoportra alapozott hőmérőnek". Ezzel homogén egyensúlyt feltételeznek (egyes fázisok közötti reakciókat), és ezzel független a növekedés a víz izotóparányától és a vele együttélő más fázisoktól. Ez olyankor is alkalmazható, amikor a víz izotóparánya ismeretlen.

3.7. Meteorológiai mérőeszközök

A meteorológiai kutatások néhány feladata (Mészáros 2011):

Magaslégköri megfigyelések

Az aerológia mérőeszközei a meteorográfok, mérőtornyok, kötött léggömbök, ballonszondák, repülőgép-meteorográfok, rádiószondák, meteorológiai rakéták. Idetartozik a:

– radarmeteorológia (Doppler-, ill. polarizációs radarok)
– meteorológiai műholdak (kvázi-poláris, geo-szinkron). Részletesebben lásd később.

Hőmérsékletmérés

A hőmérséklet a levegő fizikai állapotának egyik alapvető termodinamikai jellemzője. Mérését a következő körülmények teszik lehetővé:

a) a testek hőmérsékletváltozásai során fellépő fizikai jelenségek:
- testek térfogatának megváltozása,
- fémek elektromos ellenállásának megváltozása,
- a termoelektromosság függése a hőmérséklettől;

b) az egymással érintkező testek hőmérsékletének kiegyenlítődése;

c) ugyanazon a hőmérsékleten végbemenő folyamatok (pl. halmazállapot-változások).

A hőmérséklet alapvető fizikai változásokat von maga után: 1. térfogatváltozást, azaz hőtágulást, 2. elektromos tulajdonságok változását (ellenállás, potenciálkülönbség), 3. fázisátalakulásokat (elsősorban vízben).

A hőmérő kizárólag a mérendő közeggel álljon kölcsönhatásban, *a)* nem érheti sugárzás (mely a levegőt alig, a hőmérőt jelentősen befolyásolja), fontos továbbá a direkt sugárzás árnyékolása, illetve a szellőztetés; *b)* nem érheti csapadék (a víz párolgása hőt von el, csökkenti a hőmérsékletet).

A hőmérsékletmérés eszközei egyrészt *az elektromos hőmérők*. A folyadékos hőmérők mellett – és inkább helyettük – többféle elektromos hőmérő is alkalmazható, amelyek kijelzőjéről könnyen leolvasható a mért hőmérséklet. Ezeket a típusokat digitális hőmérőknek is nevezik.

A termoelemek két különböző anyagú, egyik végükön összeforrasztott drótból állnak. Ez a pont a termoelem ún. „érzékelő pontja". Ha a szabadon maradt két huzalvéget mérőműszerhez csatlakoztatjuk, majd az érzékelő pontot megmelegítjük, a műszer feszültséget jelez. A jelzett termofeszültség hőmérsékletfüggő. A leggyakrabban alkalmazott termoelemek vas- és konstantán-, illetve réz- és konstantándrótból készülnek. (A konstantán 55% Cu és 45% Ni ötvözet.) A vas-konstantán termoelemek –200 °C és +1000 °C hőmérséklet-tartományban használhatók A forrasztási pont hőmérsékletét 1 °C-kal növelve 0,00005 V termofeszültség-növekedés adódik A réz-konstantán termoelem –200 és + 600 °C hőmérséklet-határok közt alkalmazható, 1 °C hőmérséklet változásra 0,00004 V feszültség változást ad.

Tudományos vizsgálatoknál +1700 °C-ig platina-platinaródium, illetve a nikkel-krómnikkel (0 °C-tól +1200 °C-ig) termoelemeket használják. A kereskedelemben kapható termoelemek vékony vezetékeit egymástól elszigetelve, fémtokba zárják. A fémtokot megbontani nem szabad, a termoelem a cső végén lévő kivezetések segítségével csatlakoztatható a mérőműszer áramkörébe.

A hőmérsékletmérés egy másik eszköze az *ellenálláshőmérő*. Működésük alapja, hogy a fémek elektromos ellenállása a hőmérséklettel változik. Ha a huzal ellenállását mérni tudjuk, meghatározhatjuk a huzal hőmérsékletét. Olyan anyagból

készült huzalokat alkalmaznak, amelyek a hőmérséklet hatására jelentősen változtatják az ellenállásukat.

A termisztor mérőeszköz-elnevezés csak az ún. félvezető ellenállásokra használatos. A termisztorok hő okozta ellenállás-változása kb. egymilliószor nagyobb, mint a fémeké. Kis méretük és nagy hőérzékenységük miatt alkalmasak kis kiterjedésű testek, kis légterek hőmérsékletének mérésére és gyors hőváltozások követésére.

A napsugárzás mérése

A teljes sugárzási egyenleg és komponenseinek meghatározása, időbeli-területi alakulásának vizsgálata. Jelentősége:

- az adott hely klímájában objektív adottság,
- a globális klímaváltozást előrejelző modellek bemenő paraméterei,
- alternatív energiaforrás,
- műholdas mérések felszíni verifikálásához (ellenőrzéséhez) elengedhetetlenek,
- a spektrális intenzitásmérések információt adhatnak különböző hullámhossztartományban elnyelő légköri anyagok koncentrációjáról, pl. légköri összes ózon, CO_2, SO_2, aeroszol optikai mélység.

Az intenzitás mérése és eszközei:

- direkt sugárzás (direkt: pirheliométer – Abbot-féle, Angström-féle, relatív: aktinométer –Michelson–Martin, Linke–Feussner),
- rövidhullámú sugárzás (piranométer – Kipp&Zonen, Moll–Gorczynski),
- hosszúhullámú sugárzás (pirgeométer),
- teljes sugárzás (pirradiométer),
- speciális mérések (O_3, UV-B, SO_2).

A sugárzás fajtái: napsugárzás (globálsugárzás): rövidhullámú (0,286–4,0 μm): *a)* direkt: közvetlenül a Napból érkezik (napkorong irányából); *b)* diffúz (szórt): a napsugárzás szóródik a felhőkön és az aeroszolokon. A terresztrikus sugárzás: hosszúhullámú (4,0–80 μm): forrásai a felhők, a légkör és a felszín. A lefelé haladó sugárzás a síkfelszín feletti 2π nagyságú térszögből a felszín felé tartó sugárzás. Alapvető műszerkategóriák: piranométer (globálsugárzás), pirheliométer (direkt sugárzás), nettó pirradiométer (nettó sugárzás), pirgeométer (hosszúhullámú sugárzás), pirheliográf (napfénytartam).

A szél mérése

A levegő földfelszínnel párhuzamos mozgása, melyet a légnyomáskülönbség hoz létre.

A súrlódási rétegben a magasabb nyomású helyről az alacsonyabb felé tart, iránya és sebessége van→vektormennyiség.

Paraméterei:

- szélirány (szélkódok, szögértékek),
- szélsebesség (m/s),
- lökésesség (m/s),
- szélnyomás (N/m^2).

Szélirány: a levegő mozgásállapotát adott pillanatban és adott helyen egy vektor jellemzi, amely a mozgás irányával azonos irányba mutat, és amelynek nagysága arányos a légmozgás sebességével. A légmozgás többnyire horizontális, a konvektív cellákban (pl. gomolyfelhő-keletkezés) lehet a horizontálissal azonos skálájú. A meteorológiai operatív gyakorlatban általában a szélirányt és a szélsebességet külön mérik 10 m magasan. A szélirány az az irány, ahonnan a szél fúj (8 főirány: É, ÉK, K, DK, D, DNY, NY, ÉNY, + 8 mellékirány van).

A szél sebességének kifejezésére használatos karakterisztikák :

- szélút: az a távolság, amelyet egy képzeletbeli test a széllel együtt mozogva adott idő (10 perc, 1 óra) alatt megtenne;
- közepes szélsebesség: a mérést megelőző 10 perc átlaga [m/s];
- szélnyomás: a szél által 1 m^2 felületre gyakorolt tolóerő [Pa];
- maximális széllökés: a szélsebesség vagy a szélnyomás átmeneti csúcsértéke.

A szélsebesség SI-egysége: [m/s], 1 m/s = 3,6 km/h = 2,237 mérföld/h = 1,943 csomó. A szélsebesség (V) és a szélnyomás (Pw) közötti összefüggés: $Pw = k \cdot V$, ahol k konstans a levegö sűrűségétől és a vizsgált felület (amelyen éppen a szélnyomást vizsgáljuk) méretétől, alakjától függ.

Légnyomás mérése

A talajfelszínen vagy a légkör adott szintjében, az adott szinttel a légkör felső határáig terjedő légoszlop súlya egységnyi felszínre. Igen változó állapothatározó (intenzív: kiegyenlítődés). A nyomás SI egysége a pascal ($Pa=N/m_2$), engedélyezett a bar egység használata (1 mbar = 100 Pa = 1 hPa). 1 Hgmm = 1 torr = 133,322 Pa = 1,3332 mbar (torr: Toricelli nevéből). A normál légköri nyomás értéke: 1013,25 hPa, azaz 760 Hgmm. Összehasonlításhoz: tengerszintre, 0°C-ra és $\phi = 45°$-ra kell átszámítani.

Légnedvesség mérése

A légnedvesség nagyon fontos szárazföldi állapothatározó: a felhő/csapadékképződés, illetve a különböző növények elterjedése miatt. Nehezen mérhető, többféle fizikai mennyiséggel jellemezhetjük:

- gőznyomás (e), telítési gőznyomás,
- abszolút és relatív nedvesség.

Alapvető műszerkategóriák: 1. abszorpciós műszerek, 2. hajszálas nedvességmérők, 3. pszichrométerek (August-féle szívófonalas, Assmann-féle), 4. kondenzációs nedvességmérők.

Csapadék mérése

A csapadék a légkör vízkészletéből keletkező víz, amely a felszínre jut. A hidrológiai elemek közül a legkönnyebben mérhető. A csapadékot jellemző mennyiségek:

- csapadék mennyisége: 1 m^2 felületre jutó vízoszlop magassága mm-ben (1 mm/m^2 = 1 liter = 1 kg),
- csapadékhullás intenzitása: egységnyi idő alatt egységnyi felületre jutó vízoszlop magassága (mm/m^2s^{-1}),
- csapadékösszeg: adott időtartam alatt hullott csapadék mennyisége.

Meteorológiai radar

Az időjárás-megfigyelés egyik igen fontos eleme a radarral történő mérés. A radar elve: az adó által előállított rádiójelek a parabolaantennáról irányítottan kisugárzódnak, ezt követően az útjukba kerülő elektromos vezetők felületéről visszaverődnek. Ezt az antennához kapcsolt vevőegység érzékeli. Ha megmérjük a visszavert jel beérkezéséig eltelt időt, ebből megállapíthatjuk, hogy a visszaverő felület milyen távol van tőlünk. Ha tehát egy ilyen sugárnyalábbal végigpásztázzuk a terepet, képet kapunk az itt található tárgyak elhelyezkedéséről.

A radar rádiójelet (elektromágneses hullámot) bocsát ki, a kibocsátás időtartama mikrosecundum (a másodperc milliomod része) nagyságrendű. A meteorológiában használt radaroknál ez a sugárnyaláb 1 fok. Az 1 fok a felhők, felhő- és csapadékelemek pontos érzékeléséhez megfelelő érték. Kibocsátás után a radarra 1 ezredmásodperc (ms) múlva visszaérkezik a jel. Ez a visszhang jöhet vízcseppekről, jégkristályokról, hópelyhekről, ha a csapadékképződés megindult, ezek látszanak.

A radar hatótávolsága 250–300 km. A radarhullámok egy része szóródik a felhőkben, ezért az energiának csak kis része érkezik vissza. A kisugárzott és a vett energia között 17 nagyságrend a különbség. A radarnak kis és nagy energiát kell kezelnie, és igen jó erősítő kell a visszhang felerősítéséhez. A radar által kibocsátáskor a jel teljesítménye 250 kW, nagyobb időátlagban a hálózatból felvett átlagteljesítmény kisebb.

Egy radarberendezés telepítésére, működtetésére szigorú szabályok, szabványok vonatkoznak, a Sugárbiológiai Intézet minden magyarországi radar sugárzását ellenőrzi, hogy a megengedett egészségügyi határérték alatt van-e. Emellett külön rádióengedély, frekvenciasáv-használati engedély beszerzése szükséges.

A Föld gömbhöz közeli alakja hatással van a radar által végzett mérésekre is, hiszen a Föld görbülete 250 km-es távolság esetén már kb. 3,5 km-t jelent. Ez azt eredményezi, hogy például a távolban lévő, alacsony szintű felhők már nem vagy

csak alig láthatók. Jelentős hatással van a domborzat is a radar által belátott területre, gondoljunk csak egy hegyekkel, hegységekkel tarkított országra, ahol sem a völgyekben, sem a hegyek ormain nem ajánlatos radart telepíteni.

A meteorológiai radarberendezéseket az ún. radarszélmérésre is használják. Erre a célra az ún. „doppler-radar" szolgál, amely nemcsak a visszaverődést okozó csapadékelemek helyzetét érzékeli, hanem azok közeledő-távolodó mozgását is. A doppler-radar működése a kibocsátott és visszaérkező jelek összehasonlító mérésén alapul. A beérkező és a kibocsátott hullámok egymáshoz képest térben eltolódnak, ez a rádióhullámok jellemzőinek mérésével jól követhető. Ha a visszaverődést okozó tárgy (pl. zivatarfelhő) közeledik vagy távolodik, akkor a hullámok eltolódása is változik, amiből a sebesség kiszámítható. Doppler-radar esetén gyakran derült időben is van visszhang. Ekkor nincsenek vízcseppek a levegőben, ebben az esetben apró légörvények (mikroturbulenciák) okozzák a visszhangot, melyek méretei a cm-től a m-esig terjednek. Ilyenkor ingadozások vannak a szélsebességben és a szélirányban is, ezért időlegesen megnőhet a levegő sűrűsége. A levegő törésmutatója a hőmérséklettől és a nedvességtől függ, ha a sűrűség nem egyenletes, a törésmutató is változik, itt a hullámok.

A változó sűrűségű levegőről visszaverődő jeleket szintén fel lehet használni szélmérésre, ezen alapszik az ún. windprofiler vagy szélprofil-meghatározás is (Veres 2009).

Infravörös távérzékelés

A műszert az éghajlatkutatásban az üvegházgázok, főként a szén-dioxid légköri koncentrációjának mérésére használják. A műhold 700 km magasságban kering, és a rajta elhelyezett műszer a légkör 8 km-es magasságban vett rétegének összetételét méri.

A mérés elve: A légkörben lévő molekulák elnyelik az infravörös fény energiájának egy részét. Ennek hatására a molekula atomjainak rezgési és forgási energiája megváltozik. Az elnyelés sajátosságai jellemzőek a gázok részecskéire. A kapott információ alapján meghatározható a légkör vizsgált részének összetétele.

A mérőműszer két fő egységből áll:

- érzékelő és adatkiolvasó egység (3,7–15,4 mikron hullámhosszra),
- rezgésmentes és hosszú élettartamú hűtőegység (–215 °C hőmérsékleten tartja az érzékelőt, így csökkenti a közvetlen környezet zavaró hatását).

A műszer lelke a hűtött színképelemző egység, amely a teljes mérési tartományban nagy érzékenységet biztosít. Innen egy nagy érzékenységű Hg-Cd-Te érzékelőre kerülnek az infravörös jelek. A szerkezet egyszerre 2378 színképmintát képes elemezni. Ez a teljesítmény elengedhetetlen a felhős időben történő hőmérsékletméréshez. A berendezés forgatható antennája 49,5 °-os szögben fogja át a vizsgált légköri területet. A legkisebb mérhető terület 13,5 km^2. A mérések 8/3 másodper-

cenként ismétlődnek, minden alkalommal 90 minta készül a területről. Egy mérés időtartama 22,4 ezredmásodperc (ms). Mindegyik mérés tartalmazza a 2378 színképmintát.

A hordozó műhold fedélzetén vannak látható (VIS) és közeli infravörös (NIR) hullámhossztartományban működő érzékelők is. Ezek felbontóképessége 2,3 km. Ez a (VIS/NIR) rendszer jó képet ad az alacsony szintű felhőzetről.

3.8. Űrszondamérések

A legújabbkori, hőmérsékletet mérő, időjárási űrszondák közvetlenül nem hőmérsékletet mérnek, hanem különböző hullámsávokban a sugárzást. Az eredményeket matematikailag kell hőmérsékletté konvertálni. 1978 óta működik mikrohullámú szonda (MSUs) a National Oceanic and Atmospheric Administration poláris pályájú szatellitjén mérve a a légköri oxigén mikrohullámú sugárzásának változását, amely a légköri rétegek hőmérsékletének változásával is arányos. Az infravörös sugárzás mérésével a tengerfelület hőmérsékletének adatait 1967 óta gyűjtik.

A szatellitek nem teljesen homogének, még egy sorozatban is probléma az összehasonlítás. Az érzékelők elhasználódnak, mind a pályamódosulást, mind a minőségváltozást korrigálni kell, ami bonyolult feladat (és vitákra ad okot).

A szatelliteket földfelületi hőmérséklet-mérésre csak felhőtlen feltételek mellett lehet használni, általában az infravörös hősugárzás mérésével (AVHRR). A tengerfelület hőmérsékletmérésére (SST) 1967-ben kezdték használni, az első globális összeállítás 1970-ben született meg.

National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) az űrkutatás segítségével „Korszerű, Nagyon Nagy Felbontású Radiométert"-t (AVHRR) fejlesztett ki, és ez a (POES) programban végez méréseket. Az AHVRR berendezés 5, viszonylag széles hullámsávban (szabványos) végez méréseket. Az első kettő a vörös (0,6 mikrométer, 500 THz) és a közel infravörös (0,9 mikrométer, 300 THz) tartomány, a harmadik 3,5 mikrométer, és az utolsó kettő a Föld hősugárzása 11 és 12 mikrométer.

A NOAA két poláris-orbitális meteorológiai szatellit, állandó működésű. Az egyik pályája az Egyenlítőt kora reggel és kora este metszi, a másiké délután és késő este. A keringési pálya a Föld felületétől 833 és 870 kilométerre (±19) helyezkedik el, és kb. 2500 km-es sávot figyel meg.

A szatellitek hőmérsékleti, első néhány évtizedes méréseinek feldolgozásakor globális hőmérséklet-csökkenést tapasztaltak. Ezután különféle korrekciók szükségességét állapították meg (pályamódosulás, algoritmusmódosítás stb.), és így 1998 óta hőmérséklet-emelkedési trendet mutatnak ki. A korrigálás módja ismeretlen, különösen kérdéses, hogyan lehet az akkori légköri és felületi (fizikai, biológiai stb.) viszonyokat figyelembe venni.

3.2. táblázat. A földfelület mérésénél használt frekvenciák

1,4 GHz	a nedves termőföld mérésére
5–10 GHz	a vegetáció mérésére egy időben a nedves termőföld mérésével
18–19 GHz és 23–24 GHz	tipikusan két frekvencia szükséges a légköri vízpára és abszorpciós csúcsok közötti tartomány mérésére
37 GHz	mérés az összes frekvenciával kombinációban

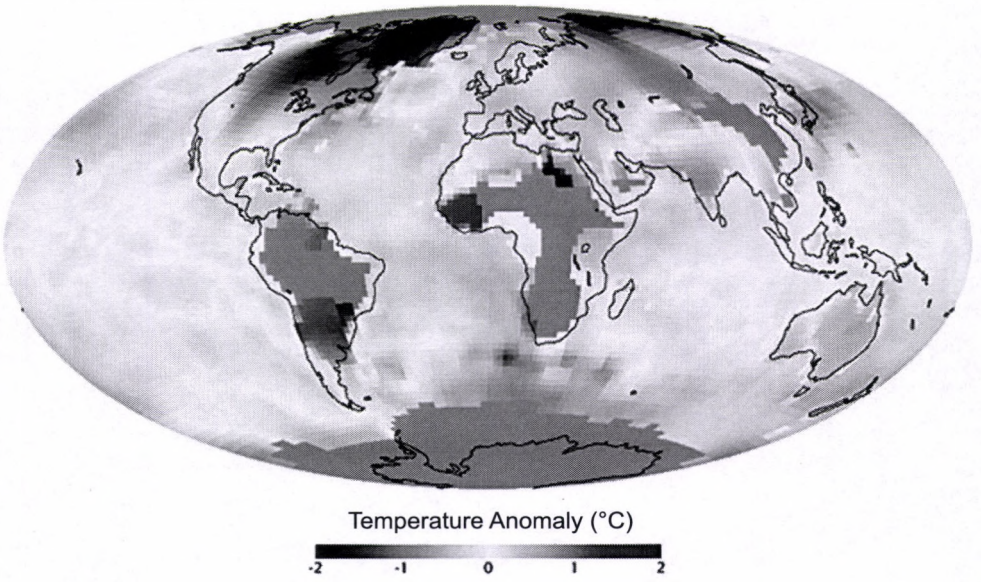
3.9. Következtetések

A klímaváltozást kutató szakterületen az igen alapos és korszerű technikai mérésekkel végzett vizsgálatok végkövetkeztetése mindig a szén-dioxidnak a globális hőmérséklet-emelkedésben játszó döntő szerepére utal. A három, legkorszerűbbnek tekinthető mérési módszer bemutatásával érzékelhető, hogy ez egyáltalán nem megalapozott állítás. A múlt hosszabb távú adatait szolgáltató jégfuratok és a mélytengeri üledékek, bár igen elismerésre méltó, fontos ismereteket adnak, a pontosságuk nem ad alapot az ismert, a klímaváltozás megelőzésével kapcsolatban levont következtetésekre. A jégfuratminták vételére rendelkezésre álló terület is kicsi a Föld teljes felületéhez képest. A jelenkori, rövid időre visszatekintő űrszondás eljárás igen nagy előrelépés, de az értékelését a változó légköri viszonyok teszik bonyolulttá. A legmegbízhatóbbak lennének méréstechnikai szempontból a földfelület közelében elhelyezett hőmérők, ezeknél azonban gyakorlatilag a változások értékeléséhez szükséges pontosság az adatok rendezésében lehetetlen.

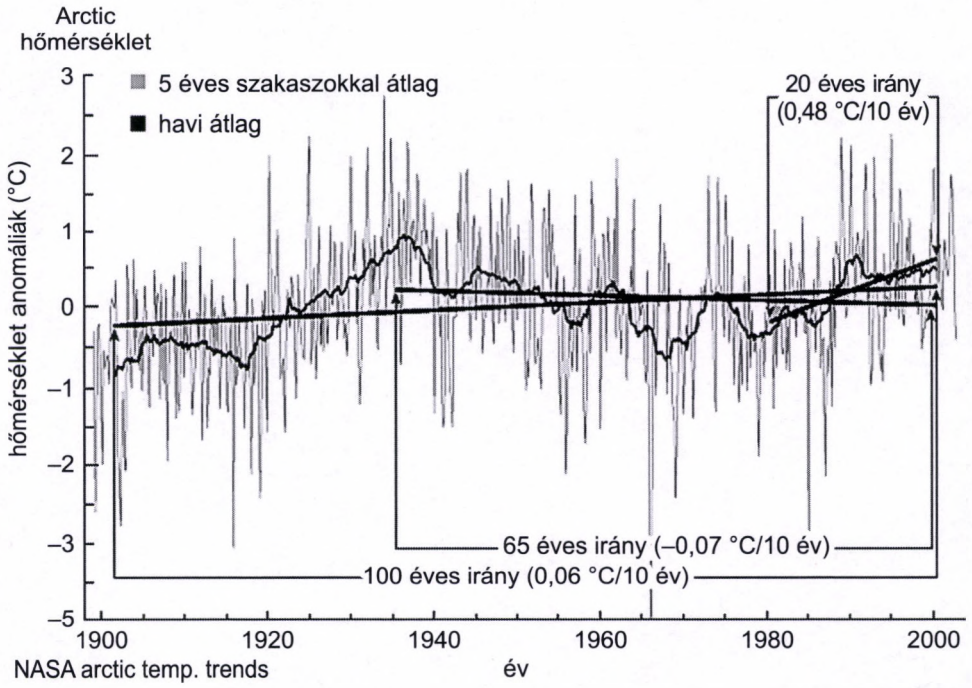
Az igen elismerésreméltó klímakutatásokat nagy intenzitással folytatni kell, amit éppen az indokol, hogy nem található egy paraméter (az üvegházgázok), amelynek befolyásolásával érdemi hatás tudnánk kifejteni a változások alakulására. Az energetikai tervezést alapvetően befolyásoló szén-dioxid csökkentését erőltető intézkedések hatástalanok lesznek és az energetikában súlyos torzulást okoznak.

A NASA GISS (Goddard Institute for Space Studies) kutatói űrszondás mérésekkel 1979 óta felvett űrszondás adatai alapján elemezték a Föld különböző régióinak hőmérséklet-változását. Ennek alapján különböző korrekciókat is elvégezve (visszamenőleg is ?), megállapították, hogy 1980 óta a Föld globális hőmérséklete 0,74 °C-kal növekedett. Ennek kétharmad része 1975 óta történt, kb. 0,15 – 0,2 °C 10 évenként. A változást mérik, és nem az abszolút értékeket. Összehasonlították az 1951–1980 évszakasszal (az abszolút érték ezen időszakra 14 °C). A GIS 6300 meteorológiai állomással működik együtt (hajókon lévő állomások, űrszondák tengerfelület mérésére, antarktiszi állomások, arktiszi állomások).

A mérési lehetőségek korlátait és hibáit áttekintve megállapítható, hogy az irodalomban található, igen nagy gondossággal elvégzett mérések eredményeinek



3.10. ábra. NASA űrszondás mérés



3.11. ábra. Az átlagolási szakaszok hatása a változás trendjére

tizedes pontosságú interpretálása vitatható (illetve konszenzus alapján jön létre). Emellett még a választott statisztikai értékelés is bizonyos önkényesség szerint történik, ami esetleg ellentétes vélemények kialakítását teszi lehetővé. Példaként a NASA egyik, különböző időtávra vonatkozó tendenciáinak bemutatása szolgál (3.11. ábra).

A 3. 11. ábrából kimutatott rövid időszakaszokból a klímatörténelemre gyakorlatilag nem vonható le következtetés. A cél természetesen az iparosítási időszak elemzése lenne. De ez erre is korlátozott lehetőséget jelent. A 100 éves irány kismértékű növekedést jelez. A 65 éves irány csökkenést. Az utóbbi 30 év iránya is növekvő, ami erőteljes iparosodási szakasszal indokolható. Ugyanezzel nem indokolható az 1915 és 1935 szakasz közötti még erőteljesebb növekedés, amit a 3.11. ábra nem emel ki.

4. A szilárd, folyékony és gáznemű anyagok égése

Az égési egyenlet általános formája:

$$AC_XH_Y + [(2AX + AY/2)/2]O_2 \rightarrow (AX)CO_2 + (AY/2)H_2O$$

ahol *A, X,* és *Y* koefficiens, illetve a szénhidrogén-indexek.

A tüzelőanyagok (általában a primer energiahordozók) kötött és felszabadítható energiáját, illetve energiaáramát többféle megközelítésben írhatjuk le.

Kötött energia, tömeghiány.

A tömeg és energia egyenértékűség alapján az m_{fl} tömegű fosszilis vagy nukleáris tüzelőanyag kötött energiáját az a $\Delta m_{ü}$ tömeghiány jelenti, amellyel a kémiai, vagy nukleáris reakció során a tömeg csökken, és ez a tömeg hővé alakul. Einstein összefüggése alapján a kötési energia:

$$E_k = \Delta m_{ü} c^2,$$

ahol $c = 299{,}79258 \cdot 10^6 \cong 300 \cdot 10^6$ m/s a fénysebesség.

A tömeghiány alapján a fosszilis tüzelőanyag fűtőértéke, illetve a nukleáris üzemanyag kiégetési szintje (Büki 2005):

$$h_{ü} = \frac{E_k}{m_{ü}} = \frac{\Delta m_{ü} c^2}{m_{ü}}$$

A $\Delta m_{ü}/m_{ü}$ arány fosszilis tüzelőanyagok elégetésénél kimutathatatlanul kicsi.

Adatok a tömeg energia egyenérték számításához:

$$E/m = c^2 = (299\ 792\ 458\ \text{m/s})^2 =$$
$$= 89\ 875\ 517\ 873\ 681\ 764\ \text{J/kg}\ (\approx 9{,}0 \cdot 10^{16}\ \text{joule/kilogramm})$$

$$m = E/c^2 = 0{,}111 \cdot 10^{-16}\ \text{kg/joule}$$

$$\text{GJ} = 10^9\ \text{J}$$

4.1. táblázat. Különböző tüzelőanyagokhoz tartozó energiamennyiségek tömegveszteségei elégéskor

Jelölés	Energia GJ	Tömeg kg
Toe	42	$4{,}66 \cdot 10^{-7}$
Tce	29,3	$3{,}25 \cdot 10^{-7}$
LNG	46	$5{,}10 \cdot 10^{-7}$
1000 m3 földgáz	36	$4{,}00 \cdot 10^{-7}$
1000 kWh	3,6	$0{,}40 \cdot 10^{-7}$

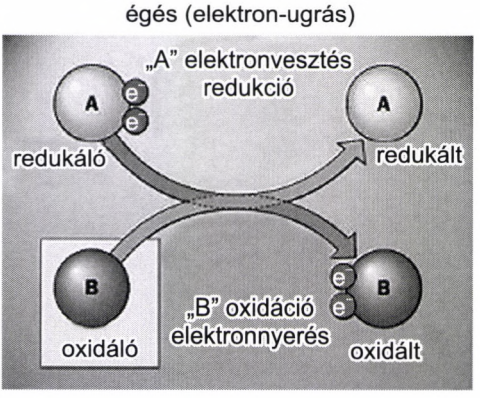
A fosszilis tüzelőanyagok égéséhez tartozó specifikus reakciók:

Karbon: $C + O_2 \rightarrow CO_2$

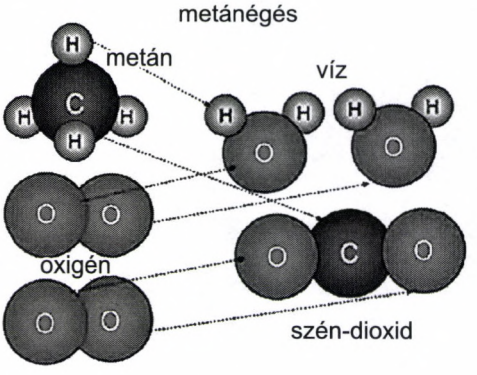
Metán: $CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$

Octan: $2C_8H_{18} + 25O_2 \rightarrow 16CO_2 + 18H_2O$

Benzol: $2C_6H_6 + 15O_2 \rightarrow 12CO_2 + 6H_2O$



4.1. ábra. Az oxidáció egyszerűsített vázlata



4.2 . ábra. A metán oxidációja

Az oxidációt általánosságban szemléltető vázlatot a 4.1. ábra, a metán és oxigén reakcójának következtében történő átalakulást a 4.2. ábra mutat.

Égési sebesség:

- lassú égés: mm/másodperc sebességű lineáris terjedési sebesség (pl. izzás), valamint a rothadás, bomlás is lassú égési folyamat,
- normális égés: cm/másodperc sebességű,
- gyors égés: dm/másodperc sebességű (pl. tűzveszélyes folyadék égése),
- robbanás: 100–12 000 m/másodperc sebességű, melyen belül lehet
  - explózió: 100–1000 m/másodperc (pl. lőpor),
  - detonáció: >1000 m/másodperc (pl. brizáns robbanóanyagok).

Az éghető anyag az oxigéneloszlás különböző égési folyamatai során változik.

A diffúziós égéskor az égő anyag és az égést tápláló oxigén az égés előtt nem keveredtek, egymás mellett áramlanak, és egy felületen, a reakciózónában érintkeznek egymással (pl. folyadék felületi égése).

A kevert égéskor az éghető anyag és az égést tápláló oxigén már az égés előtt tökéletesen összekeveredik (pl. gázrobbanás).

Az égési vizsgálatoknál a koncentráció, mólfrakció, tömegfrakció fogalmakat használják leggyakrabban. A keverékeket bizonyos adatokkal kell jellemezni. A tüzelőanyag-levegő keverékek esetében az éghető keverékben ismerni kell pl. az A és a B komponens arányát, az ún. egyenérték- (ekvivalencia) arányt, amelynek a definíciója:

$$\Phi = \frac{(m_{fuel}/m_{air})}{(m_{fuel}/m_{air})_{st}} = \frac{(V_{fuel}/V_{air})}{(V_{fuel}/V_{air})_{st}},$$

ahol, az adott tüzelőanyag-keverékben „m" az adott anyag tömege, „V" a térfogata, „st" a sztöchiometrikus körülményekre utal. A levegő-tüzelőanyag egyenérték-arány: *AFR* (Air-Fuel Ratio).

$$AFR = \frac{1}{\Phi} AFR_{st}.$$

100% tüzelőanyagra $AFR = 0$ és $\Phi = \infty$, és 100% levegőre $AFR = \infty$ és $\Phi = 0$.

Az AFR_{st}-nek az oxidálószer sztöchiometrikus mennyiségének számítása a tökéletes elégéshez szükséges értéket határozza meg.

A szénhidrogének levegővel való teljes elégésekor az egyensúlyi egyenlet:

$$a\left(O_2 + \frac{0{,}79}{0{,}21}N_2\right) \rightarrow xCO_2 + \frac{y}{2}H_2O + \frac{a0{,}79}{0{,}21}N_2,$$

Minden kmol atmoszférikus levegőben közelítőleg 0,79 kmol N_2 és 0,21 kmol O_2 van. A C, H, és O összetevőket tartalmazó tüzelőanyagnál:

$$a = x + y/4.$$

A tömegre vonatkoztatott sztöchiometrikus AFR_{st}

$$AFR_{st} = \frac{a\left(MW_{O_2} + 0,79/0,21MW_{N_2}\right)}{MW_{\text{fuel}}}$$

az „a" értékkel a térfogati sztöchiometrikus AFR_{st}

$$AFR_{st,vol} = \frac{a\left(1+0,79/0,21\right)}{1}.$$

Az AFR bármely tüzelőanyagra értelmezhető. Például nagy oxigén- vagy nitrogéntartalmú tüzelőanyagnál (a különböző szenek általános képlete: $C_pH_qO_rN_s$) az O_2/N_2 arány különbözhet a levegőre vonatkozótól.

Az égéstermékek teljes égésnél

A reakciót általánosan felírhatjuk atmoszferikus levegőben (oxigénben) szegény ($\Phi < 1$), sztöchiometrikus ($\Phi = 1$) és gazdag ($\Phi > 1$) formában:

$$C_xH_y + \frac{a}{\Phi}\left(O_2 + \frac{0,79}{0,21}N_2\right) \rightarrow a_1CO_2 + a_2CO + a_3H_2O + a_4H_2 + a_5O_2 + \frac{a0,79}{\Phi 0,21}N_2.$$

A teljes égésnél: $a_2 = a_4 = 0$ (tüzelőanyag CO_2-vé és H_2O-vá oxidálódott. A C, H, és O atommérleg alapján $a_1 = x$, $a_3 = y/2$ és $a_5 = a(1 - \Phi)/\Phi$. Az $(1 - \Phi)/\Phi$ értéket az irodalomban légfelesleg-tényezőnek nevezik és többféle betűvel jelölik (pl. m, n, Φ stb.).

A levegőben gazdag égésnél a végtermék összetételét nem lehet egyszerűen kiszámolni, mert a CO és H_2 öszetevőket külön kell figyelembe venni.

Molhányad és tömeghányad

A keverékben, az „i" részösszetevő n_i kmol mennyiségének a teljes mennyiség kmol n_{tot}-hoz való viszonya adja az adott komponens molhányadát vagy térfogathányadát.

$$X_i = \frac{n_i}{n_{tot}}.$$

Y_i tömeghányad az i komponens tömegének az összes tömeghez viszonyított arányszáma.

$$\sum_{i=1}^{N} X_i = \sum_{i=1}^{N} Y_i = 1,$$

ahol N a keverékben az összetevők száma, az MW jelenti a keverék molekulasúlyát, Y_i meghatározható.

$$Y_i = X_i = \frac{MW_i}{\overline{MW}},$$

$$\overline{MW} = \sum_{i=1}^{N} X_i MW_i = \left(\sum_{i=1}^{N} \frac{Y_i}{MW_i} \right)^{-1}.$$

A kémiai reakcók folyamatában rendszerint a koncentráció fogalmát használják. A tömeg-, a momentum- és az energiamegmaradás törvényének használatakor, az égési problémák kutatásánál leggyakrabban a tömeghányad fogalmával találkozunk. Kísérleteknél legegyszerűbben a térfogati hányadok mérhetők.

$$C_i = \frac{n_i}{V} = \frac{X_i n_{tot}}{V}.$$

Ha a keverék teljes nyomása (P) és hőmérséklete ismeretes, akkor a koncentráció és a tömeghányad közötti kapcsolat:

$$C_i = \frac{X_i n_{tot}}{n_{tot} R^0 T / P} = X_i \frac{P}{R^0 T},$$

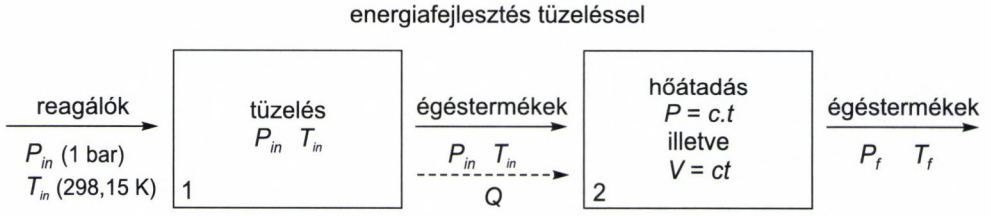
$$C_i = \frac{Y_i \overline{MW}}{MW_i} \frac{P}{R^0 T} = \frac{Y_i \rho}{MW_i},$$

ahol ρ a keverék sűrűsége.

$$\rho = \frac{P\overline{MW}}{R^0 T} = \sum_{i=1}^{N} \frac{P X_i MW_i}{R^0 T} = \sum_{i=1}^{N} X_i \rho_i,$$

ahol ρ_i a keverék egyes összetevőinek a sűrűsége.

Az adiabatikus lánghőmérséklet számításának elemzéséhez vázlat a 4. 3. ábrán látható. A paraméterek: P_{in} = 1bar, T_{in} = 298,15 K, Q jelentése a „tüzeléshő".



4.3. ábra. A tüzelőanyaghő hasznosításának folyamata

A T_f lánghőmérséklet meghatározásához állandó nyomásnál (c_p állandó) a következő közelítő összefüggés használható:

$$Y_{fuel}Q = c_p(T_f - T_{in})$$

A c_p azonban nemcsak a nyomástól, hanem a hőmérséklettől is erősen függ, ezért a hőmérséklethatárok között átlagos értékkel, vagy valamivel pontosabban végezhetjük el a számítást, ha több lépcsőre bontjuk a folyamatot.

Az égési reakciófolyamat lefolyásának vizsgálatakor első legfontosabb törvény az anyag megmaradásának törvénye. Az anyagnak energiává való átalakulása a nukleáris folyamatokhoz képest igen csekély, elhanyagolható.

A folyamat vizsgálata egydimenziós geometriában jól érthetően elvégezhető, de a jelenlegi számítástechnikával többdimenziós modellekkel a valóságos folyamatok jobban megközelíthetők. Hangsúlyozni kell azonban, hogy a tüzeléstechnikában a kísérletek elvégzése nélkülözhetetlen. A tömegmegmaradás képlete:

$$\frac{\partial(m_V Y_i)}{\partial t} = \dot{m}_i'' \Delta y \Delta z - (\dot{m}_i'' + \Delta \dot{m}_i'')\Delta y \Delta z + \dot{w}_i \Delta V,$$

ahol

a vizsgált térfogatban a keverék teljes tömege, $m_V = \rho \Delta x \Delta y \Delta z$

$m_V = (\text{kg})$

$Y_i = (-)$ az „i” komponens tömege,

$\rho = (\text{kg m}^{-3})$ a keverék sűrűsége,

$\dot{m}_i''(\text{kg m}^{-2}\,\text{s}^{-1})$ az „i” komponensnek egységnyi felületen, egységnyi idő alatt áramlott tömege, tömegfluxus,

$\dot{w}_i$ (kg m^{-3} s^{-1}) a kémiai rekció következtében a térfogategységben egységnyi idő alatt keletkezett komponens tömege.

A vizsgált térfogatban az „i" komponens megmaradási és hőmérsékleti viszonyainak paraméterei és egyenletei:

	$T + dT$
	$Y + dY$
T, Y, U	$U + dU$
ρ	$\rho + d\rho$
$m''i$	$m''i + dm''i$

$\rightarrow dV = dxdydz \rightarrow$

Ha a Δx tart a nullához, akkor az adott komponens megmaradási egyenletéhez jutunk:

$$\frac{\partial(\rho Y_i)}{\partial t} = -\frac{\partial \dot{m}_i''}{\partial x} + \dot{w}_i.$$

Ennek a parciális differenciálegyeletnek a tér és idő szerinti megoldásával a tömegfluxus és a kémiai változás előrehaladtának mértéke kifejezhető.

A korábbi egyenletek felhasználásával a folyadékok mechanikájában használt kontinuitási egyenlet is kifejezhető.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U)}{\partial x} = 0,$$

ahol U a keverék sebessége.

Nem a teljes tömeg vesz részt a reakcióban. Többkomponensű keverékek esetén a különböző kompenenseknek különböző a tömegmegmaradási egyenlete. Ezek a saját törvényszerűségeik szerint alakulnak át.

Tömegfluxus, tömegátvitel, a diffúzió Fick-törvénye

Minden komponens tömegfluxusa egy keveredés és egy diffúz részből tevődik össze.

$$\dot{m}_i'' = \dot{m}_{i,\,ADV}'' + \dot{m}_{i,\,DIFF}'',$$

$$\dot{m}_{i,\,ADV}'' = Y_i \dot{m}'' = Y_i \rho U,$$

$$\dot{m}_{i,\,DIFF}'' = -\rho D_i \frac{\partial Y_i}{\partial x}.$$

A diffúz tömegfluxust a Fick törvénye írja le, amely szerint a komponens tömegfluxusa arányos a komponenseloszlás gradiensével, azaz a koncentrációkülönbséggel.

A koncentrációkülönbség hatására létrejövő anyagáramlás-képességet a $D_i (m^2 s^{-1})$ diffúziós tényező jellemzi.

Az anyagáramlással az anyag által tartalmazott hő együtt áramlik, így közelítéssel felírható:

$$\rho D \frac{\lambda}{c_p},$$

ahol λ a hővezetési tényező.

A $\lambda/\rho D_{Cp}$ dimenzió nélküli szám, és Lewis (Le) névvel jellemzik.

A komponensekre érvényes részegyenlet – az általános komponensmegmaradási egyenletek felhasználásával – végső alakja is felírható:

$$\frac{\partial(\rho Y_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U Y_i)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\rho D \frac{\partial Y_i}{\partial x}\right) + \dot{w}_i.$$

Az egyenlet bal oldalán az első tag az „*i*" komponens felhalmozódása, a második a fluid keveredés általi anyagszállítás, a jobb oldal első tagja a diffúzió, a második a kémiai reakció folyamata.

4.1. Mérlegegyenletek

A továbbiakban fosszilis tüzelőanyagok égésével kapcsolatos alapvető egyenletekkel foglalkoznak.

Tüzelőhő, entalpiakülönbség

Állandó nyomású energiaátalakítás esetén – az égés és a maghasadás egyaránt állandó nyomáson megy végbe – a reakció során felszabaduló tüzelőhőt az égéstermékek és a reagensek entalpiakülönbségeiből számíthatjuk.

$$Q_{\dot{z}} = \Delta H_{\dot{Z}} = \sum_{j=1}^{p} H_j - \sum_{i=1}^{r} H_i,$$

amelyben itt $i = 1...r$ index a reakció reagenseire, $j = 1...p$ index pedig a reakció termékeire utal.

A tüzelőhőt elsősorban fosszilis tüzelőanyagok esetén használjuk. A tüzelőhő speciális esete az égéshő, ha a tüzelőanyagot tiszta oxigénben égetjük el. Abban az esetben, ha az égéstermékek között a víz folyadékfázisban van, akkor felső égéshő-

ről, ha pedig gőzfázisban van, akkor alsó égéshőről, egyszerűen fűtőértékről beszélünk. A tüzelőhő alapján a fűtőérték értelmezése:

$$h_{ü} = \frac{\Delta H_{é}}{m_{ü}} = \frac{\sum_{j=1}^{p} H_j - \sum_{i=1}^{r} H_i}{m_{ü}}$$

Reakcióhő, szabadentalpia-különbség.

A tüzelőanyag elégetésekor keletkező tüzelőhő ($Q_{ü} = \Delta H_{é}$) nem azonos a szabad entalpia változásával ($\Delta G_{é}$). A szabad entalpia változása és az állandó nyomáson (p = áll.) nyert tüzelőhő közötti kapcsolat izotermikus folyamat (T = áll.) esetén

$$\Delta G_{é} = \Delta H_{é} - T\Delta S_{é} = Q_{ü} - T\Delta S_{é},$$

ahol a reakció termékeinek és reagenseinek entrópiakülönbsége

$$\Delta S_{Z} = \sum_{j=1}^{p} S_j - \sum_{i=1}^{r} S_i$$

lehet nulla, pozitív vagy negatív. Ha $\Delta S_{é} \neq 0$, akkor

$$\Delta G_{é} \neq \Delta H_{é} = Q_{ü}.$$

Általában a szabad entalpia változása jó közelítéssel megegyezik a tüzelőhővel ($\Delta S_{é} = 0$). Szénhidrogének esetén a szabadentalpia-változás valamivel kisebb, mint a tüzelőhő. A $\Delta G_{é}$ szabadentalpia-változást gyakran a tüzelőanyag exergiájának is nevezik. A tüzelőanyag exergiája általánosan nem egyezik meg a tüzelőhővel.

A szabad entalpia változását értelmezhetjük az égésre, illetve a maghasadásra, és ennek alapján a két hőtermelő folyamat között bizonyos hasonlóság van.

A kémiai hőtermelés (égés) folyamatára közvetlenül felírhatjuk, hogy a tüzelőanyag veszteségmentes elégetésekor felszabaduló kémiai energia az égéstermékek és a reagensek szabadentalpia-megváltozásaival egyenlő.

Az égéshő és az adiabatikus égési hőmérséklet

Az égéshő az a hőmennyiség, amely a tüzelőanyag egységnyi tömegének sztöchiometrikus körülmények közötti elégésekor felszabadul, és az égéstermékek paraméterei 298,1 K és 1 bar. A hőmennyiség és a gázparaméterek ismeretében a termodinamika első főtörvényének alkalmazásával számítható az égés T_f elméleti hőmérséklete.

$$\left[\sum_{i=1}^{N} n_i \bar{h}_i(T_{in})\right]_{reac} + Q = \left[\sum_{i=1}^{N} n_i \bar{h}_i(T_f)\right]_{prod},$$

ahol n_i az i összetevő mól mennyisége és h_i a molekuláris entalpia. A számításokat az összes összetevőre el kell végezni és összegezni. Ha a rendszer nem adiabatikus, a lánghőmérséklet alacsonyabb lesz.

A közvetlen hőtermelés energetikai jellemzői

A közvetlen hőtermelést a hatásfokkal lehet jellemezni, amely a szekunder energiaként előállított Q hő és a primer energiaként felhasznált $Q_{ü}$ tüzelőhő aránya.

$$\eta = \frac{Q}{Q_{\dot{z}}}.$$

Gyakran ennek reciprokát, a fajlagos tüzelőhőfelhasználást használják,

$$q = \frac{Q_{\dot{z}}}{Q} = \frac{1}{\eta},$$

amely dimenziótlan és dimenziós érték lehet attól függően, hogy a számlálóban és a nevezőben szereplő energiákat azonos vagy eltérő mértékegységben adják meg. (Az SI alapegységek következetes használata esetén q természetesen dimenziótlan.)

A kazán hatásfokát kétféle módon értelmezhetjük és határozhatjuk meg méréssel. A kazánhatásfok (mennyiségi hatásfok)

$$\eta_{mH} = \frac{Q_H}{Q_{\dot{z}}} = \frac{m(h_{ki} - h_{be})}{mh_{\dot{z}}}$$

direkt meghatározásához a hőtermelés oldalán mérni kell a hőhordozó (gőz vagy forró víz) m tömegáramát, h_{be} fajlagos belépő és h_{ki} kilépő entalpiáját, a hőbevitel oldalán pedig a felhasznált tüzelőanyag $m_{ü}$ tömegáramát és alsó fűtőértékét. A szükséges mérések egyszerűbbé válnak, ha a kazánhatásfokot a kazán veszteségeiből indirekt módon határozzák meg.

$$\eta_{mH} = 1 - (v_{\acute{e}} + v_w + v_{fg} + v_f + v_s) = 1 - \sum v_i.$$

Az összefüggésben

- $v_{\acute{e}}$ az éghető veszteség
- v_w a tökéletlen égés vesztesége
- v_{fg} a kilépő füstgázzal távozó hőveszteség
- v_f a füstgázon kívüli égéstermékek fizikai hővesztesége
- v_s a sugárzási veszteség.

A veszteségek közül legjelentősebb a füstgázveszteség, amelyet a légfelesleg és a füstgáz kilépő hőmérséklete befolyásol.

A szénelgázosítás néhány fontosabb reakciója:

$$C + H_2O = CO + H_2$$

$$C + CO_2 = 2CO$$

$$C + \frac{1}{2}O_2 = CO$$

$$CO + H_2O = CO_2 + H_2$$

$$CO + 3H_2 = CH_4 + H_2O$$

$$C + 2H_2 = CH_4$$

Az összefüggések szerint elgázosításhoz a szénen kívül oxigénre és H_2O-ra (vízgőzre) van szükség. A keletkező gáz fontosabb éghető elemei: CO, H_2 és CH_4. A nyert gáz fűtőértékét befolyásolja a szén összetétele, elsősorban illótartalma, az elgázosítás nyomása, illetve hőmérséklete és az, hogy az elgázosításhoz szükséges oxigént tisztán vagy levegővel visszük-e be.

Erőművi alkalmazás esetén (ha a gázt nem kell nagy távolságra szállítani) levegővel és vízgőzzel történő gázosítás jöhet szóba. Az alkalmazott megoldások fix ágyas, fluidágyas és átáramlásos rendszerűek. A szén kívánt szemcsézete fix ágy esetén durva lehet (3...30 mm), fluidágynál 1...5 mm, átáramlásos rendszerben pedig finomnak (<0,1 mm) kell lennie. A nyomás és hőmérséklet a kialakítástól is függően széles határok között változik (p = 10...100 bar, T = 800...1000 °C vagy > 1500 °C).

Az elgázosítás során a szén kéntartalma kénhidrogénné alakul. Ez lényegesen egyszerűbben választható le, mint a hagyományos kazánok füstgázaiból az ott keletkező kén-dioxid.

A fosszilis tüzelőanyagok elégetésekor az éghető anyag oxigénnel egyesül, és az exoterm reakció során hő szabadul fel. Az égés folyamatát sztöchiometriai egyenletek írják le. A reakciók során a tömegszám nem változik, csak a molekuláris kötések rendeződnek át. A fosszilis energiahordozók égésekor (szén, szénhidrogének), a szénhidrogén tökéletes égését leíró általános sztöchiometriai egyenlet

$$C_nH_m + \left(n + \frac{m}{4}\right)O_2 = nCO_2 + \frac{m}{2}H_2O$$

és ennek alapján karbon, metán, propán és bután esetén sorra:

$$C + O_2 = CO_2$$

$$H_2 + \frac{1}{2}O_2 = H_2O$$

$$CH_4 + 2O_2 = CO_2 + 2H_2O$$

$$C_3H_8 + 5O_2 = 3CO_2 + 4H_2O$$

$$C_4H_{10} + \frac{13}{2}O_2 = 3CO_2 + 5H_2O$$

Kéntartalmú tüzelőanyagokban a kén égése is szerepet játszik a hőtermelésben, de hatása elsősorban a környezetszennyezésben jelentősebb.

$$S + O_2 = SO_2$$

Az égés folyamatában jelen vannak olyan komponensek is, amelyek nem lépnek reakcióba. Ilyen komponens a levegő nitrogéntartalma, mert a tüzelőanyagokat általában nem tiszta oxigénben égetjük el. A karbon levegőben történő tökéletes elégetésének sztöchiometriai egyenlete

$$C + O_2 + 3{,}764\ N_2 = CO_2 + 3{,}764\ N_2.$$

Égési tömegegyenletek

A szénégés tömegegyenletei:

$$C + O_2 = CO_2\ [(12\ kg\ C) + (32\ kg\ O)] = (44\ kg\ CO_2).$$

A hidrogénégés tömegegyenlete:

$$2\ H_2 + O_2 = 2\ H_2O\ [(4\ kg\ H) + (32\ kg\ O)] = (36\ kg\ H_2O).$$

A kénégés tömegegyenlete:

$$S + O_2 = SO_2\ [(32\ kg\ S) + (32\ kg\ O)] = (64\ kg\ SO_2).$$

Figyelembe véve, hogy egy mol oxigén esetén 3,764 mol nitrogén van jelen az égésnél, a valóságos égési folyamatban, a tüzelőanyag teljes elégéséhez, a folyamat során a sztöchiometrikus mennyiségnél többet kell használni, ún. légfelesleggel történő tüzelésről van szó. Ezt a légfelesleg-tényezővel fejezzük ki:

$$n = \frac{L}{L_o}.$$

A légfelesleg tényezőjének megfelelően több levegő (L) vesz részt a reakcióban, mint amennyire elméleti esetben lenne szükség (L_o). Ennek megfelelően nő az oxigén és a nitrogén mennyisége. Az égést az SO_2 keletkezésén kívül további környezetszennyező reakciók, például NO_x-képződés kísérik.

Minden tüzelőanyagra jellemző az a maximális hőmérséklet, amely a tüzelőanyagok elméleti levegőszükséglettel való elégetése során keletkezik, ha az égés tökéletesen hőszigetelt térben történne és nem lennének a gyakorlatban mindig fellépő veszteségek. „Elméletinek" nevezik azt a levegőmennyiséget, amely a tüzelőanyag éghető komponenseinek tökéletes elégéséhez sztöchiometriailag szükséges.

A szénnek szén-monoxiddá való elégése nem tökéletes égés, mert a CO még éghető gáz. A tüzelőanyagban levő teljes energiamennyiség kinyeréséhez a széntartalmat CO_2-vé kell elégetni. Az égéshez szükséges oxigént legtöbb esetben a levegőből nyerjük, mely 21% O_2-t és 79% nitrogént tartalmaz. Ha ismerjük a tüzelőanyag elemi összetételét, az égés kémiai egyenletei felhasználásával az égéshez szükséges O_2, illetve ebből a levegő mennyisége az úgynevezett „elméleti" levegőmennyiség meghatározható.

Tüzelőberendezésekben a tökéletes égés biztosítása mellett a lehető legkisebb légfelesleggel kell tüzelni, mert különben a füstgázzal sok hőmennyiség távozik. A légfelesleg-tényező (n) szilárd tüzelőanyagoknál nagyobb, olajféleségeknél kisebb, és gáznál a legkisebb.

Ha a tüzelőanyag éghető elemeinek égéséhez nem biztosítunk elegendő O_2-t, akkor nemcsak CO, hanem metán, hidrogén és korom is lehet az égéstermékekben, amelyek nagy éghető veszteséget jelentenek. Leggyakrabban szén-monoxid (CO) jelenik meg a füstgázban, ha nem a kellő légfelesleggel üzemeltetjük a tüzelőberendezést, és ez nagyon mérgező gáz.

Légfelesleg-tényezők gyakorlati értékei:	n
Kőszén, kézi tüzelés esetén:	1,7–2,0
Kőszén, vándorrostélyon:	1,4–1,7
Barnaszén kézi tüzelésnél:	1,5–1,8
Barnaszén, vándorrostélyon:	1,3–1,4
Barnaszén, szénportüzelésnél:	1,15–1,3
Olajtüzelésnél:	1,1–1,2
Gáztüzelésnél:	1,02–1,2

A legkisebb füstgázveszteséggel a gáz tüzelhető, mert ott csak 2–20%-kal több levegőt kell bevezetni az elméletihez viszonyítva.

A metán égése

A tüzeléstechnikai folyamatokat a gyakorlat számára a következő égési alapreakciókkal közelítik:

$$C + O_2 + \left(\frac{79}{21} O_2 \text{ mólok száma}\right) N_2 = CO_2 + \left(\frac{79}{21} O_2 \text{ mólok száma}\right) N_2,$$

$$2H_2 + O_2 + \left(\frac{79}{21} O_2 \text{ mólok száma}\right) N_2 = 2H_2O + \left(\frac{79}{21} O_2 \text{ mólok száma}\right) N_2,$$

$$S + O_2 + \left(\frac{79}{21} O_2 \text{ mólok száma}\right) N_2 = SO_2 + \left(\frac{79}{21} O_2 \text{ mólok száma}\right) N_2.$$

A tüzelési folyamatban a nem kívánt termékek részben energetikai veszteséget okoznak, vagy károsak. Ilyenek a:

- korom: karcinogén,
- szén-monoxid: mérgező,
- nitrogén-oxidok: a talaj közeli ózonkoncentrációt növeli (mérgezés),
- szénhidrogének: üvegházhatás.

A tüzelőanyag elemi összetételének vagy a tüzelőanyagot alkotó szénhidrogén (CH) vegyületek és mennyiségük ismeretében számítható az elméleti levegőigény:

$L_0(Nm^3/Nm^3)$ = a tüzelőanyag egységnyi mennyiségének tökéletes elégetéséhez szükséges levegőmennyiség a tüzelőanyag C, H és S tartalmának égése mellett. Földgáz (100% metán) esetén:

$$CH_4 + 2O_2 + \left(\frac{79}{21} O_2 \text{ mólok száma}\right) N_2 = CO_2 + 2H_2O + \left(\frac{79}{21} O_2 \text{ mólok száma}\right) N_2.$$

Az elméleti száraz füstgáz csak szén- és kén-dioxidot és nitrogént tartalmaz, a nedves füstgáz vízgőzt is. Az elméleti füstgáz mennyiségét a tüzelőanyag egységnyi mennyiségére számítjuk (m^3/kg).

A földgáz összetételének ismeretében számítható, vagy egy köbméterének, vagy egy kilogramm tömegének elégetésekor keletkező füstgáz mennyisége:

$$V_0^{sz} = CO_2 + SO_2 + N_2 \left[\frac{Nm^3}{Nm^3}\right].$$

Amennyiben a földgáz nem tartalmaz kénvegyületeket és 100%-ban metánként számoljuk:

$$V_0^{sz} = CO_2 + N_2 \left[\frac{Nm^3}{Nm^3}\right].$$

Az elméleti nedves füstgáz a szén-dioxidon, kén-dioxidon és nitrogénen kívül vízgőzt is tartalmaz:

$$V_0^n = CO_2 + SO_2 + H_2O + N_2 \left[\frac{Nm^3}{Nm^3}\right].$$

Amennyiben a földgáz nem tartalmaz kénvegyületeket és 100%-ban metánnak tekintjük:

$$V_0^{sz} = CO_2 + H_2O + N_2 \left[\frac{Nm^3}{Nm^3}\right].$$

A légfelesleg-tényező (n) a ténylegesen felhasznált levegő (L) és az elméleti levegőmennyiség (L_0) hányadosa, ezért a légfelesleg-tényezőt a füstgáz oxigén- és szén-dioxid-koncentrációjának ismeretében egyaránt kiszámíthatjuk. A mérésnél a füstgáz oxigéntartalmát határozzuk meg, ezért a O_2-koncentráció alapján a légfelesleg-tényező:

$$n = \frac{L}{L_0} \left[\frac{m^3/m^3}{m^3/m^3}\right],$$

amely elhanyagolásokkal az

$$n = \frac{21}{21 - O_{2\,mért}}, \text{ vagy pontosabban az}$$

$$n = 1 + \left[\frac{V_0^{sz}}{L_0} \cdot \frac{O_{2\,mért}}{21 - O_{2\,mért}}\right] \text{ összefüggés alapján számolható.}$$

A ténylegesen képződő füstgázmennyiség (V^{sz}, V^n) a gyakorlatban meghaladja az elméleti füstgáz mennyiségét, amely méretezési és üzemviteli szempontból is fontos.

Ténylegesen keletkező száraz füstgázmennyiség:

$$V^{sz} = V_0^{sz} + L_0(n-1)\left[\frac{Nm^3}{Nm^3}\right].$$

Ténylegesen keletkező nedvesfüstgáz-mennyiség:

$$V^n = V_0^n + L_0(n-1)\left[\frac{Nm^3}{Nm^3}\right].$$

Tüzelőanyagok eltüzelésénél nem nyerhető ki teljesen hasznos hő formájában kémiai energiájuk. A veszteségek a tüzelőberendezés kiképzésétől, a tüzelőanyagtól, annak szemnagyságától, porlasztásától, a tűztér szigeteltségétől, a levegőbevezetéstől, a tüzelőanyag és levegő keveredési lehetőségeitől stb. függ. A füstgázzal távozó hőn kívül a tüzelőberendezések hőt sugároznak a környezet felé, ami ugyancsak veszteség. A salakban maradó, el nem égett szénszemcsék a salakéghető veszteséget, a füstgáz éghetőgáz- (CO, H_2, CH_4, stb.) tartalma elégetlengáz-veszteséget okoz.

4.2. Reakciókinetika

A reakcióban különböző résztvevőkkel a teljes rekciófolyamat:

$$r_a = r_{a1} + r_{a2} + r_{a3} = -k_1 C_a C_b - k_2 C_a C_c + k_3 C_d C_e$$
$$r_b = -k_1 C_a C_b$$
$$r_c = k_1 C_a C_b - k_2 C_a C_c + k_3 C_d C_e$$
$$r_d = r_e = k_2 C_a C_e - k_3 C_d C_e$$

A független sebességi egyenletek száma megegyezik a független sztöchiometrikus egyenletek számával. A példában két reakció és három reverzibilis reakció van, ezért csak két sebességi egyenlet független. Néhány reakció csak látszólag jelent külön sztöchiometrikus egyenletet.

A reakcióban részt vevő összes komponensből a kulcskomponensek számának megfelelő független sztöchiometriai egyenlet létezik. A kulcskomponenseknek megfelelő számú sebességegyenlet lesz a reakcióban. Egyetlen egyenlet kapcsolódik minden résztvevőhöz. Többszörös reakciónál a folyamat a résztvevők koncentrációjától függően indul, és a reakciók követik egymást. A közbenső koncentrációk az adott komponenshez tartozó reakcióval határozhatók meg. A koncentrációk alakulásától függően indul a sorozatban a következő.

Három párhuzamosan futó reakció elemzése (Walas 1999).

$$A+2B \rightarrow^{1} 3C$$

$$A+C \rightarrow^{2} 2D$$

$$C+D \rightarrow^{3} 2E$$

ahol *A, B* és *C* a kulcsösszetevők.

A reakcióban részt vevő komponensek tömege arányos a komponens koncentrációjával.

$$v_a A + v_b B + v_c C + \cdots \Rightarrow v_r R + v_s S + \cdots$$

Több komponens esetén az egyedüli reakció egyenleteit lehet felhasználni.

$$\frac{x}{v_a} = \frac{n_{a0} - n_a}{v_a} = \frac{n_{b0} - n_b}{v_b} = \cdots = -\frac{n_{r0} - n_r}{v_r} = -\frac{n_{s0} - n_s}{v_s} =$$

$$C_a = \frac{n_a}{V} = \frac{n_{a0} - x}{V}, \quad C_b = \frac{n_{b0} - v_b x / v_a}{V}, \quad C_c = \frac{n_{c0} - v_b x / v_a}{V},$$

tehát

$$C_b = C_{b0} = \frac{v_b}{v_a}(C_{a0} - C_a),$$

$$C_c = C_{c0} = \frac{v_c}{v_a}(C_{a0} - C_a).$$

Az *A, B* és *C* kulcskomponensekre érvényes egyenletek:

$$A_0 - A_1 = \frac{B_0 - B}{2} = \frac{C_1 - C_0}{3},$$

$$A_1 - A = C_1 - C_2 = \frac{D_2 - D_0}{2},$$

$$C_2 - C = D_2 - D = \frac{E - E_0}{2}.$$

A koncentrációk 1 és 2 index jelöléseit elhagyva, a *D* és *E* értékek megtalálhatók az *A, B* és *C* kifejezésekben. Ugyanezt az eredményt el lehet érni az úgynevezett *xyz* módszerrel. Az első reakcióban az összes változás *x*, a másodikban *y*, és a harmadikban *z*. A korábbi példát bemutatva az új módszerrel:

$$A = A_0 - x - y$$

$$B = B_0 - 2x$$

$$C = C_0 + 3x - y - z$$

$$D = D_0 + 2y - z$$

$$E = E_0 + 2z$$

Az *x, y* és *z* kiküszöbölésével a keletkezett termékek:

$$D_0 - D = -3(A_0 - A) + 3(B_0 - B)$$

$$E_0 - E = 2(A_0 - A) - 4(B_0 - B) - 2(C_0 - C)$$

A három komponensre a differenciálegyenlet:

$$dA/dt = -k_1AB^2 - k_2AC$$

$$dB/dt = -2k_1AB^2$$

$$dC/dt = 3k_1AB^2 - k_2AC - k_3CD =$$
$$= 3k_1AB^2 - C\{k_2A + k_3[D_0 + 3(A_0 - A) - 3(B_0 - B)]\}$$

Az *A, B* és *C* egyenleteket mint időfüggvényeket numerikus módszerrel megoldják, utána a *D* és *E* algebrai alakban rendelkezésre áll. Más módon öt differenciálegyenletet lehet felírni, és az öt résztvevőnek az időfüggvényét meg lehet oldani. Elkerülhető a sztöchiometrikus mérlegegyenletek használata, mert a differenciálegyenletek azokat is magukban foglalják.

A kémiai reakciókra írható Arrhenius-egyenlet képlete, a reakciósebességi állandó, egy kémiai reakció mértékének egyszerű és meglehetősen pontos meghatározása. Az egyenlet először a holland vegyész J. H. van 't Hoff javasolta 1884-ben, majd öt évvel később, 1889-ben a svéd kémikus, Svante Arrhenius fizikailag indokolta és értelmezte. Jelenleg is ez a legjobbnak tekinthető empirikus összefüggés. Az Arrhenius-egyenlet, a „*k*" reakciókinetikai állandóval a kémiai reakcióknak a hőmérséklettől (*T* abszolút hőmérsékletben, Kelvinben vagy Rankine-fokban kifejezve) való függését határozza meg. A reakciókra jellemző egy „E_a" aktiválási energia is.

$$k = Ae^{-Ea/RT},$$

ahol „*A*" pre-exponenciális faktor és *R* a gázállandó.

Az „*A*" prefaktor dimenziója megegyezik a reakciósebesség-állandó dimenziójával, és a reakció rendjétől függően változik. Első rendű reakciónál, gyakran a reakció frekvenciafaktorának is nevezik. A „*k*" a reakciót eredményező másodpercenkénti ütközések száma, *A* az összes másodpercenkénti ütközések száma (létrehoz reakciót, vagy nem), és $Ae^{-Ea/RT}$ a valószínűsége annak, hogy az adott számú ütközés reakciót eredményez.

Ha az aktiválási energiát molekulaegységben adják meg a mólegység helyett, azaz joule/molekula a joule/mol helyett, akkor a gázállandó helyett a Boltzmann-állandót kell használni. Bármikor a hőmérséklet-növekedés vagy az aktiválásienergia-csökkenés (pl. katalizátor használatakor) a reakciósebesség növekedését eredményezi.

Az alacsony hőmérséklet-tartományban az aktiválási energia és az exponenciális előtti tényező nagyon kismértékben függ a hőmérséklettől, ezért ez a függés az exponenciálishoz exp(*–Ea/RT*) képest elhanyagolható. A diffúzióvezérelt reakcióknál

azonban maga az exponenciális előtti tényező a meghatározó, és erősen hőmérsékletfüggő.

A pre-exponenciális tényező hőmérsékletfüggését azonban sok kutató jelentősnek tartotta valamilyen formában kifejezni. Az Arrhenius által önkényesen meghatározott függés terjedt el leginkább. A módosított egyenlet:

$$k = A(T/T_0)^n e^{-Ea/RT},$$

ahol T_0 a referencia-hőmérséklet, „n" pedig figyelembe veszi a folyamat lefolyásának erősségét. Az eredeti Arrhenius-egyenletben $n = 0$. Az állandó „n" értékének tartománya $-1 < n < 1$ a reakciógörbe meredekségétől függően. Az „n" értékének kutatása során nem látták elégé megalapozottnak az elméletileg lehetséges „n" függvény megállapítását, a reakciótól függően különböző értékek adódtak, de gyakorlati tapasztalatok alapján leginkább a $T^{½}$ függést látták legelfogadhatóbbnak. A sűrűségfüggés is felmerült.

Más módosítási javaslatnál az exponenciálison belül vezettek be egy újabb hatványkitevőt:

$$k = A\exp\left[-\left(\frac{E_a}{RT}\right)^{\beta}\right],$$

ahol a β az adatoknak a modellhez való illesztését segíti, elméletileg az aktiválási energia tartományát jellemzi.

Az Arrhenius-egyenlet természetes logaritmustartománya:

$$\ln(k) = \frac{-E_a}{R}\frac{1}{T} + \ln(A).$$

Ha a reakciósebesség-állandó követi az Arrhenius-törvényt, azaz $\ln(k)$ és T^{-1}. Ellentétesen változik a diagramegyenes, és meghatározható az E_a és A.

Az aktiválási energia (–R)-szerese az $\ln(k)$-nak az $(1/T)$ szerinti differenciáljával.

$$E_a \equiv -R\left[\frac{\partial \ln k}{\partial(1/T)}\right]_P.$$

Az Arrhenius-egyenletet elméletileg a Maxwell–Boltzmann statisztikai mechanikai eloszlás segítségével is értelmezni lehet. A molekulának T abszolút hőmérsékleten az E_a aktiválási energiánál nagyobb energiával kell rendelkeznie, hogy reakció jöhessen létre.

A Max Trauts és William Lewis 1916–1918-ban kidolgozott ütközéses elmélete szerint a reakcióhoz a molekuláknak a középpontjukat összekötő egyenes mentén az E_a értéket meghaladó relatív energiával kell rendelkezniük. A kifejezés nagyon hasonlít az Arrhenius-egyenlethez.

Az átmeneti állapot elméletét Wigner, Eyring, Polányi, Evans 1930-ban fogalmazták meg. A leginkább elterjedt formája:

$$k = \frac{k_B T}{h} e^{\frac{\Delta G^{\ddagger}}{RT}},$$

ahol $\Delta G^{\ddagger}$ az aktiválás Gibbs-féle szabad energia, k_B a Boltzmann-állandó és „h" a Planck-állandó.

A képletben a pre-exponenciális tényező lineárisan függ a hőmérséklettől. A szabad energia hőmérsékletfüggő. A pontosabb hőmérsékletfüggés megállapításához a statisztikus mechanikát veszik segítségül, és a reakcióba lépő anyagok sajátosságait is.

Az Arrhenius-egyenletben szereplő aktiválási energiát és a „k" reakciósebességi állandót kísérletileg határozzák meg, és mindkét jellemző makroszkopikus, reakciósajátos paramétereket képvisel. Nem egyszerű molekuláris szinten megismerni az energiaküszöböt és az eredményes ütközési feltételeket. Az A és a B molekula ütközésekor annak a valószínűsége, hogy AB molekula keletkezik, függ az ütközés szögétől, a relatív transzlációs energiától, a belső energiától. Az E- és k-mérések sokféle ütközést és paramétert eredményeznek.

A kémiában az aktiválási energia fogalmát 1889-ben Svante Arrhenius vezette be, a dimenziója: kilojoule/mol. Definíciója szerint az a minimális energia, amely a reakció megindulásához szükséges. Gyakran energiaküszöbnek is nevezik. A reakcióhoz megfelelő számú molekula szükséges, amelyek az aktiválási energiával egyenlő vagy nagyobb energiával rendelkeznek.

Néha a reakció sebessége a hőmérséklet növekedésével lassul. Ha az Arrhenius-összefüggést használjuk, akkor ez negatív reaktiválási energiának felel meg (E_a).

A molekulabefogással végbemenő reakciók tipikusan negatív aktiválási energiával rendelkeznek. A hőmérséklet növekedésével az egyik molekulának a másik által való befogásának valószínűsége csökken. Az ütközési keresztmetszet csökken a hőmérséklet növekedésével.

Az Arrhenius-egyenletből számszerűleg is kiszámítható az aktiválási energia:

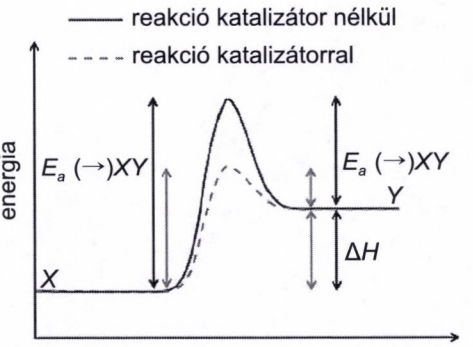
$$E_a = -RT \ln\left(\frac{k}{A}\right).$$

Az „A" pre-exponenciális tényezőt frekvenciafaktornak is szokás nevezni. A „k" a reakciósebességi állandó.

A reakciók lefolyását katalizátorokkal módosítani lehet. A katalizátor befolyásának energiaviszonyait a reakció folyamatában a 4.6. ábra mutatja.

A katalizált reakciónál az entalpianövekedés (ΔH) változatlan, de az aktiválási energia értéke (E_a) lecsökken. A reakció elindulásához szükséges energiacsúcs helyzete változik.

Sokféle katalizátortípus létezik. Különböző fémek, de biológiai lények is lehetnek katalizátorok. A katalizátor segíti a reakció lefolyását, míg maga nem vesz részt abban. A katalizátor csökkenti az aktiválási energiát, de a reakció eredményeként keletkezett hő és termék nem változik.



4.4. ábra. A katalizátornak a reakciófolyamatra gyakorolt módosító hatása

A kémiai kinetikában tehát a folyamatot a reakciósebességgel és a reakciósebesség-állandóval jellemezzük. A reakciósebesség koncentrációfüggését a koncentráció különböző hatványaival való szorzással fejezzük ki. A hatványkitevő értéke a reakció rendjét jelenti. A zérorendű reakció független a koncentrációtól. Léteznek első-, másodrendű stb. reakciók. A folyamatos reakcióknál találunk meghatározó lépést, amely meghatározza a reakció kinetikáját is. A reakció aktiválási energiáját kísérletileg az Arrhenius-törvénnyel és az Eyring-törvénnyel határozzák meg. A legfontosabbak: a reagáló anyagok fizikai jellemzői, az anyagok koncentrációi, a hőmérséklet, és hogy van-e, vagy nincs-e katalizátor.

4.3. Általános égésegyenlet szilárd, folyékony és gázösszetételű tüzelőanyagra

A szilárd, illómentes tüzelőanyagok égésmechanizmusa a heterogén kémiai reakciók törvényszerűségei szerint játszódik le. A szilárd fázisú tüzelőanyag és a gázfázisú oxigéntartalmú levegő rendkívül bonyolult közbenső fázisokon keresztül, de alapvetően a szilárd tüzelőanyag felületén, esetenként belső és külső felületen heterogén folyamatként játszódik le. A reakciósebesség nagyságrenddel alacsonyabb, mint a homogén gázreakciók esetén. Ennek folytán a tűzterekben a tüzelőanyagok a reakciók lassúbb lefutása miatt hosszabb időt töltenek el, mint a szénhidrogének eltüzelése esetén. Mivel a természetben a szenek bonyolult szerves vegyületek halmazából és szervetlen ásványi anyagokból, esetleg különböző fázisú inert

anyagokból állnak, ezért a természetes szenek elégetése bonyolultabb, mint amit az általánosítható egyenletek leírnak. Az égés különböző fázisaiban mind a homogén, mind a heterogén reakciók esetenként megtalálhatók, sőt egyes fázisokban egyik vagy másik kizárólagosan döntő lehet. A szilárd tüzelőanyagok heterogén égési folyamatánál a reakciópartnerek egyike, jelen esetben az oxigén konvekció és diffúzió útján kerül a szilárd felülethez, rendkívül bonyolult közbenső átalakulási folyamatok során.

Ha a szenek viselkedését tüzelés közben megvizsgáljuk, úgy jellemző fizikai-kémiai folyamatokat találunk. Ezek a részfolyamatok darabos vagy finom szemcsék elégetése esetén egyaránt megtalálhatók, csak a folyamatok sebességében vannak nagyságrendi különbségek. Ennek folytán a szenek égésénél az alábbi részfolyamatokat kell figyelembe vennünk:

- a szénszemcse felmelegedése, a felületi és hidroszkopikus nedvesség elpárologtatása,
- az illótartalom kigázosodása kokszképződés mellett,
- az illó égése a homogén kémiai reakciók szerint,
- a koksz gyulladása és égése a heterogén reakciók szerint,
- salak- és hamuképződés, esetleg hőcserefolyamat mellett.

Gondot okoz a természetes szénfajták égés közbeni viselkedése, ahol számos tényezőnek lehet kedvező vagy kedvezőtlen befolyása. Az általános értékmérőként használt fűtőérték vagy égésmeleg legfeljebb az energetikai értékeihez nyújt támpontot, valamint ideális körülmények között a reakcióhő megegyezik a primer füstgáz entalpiájával.

A szenek égésmechanizmusának vizsgálatát a reakciókinetikai módszerekkel általában az egyedi szénszemcsére vonatkoztatva végzik el. A laboratóriumi módszerek, valamint az elméleti megfontolások előnyösnek vélik ezeket a vizsgálati módszereket. A műszaki irodalom döntően ilyen megközelítésben tárgyalja a szilárd tüzelőanyagok égését.

A korai égésmodellek azzal a feltételezéssel élnek, hogy az oxidáció a külső felületen játszódik le. Az 1964–68 közötti, részletesebb kísérleti vizsgálatok világosan rámutattak arra, hogy a kőszén kokszszemcséin belül nagy üregek vannak, és a pórusokon keresztül az oxigén be tud hatolni a széngömb belsejébe.

A kokszszemcsék belső struktúrájának összetettsége és változatossága érthetően nehezíti az általánosítható következtetések, egyértelmű matematikai modellek felállítását.

A különböző minőségű kőszenek kokszszemcséinek égését vizsgálva két fő típus különböztethető meg, a duzzadó és a nem duzzadó szenek kategóriája.

A nem duzzadó (gyengébb minőségű) szenek kokszszemcséinek átmérője és látszólagos tömegsűrűsége egyaránt csökken a kiégés előrehaladtával. Ez annak

következménye, hogy a 23–72 μm kezdeti, közepes átmérőjű szemcséknél a külső geometriai és a belső pórusfelületeken fellépő égés sebessége összemérhető mértékű.

Duzzadó szenek kokszszemcséinek közepes sűrűsége nő. Ez a növekedés azért is jelentkezhetett, mert a mintában lévő igen kis sűrűségű szemcsék igen gyorsan kiégtek. A belső és külső égés tekintetében következtetések nem vonhatók le.

Speciális optikai mérőeszközt fejlesztettek ki az égő szemcsék pillanatnyi hőmérsékletének meghatározására. A szemcsére felírható hőmérleget használták fel az előbbi kérdés eldöntésére. Ha ugyanis a reakciótermék CO_2, úgy a reakcióhő 33 000 kJ/kg (7900 kcal/kg), míg CO esetén ez mindössze 9781 kJ/kg (2340 kcal/kg). E jelentős hőforráskülönbségek esetén jelentősek a hőmérlegből adódó egyensúlyi szemcsehőmérséklet-különbségek.

Az eredmények azt mutatják, hogy a mért hőmérsékletek a CO-produkció esetére számított hőmérsékletekhez állnak közelebb. A hőmérsékletszint emelésével a CO-keletkezés csaknem biztossá válik. Ha viszont ez a helyzet, akkor a CO homogén fázisban ég el a szemcse határrétegében, és nem hat vissza a szemcsehőmérséklet alakulására.

A kísérletek során a gázmintában CO jelenlétét nem tudták kimutatni (0,01%). Ennek oka valószínűleg az, hogy a CO csaknem tökéletesen elég a kokszszemcsefelület közelében. A reakciók sebessége az oxigén parciális nyomásával arányosnak adódott feketekőszénre és antracitra. A barnakőszén-koksz égését vizsgálva a mérési pontok szórása lecsökken, ha feltételezik azt, hogy a reakció sebessége az oxigén parciális nyomásának négyzetgyökével arányos.

A konstrukciós megoldások mind a régebbi, üzemelő kazánoknál, mind az új berendezéseknél számos lehetőséget biztosítanak a környezetszennyezés csökkentésére.

A szén égése

A szénégés folyamata fenomenálisan a következő részfolyamatokra tagolható: száradás, illófelszabadulás, illóégés és kokszégés.

Az illóként kezelt anyagok és az illóként viselkedő összetevők ($C_xH_yO_z$) dekompozíciója, nagyon gyors reakcióval megy át gázfázisba. A nehéz szénhidrogének (TAR), C_mH_n C/H és molaránya 1,1, a dekompozíciójánál például korom és részben oxidálódott karbon, CO és H_2 keletkezik (Vascellari 2012).

$$C_mH_n + \frac{m}{2}O_2 \xrightarrow{k_{r1}} mCO + \frac{m}{2}O_2.$$

Ha a koromképződést nem számítjuk, akkor a TAR (szurok, kátrány) dekompozíciója elsőrendű reakció.

A közelítő számításokhoz a homogén, gázfázisú reakciókat (illó- és gázégés), egyszerűsített kinetikai mechanizmussal írhatjuk le:

$$CH_4 + \frac{1}{2}O_2 \xrightarrow{k_{r2}} CO + 2H_2,$$

$$CH_4 + H_2O \xrightarrow{k_{r3}} CO + 3H_2,$$

$$CO + \frac{1}{2}O_2 \xrightarrow{k_{r4}} CO_2,$$

$$H_2 + \frac{1}{2}O_2 \xrightarrow{k_{r5}} H_2O.$$

Egy javaslat az Arrhenius-egyenletben szereplő paraméterek számszerű értékére, a 4.2. táblázatban található.

4.2. táblázat. Különböző reakciók reakciósebessége

	Reakció, kmol/s·m³	A_{rj}	$E_{rj}/R,K$
1	$\frac{d[C_nH_m]}{dt} = A_{r1} \cdot \exp(-E_{r1}/RT_g)[C_nH_m][O_2]$	$3{,}8 \cdot 10^7$	6 670
2	$\frac{d[CH_4]}{dt} = A_{r2} \cdot \exp(-E_{r2}/RT_g)[CH_4]^{0,5}[O_2]^{1,25}$	$4{,}4 \cdot 10^{11}$	15 098
3	$\frac{d[CH_4]}{dt} = A_{r3} \cdot \exp(-E_{r3}/RT_g)[CH_4][H_2O]$	$3{,}1 \cdot 10^8$	15 098
4	$\frac{d[CO]}{dt} = A_{r4} \cdot \exp(-E_{r4}/RT_g)[CO][O_2]^{0,3}[H_2O]^{0,5}$	$2{,}5 \cdot 10^8$	8 052
5	$\frac{d[H_2O]}{dt} = A_{r5} \cdot \exp(-E_{r5}/RT_g)[H_2][O_2]^{0,5}$	$7{,}9 \cdot 10^{10}$	17 614

Az illó anyagok felszabadulása és az elsődleges pirolízis után a közel tiszta karbonból álló kokszszemcse reakcióba lép a gázkörnyezetével:

$$C_{(s)} + \frac{1}{2}O_2 \xrightarrow{k_{r6}} CO,$$

$$C_{(s)} + CO_2 \xrightarrow{k_{r7}} 2CO,$$

$$C_{(s)} + H_2O \xrightarrow{k_{r8}} CO + H_2.$$

A közvetlen levegővel (oxigénnel) való reakció az első lépés, és a második és harmadik a nagy CO_2 nyomás melletti és a H_2O-val történő elgázosodás. A teljes heterogén reakció:

$$R_{r,j} = A_p \eta_r p_j \frac{k_{r,j} k_{d,j}}{k_{r,j} + k_{d,j}},$$

ahol $k_{d,j}$ és $k_{r,j}$ a diffúziós és kinetikai sebesség, A_p a szemcsefelület, η_r a hatékonysági tényező, amely a p_j nyomásnál figyelembe veszi, hogy az oxidáló anyag parciális nyomásával mennyire tud behatolni a szemcse teljes tömegébe. A diffúziós tényező:

$$k_{d,j} = \frac{C_j}{d_p} \left(\frac{T_p + T_g}{2} \right)^{0,75},$$

ahol C_j az oxidáló anyag diffúziós állandója.

Ezzel felírva az Arrhenius-egyenlet:

$$k_{r,j} = A_{r,j} \exp(-E_{r,j} / R T_s).$$

A T_s a szemcse hőmérséklete.

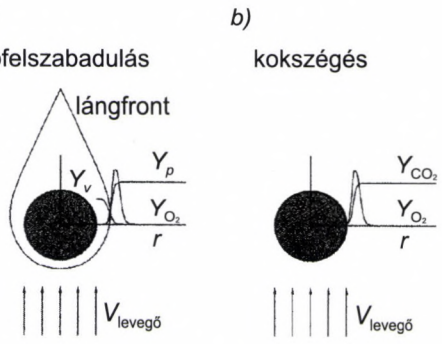
A heterogén reakcióra felírt Arrhenius-egyenlet egyes tényezőinek számszerű értékei a 4.3. táblázatban találhatók. Az értékek meglehetősen jól közelítik a Reményi által publikált, derivatográfos égési vizsgálatok alapján közölt eredmények adatait (Reményi 1969).

4.3. táblázat. A felületi reakció sebessége

Reakció	A_{rj}, kg/s·m²·Pa	E_{rj}, J/kmol	Rend n
6	0,0050	$74 \cdot 10^6$	1
7	$6{,}3510^{-3}$	$162 \cdot 10^6$	1
8	$1{,}9210^{-3}$	$147 \cdot 10^6$	1

Tüzelőanyag-szemcse reakciófolyamata: illófelszabadulás és égési fázis. Az Y_v és Y_p az illó és az égéstermék aránya a teljes tömeghez (Kuijk 2008).

A szilárd tüzelőanyag égésekor felületi folyamatok, majd a szemcse környezetében gázreakciók mennek végbe (4.5. ábra). Alapfolyamatok: az illófelszabadulás és az égés. A szilárd tüzelőanyag égése során a felületen végbemenő reakció részégés is lehet, majd a heterogén reakció után keletkezett például CO égése, és ezzel a tüzalőanyag teljes égése tehát a szemcse környezetében homogén gázégéssel fejeződik be.



4.5. ábra. A szénszemcse égésének folyamatai

Az Arrhenius-egyenlet alkalmazásához szükséges kinetikai adatokat gyakran termogravimetriás módszerrel (TGA-görbe) határozzák meg.

A termográffal felvett görbe csak az égés fő folyamataiba enged betekinteni, ezért újabban a termográfos eljárást TGA, a FTIR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy) eljárással kombinálják. Ezzel az eljárással már sokkal több (pl. 17) gázösszetevő reakciófolyamata értékelhető (pl. CH_4 és CO, még komplexebbek a fenol C_6H_5OH és az aceton CH_3OCH_3). Ezzel az illó összetevőinek 40–60%-a vizsgálható. Vizsgálható a HCN és az NH_3 is.

A szén égésének numerikus modellezése

Egy áramló közegben Lagrange alapján a szemcse mozgását meghatározó erők egyensúlya (Sahajwalla et al. 1997):

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{g(\rho_s - \rho)}{\rho_s} + F_x,$$

ahol $F_D(u - u_p)$ a sebességkülönbség miatt, a szemcse tömegegységére ható, a szemcsét sodró vagy fékező erő. Az erő értéke alapvetően a Reynolds-számtól függ.

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_s D_p^2} \frac{C_D \mathrm{Re}_p}{24},$$

ahol az u a gáz sebessége, u_p a szemcse sebessége, a μ a gáz dinamikai viszkozitása, a ρ a gáz sűrűsége, a ρ_p a szemcse sűrűsége, D_p a szemcse átmérője. A Re_p szám:

$$Re_p = \frac{\rho |u - u_p| D_p}{\eta},$$

ahol a C_d koefficiens definíciója:

$$C_D = E_1 + E_2 \frac{1}{Re_p} + E_3 \frac{1}{Re_p^2},$$

ahol E_1, E_2 *és* E_3 Morsi és Alexander 1977-es adatai szerint a Re számtól függő állandók.

Az F_x különböző egyéb erőket foglalhat magába, például látszólagos tömegerő, amikor fontos, hogy milyen mértékű a $\rho > \rho_p$, a környezetben lévő nyomásgradiens, elektrosztatikus erő stb. Lehet $F_x = 0$ is.

A diszperz közegre az egyenletek megoldása iterációval történhet. A sebességmező minden pontjára, minden irányba el kell végezni az idő szerinti integrálást, a következő képlet szerint:

$$\frac{dx_i}{dt} = u_p,$$

Hő- és tömegtranszfer-számítások

Amíg a szemcse hőmérséklete alacsonyabb a párolgási és az illófelszabadulás kezdeti hőmérsékleténél, külső hőre van szüksége.

$$m_p C_p \frac{dT_p}{dt} = hA_p\left(T_\infty - T_p\right) + \varepsilon_p A_p \sigma\left(\theta_R^4 - T_p^4\right),$$

ahol m_p a szemcse tömege (kg), C_p a szemcse fajhője (J/kgK), A_p a szemcse felülete (m^2), T a szemcse hőmérséklete, T_∞ a gáz hőmérséklete, h a konvektív hőszállítás (Wm^2K), ε_p a szemcseemissziós tényező, σ = 5,67·10–8W/m^2K^4 a Boltzmann-állandó és θ_R a relatív hőmérséklet.

Az egyenlet bizonyos közelítést jelent, mert az egyes elemeken belül például homogén hőmérsékletmezővel számol. Az egyenletet az idő szerint integrálni kell, amivel az idő szerinti változást tudjuk követni.

$$m_p C_p \frac{dT_p}{dt} = A_p\left[-\left(h + \varepsilon_p \sigma T_p^3\right)T_p + \left(hT_\infty + \varepsilon_p \theta_R^4\right)\right]$$

A szemcse mozgása során a hőmérséklet változását a következő egyenlet adja:

$$T_p\left(t + \Delta t\right) = \alpha_p + \left(T_p(t) - \alpha_p\right)\exp\left(-\beta_p \Delta t\right),$$

ahol Δt az integrálási lépések időintervallumai, és α_ρ és β_ρ állandók

$$\alpha_p = \frac{hT_\infty + \varepsilon_p \sigma \theta_R^4}{h + \varepsilon_p \sigma T_p^3(t)}, \text{ és } \beta_p = \frac{A_p\left(h + \varepsilon_p \sigma T_p^3(t)\right)}{m_p c_p}.$$

A h hőszállítási koefficiens a következő korrelációs egyenletet használva számítható:

$$Nu = \frac{hD_p}{k_\infty} = 2{,}0 + 0{,}6\,\mathrm{Re}_D^{1/2}\,\mathrm{Pr}^{1/3},$$

ahol k_∞ a hővezetési tényező (W/mK) és a Pr a Prantl-szám. A szemcse a mozgása során hőt ad le, és az energiaegyenlet hőforrása lesz.

Ha a szemcse elérte a T_{vap} párolgási hőmérsékletet, az illófelszabadulás is megkezdődik. Az illófelszabadulási egyenletre is több szerző javaslata alkalmazható.

Minden modell kinetikai alapokon tárgyalja a folyamatot, csak részleteiben egy-egy jellemzőnek a szerepét emeli ki. Kobayashi az illófelszabadulás kinetikáját két kinetikai komponenssel fejezi ki:

$$R_1 = A_1 \exp(-E_1/RT_p),$$

$$R_2 = A_2 \exp(-E_2/RT_p),$$

ahol R_1 és R_2 kinetikai arány, a különböző hőmérsékleteknél az illófelszabadulás során valamely jellemző fontosságát juttatja érvényre. A két arányegyenletet az illófelszabadulási folyamatszakaszra súlyozva:

$$\frac{m_v(t)}{m_{p0} - m_a} = \int_0^t (\alpha_1 R_1 + \alpha_2 R_2) \exp\left(-\int_0^t (R_1 + R_2)\, dt \right) dt,$$

ahol $m_v(t)$ a t idő alatti illóhozam, m_{p0} az induló tömeg, az α_1 és az α_2 hozamtényezők, 0,3 a reakció lassú szakaszában és 1,0 a reakció gyors szakaszában, m_a a hamutartalom. A lassú szakasz az alacsonyabb hőmérsékleteknél, míg a gyors a magasabb hőmérsékleteknél van, függenek az illó összetételétől is.

Az illófelszabadulási szakaszban a szemcseátmérő változik. Például ha a szemcse duzzad, ennek érzékeltetésére egy duzzadási jellemzőt, C_{sw} vezettek be.

$$D_p / D_{p0} = 1 + (C_{sw} - 1) \frac{m_{p0} - m_p}{f_{v0} m_{p0}},$$

ahol D_{p0} és D_p a kezdeti és az aktuális szemcseátmérő. A duzzadás mértéke az illó eltávozása után elérheti a 2-t, azaz a szemcse átmérője kétszeresére nő.

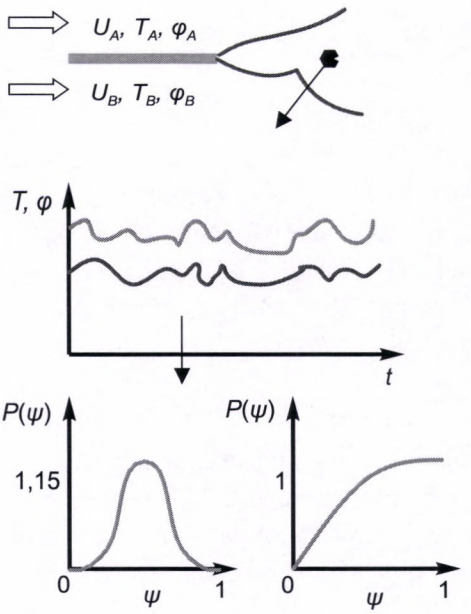
A tüzelőanyagok égésekor általában kémiai reakcióval együttes turbulens áramlás jön létre, amelynek vizsgálatára gyakran a PDF-modellezést használják.

Az égési folyamatok modellezésének célja az anyagáramlások, a kémiai átalakulások, az égési stabilitás, a kialvási viszonyok, a turbulenciakémiai kölcsönhatások megismerése.

A reakcióval együttes turbulens áramlásban az áramlási folyamat mellett reakciófolyamatok is végbemennek. A két folyamat befolyásolja egymást, jelentős a kölcsönhatás. A turbulenciajelenségek sztochasztikus jellegűek, amelyekhez turbulens kémiai reakció kapcsolódik. A turbulenciafolyamatokat általánosságban a valószínűségi sűrűségfüggvénnyel lehet leírni (probability density function – PDF). Ezek

ellentétesek a Flamelet-Modellekkel, és nem a Damköhler-számok korlátozzák, továbbá előkevert és nem előkevert égési folyamatra is alkalmazhatók. A PDF leírja a hőmérséklet és az áramlási mező adott helyén, meghatározott állapotban meglévő összetevők valószínű értékét (Joos et al. 2001).

Az áramlási mezőt különböző változókkal, például hőmérséklet, anyagi összetevők stb. lehet leírni (4.6. ábra). A közös eloszlásfüggvény $F(\psi; x,t)$ a hely- és az időfüggést veszi figyelembe. A φ áramlásmező a $\varphi < \psi$ feltételnek felel meg. Az eloszlásfüggvényből számaztatható a valószínűségi sűrűségfüggvény $P(\psi; x,t)$. A kezdő lépés: $\psi < \varphi < \psi + d\psi$. A PDF ismeretében meghatározható a kémiai forrás várható értéke.



4.6. ábra. Sztochasztikus áramlási jellemzők és ezekkel készített PDF, illetve CDF

$$\langle S_\alpha(x,t)\rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} S_\alpha(\psi) P_\alpha(\psi)\, d\psi.$$

A turbulenciaképlethez már csak a PDF szükséges. Két lehetőség van. Néhány paraméterből mint középértékekből, illetve szabványhibával (közelítő PDF) felírható a $F(\psi; x,t)$, vagy a PDF-hez a transzportegyenletet oldják meg.

PDF transzportegyenlet

A transzportegyenlethez különbözőképpen lehet közelíteni. Lehetséges a sztochasztikus Markov-folyamatból a Fokker–Planck-egyenletet leszármaztatni. Más oldalról lehetséges egy adott valószínűségi sűrűségeloszlást bevezetni $P(\psi) = \delta(\varphi - \psi)$. Ennek megfelelő differenciál- és adott megmaradási egyenleteket használva, átalakítások után a skalár PDF-et kapjuk.

$$\frac{\partial}{\partial t}\Big[p(\psi)P_\varphi(\psi)\Big] + \frac{\partial}{\partial x_i}\Big[p(\psi)\langle U_i|\psi\rangle P_\varphi(\psi)\Big] + \frac{\partial}{\partial \psi_\alpha}\Big[p(\psi)S_\alpha(\psi)P_\varphi(\psi)\Big] =$$

$$= \frac{\partial}{\partial \psi_\alpha}\left[\left\langle \frac{\partial J_i^\alpha}{\partial x_i}\middle|\psi\right\rangle P_\varphi(\psi)\right].$$

A sokdimenziós PDF a transzportegyenlet hatékony megoldása Monte-Carlo-módszer segítségével történhet. Ekkor a P, az úgynevezett sztochasztikus részecskék együttesét és a megfelelő részecskeáramlás-transzportegyenletet szimulálja. A hiányzó turbulenciaparamétert és a sebességeket a CFD (Cumulative Distribution Function) számítással határozzák meg. A problémát a jobb oldalon a keveredés jelenti, ezért a PDF „egypont-jellemzést" ad, a térbeli gradiensről nem ad információt.

Az égés lefolyásának elemzésére, a folyamatban részt vevő komponensek kémiai reakcióval kifejezett explicit egyenleteinek végeselemes módszerrel történő megoldását is lehet használni. Az *i'* kémiai komponens $R_{i'}$ reakció forrása vesz részt a *k* reakcióban:

$$R_{i'} = \sum_k R_{i',k}$$

ahol $R_{i'}$, $k_{i'}$ komponensnek a *k* reakcióban a keletkezés/bomlás aránya. Itt figyelembe van véve a turbulens keveredés és a konvekció. A modell bomlási modellként vált ismertté. Figyelembe veszi a reakcióban a turbulenciát is. A megoldásnál a reakcióarány minimumértékét használják:

$$R_{i',k} = \nu'_{i',k} M_{i'} A\rho \frac{\varepsilon}{k} \frac{m_R}{\nu'_{R,k} M_R},$$

$$R_{i',k} = \nu'_{i',k} M_{i'} AB\rho \frac{\varepsilon}{k} \frac{\Sigma_p m_p}{\Sigma_p \nu'_{P,k} M_P},$$

ahol m_p és m_R az egyes termékkomponensek, a *P* és az *R* a reagensek és a tömegarány a *v*. Az *A* és *B* kísérleti állandók, értékük 4,0 és 0,5. Az $M_{i'}$ az *i'* komponens molekulasúlya (kg/kmol), és $\nu_{i',k}$ a *k* reakcióban az *i'* reagenst jellemző kitevő. A reakció lefolyása során fellép disszipáció és örvénylés.

A második közelítés a keverékkomponens/PDF modell, (Probability Density Function). Az egyszerű skalár megmaradási transzportegyenlet megoldása helyett a frakciókeverékre lehet megoldani. Az egyes komponensek koncentrációértékét a keverék összetétele alapján feltételezik. Ennek a megoldásnak számos előnye van a végeselemes megoldással szemben. A turbulenciahatást a valószínűségi alapon számolt sűrűséggel és nem az explicit módon kifejezett reakciómechanizmussal veszik figyelembe. A keverékfrakció, *f*, egy megmaradási skalár jellemző, amely a pillanatnyi termokémiai állapotot adja meg (Gu et al. 2011):

$$f = \frac{Z_k - Z_{kO}}{Z_{kF} - Z_{kO}},$$

ahol Z_k a *k* elemnek a tömegaránya. Az *O* és az *F* alsó indexek a belépő oxidáns és a tüzelőanyag-áram értékét adja. Az *f* keverékfrakció minden ellenőrző térfogat-

ban a megmaradás mennyiségi értékét veszi számításba, a következő transzportegyenlet megoldásakor (idő szerint átlagolva):

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho\overline{f}\right)+\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\rho u_i\overline{f}\right)=\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\frac{\mu_t}{\sigma_t}\frac{\partial\overline{f}}{\partial x_i}\right)+S_m.$$

A forrás S_m jelölés, a reagáló szénszemcséből a gázkörnyezetbe áramló tömeget jelenti. A PDF közelítéshez a keverékfrakció varianciáját, $\overline{f'^2}$, a következő transzportegyenlettel számítják:

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho\overline{f'^2}\right)+\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\rho u_i\overline{f'^2}\right)=\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\frac{\mu_t}{\sigma_t}\frac{\partial\overline{f'^2}}{\partial x_i}\right)+C_g\mu_i\left(\frac{\partial\overline{f}}{\partial x_i}\right)^2-C_d\rho\frac{\varepsilon}{k_i}\overline{f'^2},$$

ahol σ_t, C_g és C_d állandók, és értékeik rendre 0,7, 2,86, és 2,0. A keverékfrakció/PDF modell előnye, hogy az egyszerű skalár megmaradás, f, és más skaláregyenletekkel dolgozik egyéb különleges egyenletek nélkül.

Az adiabatikus rendszerben a pillanatnyi érték kizárólag az f pillanatnyi értékétől függ:

$$\varphi_i=\varphi_i(f),$$

ahol φ_i a pillanatnyi komponenskoncentrációt, a sűrűséget vagy a hőmérsékletet jelenti. Nem adiabatikus rendszerben az általánosított forma:

$$\varphi_i=\varphi_i(f,h^*),$$

ahol h^* a pillanatnyi entalpia.

A szénpor égése számos folyamat kölcsönhatásában jön létre, nevezetesen: turbulens gázmozgás, szemcsediszperzió, a szemcséből hőfelszabadulás, anyag- és hőcsere a szemcse és a környezet között, turbulens gázreakció és heterogén szemcsereakció, továbbá sugárzásos hőcsere. Számos kétfázisú áramlási problémánál a két fázis közötti kapcsolat nem lineáris összefüggéssel jellemezhető. Ilyen a szénporégés is, ahol a gázturbulencia hat a szemcsemozgásra és a hőfelszabadulásra is. A szénpor-gázkeverékben a szemcsék igen kisméretűek, és a köztük lévő távolság a méretükhöz képest viszonylag nagy, az égésvizsgálatoknál a szemcse-szemcse köcsönhatást gyakran nem veszik figyelembe.

Ilyen körülmények között az Euler–Lagrange-megközelítés nagyon jól használható. A módszernél a gázfázis az Euler-megközelítéssel (véges térfogatok, illetve véges különbségek) kezelhető, és a diszperz szemcsefázis a Lagrange-megközelítéssel kezelhető.

A PDF-modellezés a (Probability Density Functions) módszer alkalmazására egy másik lehetséges változatot is kidolgoztak. A megoldásnál lehetséges két külön PDF-választás. Az egyik a gázfázis sebesség-összetétel együttes PDF, a másik a szénszemcse tulajdonságait leíró PDF. A gáz-szemcse fázisok együttes folyamatának leírását ez a modellezés nem tartalmazza. Ezt a modellezést az International Flame Research Foundation (IFRF) B1 félüzemi kemencéjén végzett kísérleti vizsgálatok alapján dolgozták ki, és tették a számításokra alkalmassá.

A szénpor égésekor az illófelszabadulás sokkal gyorsabb, mint a koksz égése. A szénillóból származó termékek összetétele lényegesen különbözik a koksz égésekor keletkezőtől. Ezért Brewster et al. és Flores és Fletcher a szén két reakciófolyamatánál két különböző keveréket vett számításba. A szénégés nem adiabatikus feltételeinél egy harmadik skalár változóval számolnak, a teljes fajlagos entalpiával. A megközelítésnél egy oxidáns áram (levegő) van, de a független változó entalpia az oxidáns belépésekor különböző hőmérsékletértékeket jelent (Stoellinger et al. 2011).

A kokszkomponens $Z_1 = m_c/(m_{ox} + m_c + m_v)$ és az illókeverék-komponens $Z_2 = m_v(m_{ox} + m_c + m_v)$ jelentik a kokszégésből és az illóból származó tömegek arányát. A szénösszetételt elemzésekkel kell megállapítani.

A szén égési folyamatainak vizsgálatakor a PDF modellek alkalmazása helyett a gyakorlathoz közelebb áll tömegsűrűség-függvények (Mass Density Function, MDF) $F_g(v,\psi;x,t)$ használata. Kétfázisú áramlásnál az MDF meghatározása: ($\psi=[Z_1,Z_2,h]^T$).

$$\int_{[v,\psi]} F_g(v,\psi;x,t)dv \cdot d\psi = \alpha_g(x,t)\langle\rho(x,t)\rangle$$

ahol $\alpha_g(x,t)$ és $\langle\rho(x,t)\rangle$ a gázfrakció térfogata és sűrűsége. Ha a viszkózus feszültség tenzor gradiense $\partial\overline{\tau}_{ij}/\partial x_j$ és a $\partial\overline{J}_j^a/\partial x_j\infty$ skalár diffúziót jelenti akkor a gáz MDF-et, $F_g(v,\psi;x,t)$-et, a következő egyenletrendszer vezérli:

$$\frac{\partial F_g}{\partial t} + v_j\frac{\partial F_g}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial\psi_a}\left[S_a(\psi)F_g\right] + \frac{\partial F_g}{\partial v_i}\left[\frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial\overline{\rho}}{\partial x_i} + \rho g_i + \left\langle S_{a_i}^{(I_1)}\right\rangle\right)\right]$$

$$= \frac{\partial}{\partial v_i}\left[\langle a_i | v,\psi\rangle F_g\right] + S_{rad} + \frac{\partial}{\partial\psi_a}\left[\frac{1}{\rho}\left\langle -\frac{\partial J_j^{a^*}}{\partial x_j}\middle| v,\psi\right\rangle F_g\right]$$

$$-\frac{\partial}{\partial\psi_a}\left[\frac{1}{\rho}\left\langle\left\langle S_{\varphi_a}^{(I_1)}\right\rangle\middle| v,\psi\right\rangle F_g\right] + \frac{1}{\rho}\left\langle S_m^{(I_1)}\middle| v,\psi\right\rangle F_g.$$

A szemcse égési folyamatának leírásához a Lagrange-gázrészecskemódszert alkalmazva a „számításhoz egységesen kialakított gázrészecskék" együttesével lehet dolgozni. A részecskék tulajdonságait jellemző paraméterek (w^*, m^*, x^*, u'''^*, φ^*), ahol w^* a súly, m^* a részecske tömege, x^* a részecske helyzete, u'''^* a részecske sebessége és φ^* a részecske összetétele. További jellemzők is lehetnek, például a részecske sűrűsége, ami a pillanatnyi állapot szerint változik, $\rho^*(t) = \rho(\varphi^*(t))$.

A szénszemcse súlya, a koksz és az illó tömegének, illetve súlyának változása szerint egymással kölcsönhatásban változik:

$$w^*(t+dt) = w^* exp\left((S_{Z1} \mid Z_1) + (S_{Z2} \mid Z_2)\right)dt)$$

A kokszösszetevőre jellemző α_1 és az illórészre jellemző α_2 együtthatókkal, a teljes koksz és illótömeg-transzfer aránynak megfelelően számított részecskék egyenletei felírhatók:

A kokszra:

$$(S_{Z1}) = \frac{\Sigma_{*\varepsilon\Omega k} w^* m^* \alpha_1 \cdot Z_1^{*2}}{\Sigma_{*\Omega k} w^* m^*}$$

ahol $(S_{Z1} \mid Z_1) = \alpha_1 \cdot Z_1^{*2}$.

Hasonlóan felírható a számított részecske egyenlete az illó összetevőre is.

Szénportüzelésnél a hőcserefolyamatok közül a sugárzásos az uralkodó, a gáz-szemcse keverék és a kazán fala között. A sugárzás hőszállítási egyenletek (Radiative heat Transfer Equation, RTE) megoldására a diszkrét transzfer módszer (Discrete Transfer Method) előnyösen alkalmazható. A DTM az RTE-nek egy kitüntetett irányba történő numerikus megoldásán alapszik. Az RTE figyelembe veszi az abszorpciót, emissziót és a szóródást. A sugárzás entalpiaforrása:

$$S^*_{rad} = \frac{1}{\rho^*}\left[\left(\langle S_{R,as}\rangle\right)^* - \frac{T^{*4}}{\left(\langle T^4\rangle\right)^*}\left(\langle S_{R,em}\rangle\right)^*\right]dt,$$

ahol $\langle S_{R,as}\rangle$ az átlagos abszorpció és $\langle S_{R,em}\rangle$ az átlagos emisszió, amelyekkel a DTM-nél számolnak.

A differenciálegyenlethez megfelelően, egyenletesen elosztva alakítják ki a Lagrange-széncellákat (lángelemeket), hogy az egzakt szénszemcsetömeg sűrűségfüggvényt lehessen elérni. A számítógépes cellahelyzet a következő:

$$\frac{dX^*_{p,i}}{dt} = u^*_{p,i}.$$

A cellasebesség

$$\frac{du^*_{p,i}}{dt} = \frac{u^*_{s,i} - u^*_{p,i}}{\tau^*_p} - \frac{1}{\rho^*_p}\left[\frac{\partial\langle p\rangle}{\partial x_i}\right]^* + g_i.$$

A cella relaxációs idejét τ^*_p meghatározza a reakciósebesség, az u^*_p cellasebesség és az u^*_s gázsebesség. A cellarelaxáció a cella Reynolds-számától függ. Vannak mo-

dellek, amelyeket például a Langevin-egyenlet alapján alakítanak ki, amelynél a fluktuációsebességre, $u_s^{*''} = u_s^* - \tilde{u}$ alapoznak.

Polidiszperz áramlás égésvizsgálatakor a különböző méretkategóriákra fel kell írni az egyenleteket és minden méretre értékelni. A modellben megjelölnek egy szemcsét, amely a gázfázis fluktuációjáról ad tájékoztatást ($m_p^* \to 0$) (Simplified Langevin Model, SLM). A gázkomponensek alakulását a számítógépes széncellák $\varphi_p^* = [T_s^*, X_{s,O_2}]$véletlenszerű eloszlásával határozzák meg. A cellahőmérsékletet a hőmérlegből számolják (mind konvektív, mind a sugárzásos hőszállítást figyelembe véve), de a cella hővezető képességét végtelennek feltételezve. A cellában a belső hőmérsékletet egyenletesnek feltételezve, az egyenlet:

$$m_p^* c_{p,p} \frac{dT_p^*}{dt} = \pi D_p^* Nuk_m \left(T_s^* - T_p^*\right) + \epsilon_p D_p^{*2} \pi\sigma \left(\theta_R^4 - T_p^{*4}\right),$$

ahol $c_{p,p}$ a szén fajhője (állandó), Nu a Nusselt-szám, k_m a gáz hővezetőképessége, ϵ_p a szemcse emissziós tényezője, $\sigma = 5{,}67 \cdot 10^{-8} \mathrm{W/m^2K^4}$ a Stefan–Boltzmann-állandó és θ_R a gázkörnyezet sugárzási hőmérséklete:

$$\theta_R = \left(\frac{G}{4\sigma}\right)^{1/4},$$

ahol G a DTM szerint számolt teljes beeső sugárzás. A cella mérete közelítésként időben állandó, ami azt jelenti, hogy az illófelszabadulás alatti szemcseduzzadást elhanyagolják, továbbá a kokszégés alatt is változatlan marad a szemcseméret. A cellatömeg-csökkenés sebessége és a cellában a sűrűség:

$$\frac{dm_p^* \rho}{dt} = \frac{4}{3} \pi D_p^{*3} \frac{d_p^*}{dt} = \dot{m}_{char}^* + \dot{m}_{vol}^*.$$

A széncella közelítőleg illóból, kokszból és hamuból tevődik össze. Az illófelszabadulást és a kokszégést a vizsgálatoknál egymást követő folyamatokként feltételezik. A valóságban van bizonyos átfedés. Az illófelszabadulás kezdetén a cella hőmérsékletküszöbe $T_p^* \geq T_{Devol}$. Az illófelszabadulás tömegcsökkenés-sebességére Badzioch és Hawksley javaslata:

$$\dot{m}_{vol}^* = -k_{dev} \left(m_p^* - Y_{vol,0} m_{p,0}^*\right),$$

ahol k_{dev} az illófelszabadulás kinetikai sebessége, $Y_{vol,0}$ a kezdeti illótömeg-frakció, és $m_{p,0}^*$ a szemcse kezdeti tömege. A kinetikai sebesség egyenlete:

$$k_{dev} = -A_{dev} \exp\left(-\frac{E_{dev}}{RT_p^*}\right),$$

Az illó a következő értékig szabadul fel: $m_p^* \leq (1 - Y_{vol,0})\, m_{p,0}^*$

Ezután indul a koksz égésfolyamata a kinetikus/diffúziós modellek feltételeit meghatározó tartományhatároknak megfelelően.

$$D_{ox} = -C_{diff} \exp \frac{T_m^{0,75}}{D_p^*},$$

és a rekciósebesség-állandó:

$$R_{char} = A_{char} \exp\left(-\frac{E_{char}}{RT_p^*} \right),$$

a két sebességállandó súlyozva kerül be a kokszégés sebességébe:

$$\dot{m}_{char}^* = -\pi D_p^{*2} \left[\overline{p} \right]^* X_{s,O2}^* \left(\frac{D_{ox} R_{char}}{D_{ox} + R_{char}} \right).$$

A kokszégés $m_p^* = (1 - Y_{vol,0} - Y_{char,0})\, m_{p,0}^*$ értékig tart, ahol $Y_{char,0}$ a koksz kezdeti tömegét jelenti. Ezután a cellatömeg nem változik tovább, és a megmaradt tömeget a hamu tömege teszi ki ($Y_{ash,0} = 1 - Y_{vol,0} - Y_{char,0}$). Az inert hamuszemcse a gázfolyammal együtt áramlik tovább, és részt vesz a hőcserefolyamatban.

A keverék két összetevője forrásként szolgál:

$$\left\langle S_{Z_1} \right\rangle = -\frac{1}{V_{\Omega k} \overline{\rho}} \left\langle \sum_{*\in\Omega k} n_p^* \dot{m}_{char}^* \right\rangle, \quad \left\langle S_{Z_2} \right\rangle = -\frac{1}{V_{\Omega k} \overline{\rho}} \left\langle \sum_{*\in\Omega k} n_p^* \dot{m}_{vol}^* \right\rangle$$

a két fázis között konvektív és sugárzásos hőcsere h_{cr}^* jön létre. Az entalpiák az összetevők tömegéből származnak (h_{char} és h_{vol}). Az egy cella mint hőforrás:

$$\dot{q}_{cr}^* = \pi D_p^* Nuk_m \left(T_s^* - T_p^* \right) + \in_p D_p^{*2} \pi\sigma \left(\theta_R^4 - T_p^{*4} \right),$$

a cellára a teljes hőszállítás:

$$\dot{h}_{cr}^* = -\frac{1}{V_{\Omega k} \overline{\rho}} \sum_{*\in\Omega k} n_p^* \dot{q}_{cr}^*,$$

a cellában lévő összes részcella tömegének fajlagos entalpiái:

$$h_{char} = \frac{\sum_{*\in\Omega_k} n_p^* \cdot \dot{m}_{char}^* \left[c_{p,p} \left(T_p^* - T_{ref,0} \right) + h_{char}^0 \right]}{\sum_{*\in\Omega_k} n_p^* \dot{m}_{char}^*},$$

$$h_{vol} = \frac{\sum_{*\in\Omega_k} n_p^* \cdot \dot{m}_{vol}^* \left[c_{p,p} \left(T_p^* - T_{ref,0} \right) + h_{vol}^0 \right]}{\sum_{*\in\Omega_k} n_p^* \dot{m}_{vol}^*},$$

ahol a kokszból a hőfejlesztés h_{char}^0 (karbonként számolva) és az illóból a hőfejlesztés h_{vol}^0. A modellekben számos tapasztalati érték szerepel.

4.4. Égésvizsgálatok

Magyarország környezetszennyezésében jelentős szerepet játszik az energiatermelés, különösen az erőművek által kibocsátott melléktermékek. A szénerőműveknél jelentős a környezetszennyezés problémája, mert a nagy hamutartalom mellett jelentős kéntartalom is található. A magyar szenek között megtalálható a feketeszén, barnaszén és lignit.

4.5. Laboratóriumi vizsgálatok

A tüzelőanyagoknak tüzelési szempontból éghető és nem éghető összetevői vannak.

Éghető összetevők: C, H, S, N.

Nem éghető összetevők: O, H_2O, hamu.

Az egyes összetevőket a tüzelőanyag különféle vegyületek formájában tartalmazza. A gyakorlatban az elemi összetétellel (tömeg- vagy térfogatszázalékban kifejezve) jellemzik a tüzelőanyagokat.

A tüzelőanyagoknál tüzeléstechnikai szempontból legfontosabb ismerni a tüzelőanyag égéshőjét és a fűtőértékét.

Az égéshő megállapításakor a tüzelőanyag tömeg- vagy térfogategységét teljes mértékben elégetik, és a keletkező átalakulási hőmennyiséget mérik, amely az egységnyi mennyiségű tüzelőanyag tökéletes elégetésekor 25 °C állandó hőmérsékleten, 3,0 MPa túlnyomású oxigénben felszabadul. Az égéshő kaloriméterben való méréssel határozható meg. Az elégés után gáz halmazállapotú oxigén, nitrogén, szén-dioxid, nitrogén-oxidok és kén-dioxid, folyékony halmazállapotú víz és szilárd halmazállapotú hamu marad.

A fűtőértéket az égéshő alapján állapítják meg, amennyiben az elégetéskor, a tüzelőanyagból eltávozó és a hidrogén elégéséből keletkező víz párolgási hőjével az égéshőt csökkentik. A tökéletes égés után a víz gőz halmazállapotú.

A bombakén a tüzelőanyag összes kéntartalmára jellemző érték. A tüzelőanyagokban a kén különböző kötésekben, szerves és szervetlen vegyületek formájában fordul elő. A bombakén a kalorimetráláskor kalorikus korrekció céljára meghatározott érték. Kalorimetráláskor a tüzelőanyagok szervetlen szulfáttartalma és az ennek megfelelő kénhányad nem határozható meg.

A kalorimétemek (kalorimétér-rendszer) saját hőkapacitása van, ami az a hőmennyiség, amely a 25 °C hőmérsékletű kalorimétér hőmérsékletét 1 °C-kal megemeli.

A kalorimétér hőkapacitásának meghatározása úgy történik, hogy ismert égéshőjű etalonanyagot oxigénnel töltött kalorimétérbombában elégetve a kalorimétérben lévő, adott mennyiségű víz hőmérséklet-emelkedését mérve, az elégetéskor felsza-

baduló hőmennyiségből és a kaloriméter vízhőmérsékletének változásából számítható a kaloriméter hőkapacitása:

$$C = \frac{Q \cdot m + C_1 + C_2 + C_3}{D_t - K},$$

ahol

C a kaloriméter hőkapacitása, J/°C

Q az etalonanyag égéshője, J/g

m az etalonanyag tömege, g

C_1 és C_2 a gyújtóhuzal és pamutszál égéséből adódó korrekció, J

C_3 a salétromsav képződése során keletkező hő miatti korrekció, J

D_t hőmérséklet-emelkedés (a főkísérlet során), °C

K a kaloriméter és a környező levegő közti hőcsere miatt szükséges korrekciós tényező, °C

A mért tömegű, ismeretlen tüzelőanyag-mintát oxigénnel töltött kaloriméterbombában elégetve a kaloriméterben lévő víz hőmérséklet-emelkedését határozzák meg. A kaloriméter hőkapacitásának ismeretében a hőmérséklet-emelkedésből a tüzelőanyag-minta égéshője számítható.

A tüzelőanyag égetésekor keletkező kénsav és salétromsav mennyiségének meghatározása a bombafolyadékból történik. A hőmennyiségeket (amelyek a megfelelő oxidok képződési és oldódási hői) figyelembe kell venni. Az egyik leggyakoribb kaloriméter a Berthelot–Mahler-féle típus.

A tüzelőanyagot a paramétereinek vizsgálatához elő kell készíteni, szárítani, őrölni stb.

A tüzelőanyag higroszkópos nedvessége a légszáraz szénminta víztartalma, amelyben a szerkezeti víz nincs benne. A szerkezeti víz csak 140 °C-nál magasabb hőmérsékleten távozik a mintából. A gyakorlatban a higroszkópos nedvesség megegyezik a vizsgálati nedvességgel, azaz a mérés időpontjában meghatározott víztartalommal.

A meghatározáshoz három párhuzamos mérést kell végezni. Porított mintából, 1 grammnyi mennyiséget kell bemérni, és ezt szárítószekrényben 105 °C-on tömegállandóságig (kb. 2 óra időtartamig) szárítani kell. A szárítószekrényből kivett mintákat exszikkátorban kell lehűteni. Lehűlés után a minta tömegét meg kell határozni. A három párhuzamos mérés átlagaként, a bemérés százalékában kifejezett tömegcsökkenésből kell számítani a higroszkópos nedvességet.

Más nedvességű állapotra való átszámítás:

$$a = \frac{100 - c}{100 - b},$$

ahol

a átszámítási tényező

c az a nedvességtartalom %-ban, amire az átszámítás történik (15% nedvességtartalom MSz KGST 1463-78. sz. szabvány alapján)

b a minta meghatározott higroszkópos nedvességtartalma %-ban

A folyékony tüzelőanyagoknál a felhasználás, a tárolás és a szállítás során a tüzelőanyag fontosabb tulajdonságait ismerni kell. A minta alapvető fizikai tulajdonságai: sűrűség, folyékony tüzelőanyagoknál szilárd szennyezés, viszkozitás, lobbanáspont (nyílt téri, zárt téri), gyulladáspont, zavarosodási pont, dermedéspont, hideg szűrhetőségi határhőmérséklet, gőznyomás, szín, Conradson-szám, desztillációs görbe.

A folyékony tüzelőanyag sűrűségéből következtetéseket lehet levonni a termék kémiai összetételére vonatkozóan is. A sűrűség nem nagy hőmérséklet-tartományban közel lineárisan változik a hőmérséklettel, ezért a mért sűrűség és a mérési hőmérséklet ismeretében ki lehet számítani a 20 °C-hoz tartozó sűrűséget:

$$d^{20} = d^t + k*(t - 20),$$

azaz a 20 °C-hoz tartozó sűrűséget megkapjuk, ha a t hőmérsékleten mért sűrűséghez hozzáadjuk az 1 °C-hoz tartozó sűrűség változásnak (k) és a mérési hőmérséklet 20 °C-tól való eltérésének (t–20) a szorzatát. A sűrűségtartománytól függő (k) sűrűséghelyesbítési tényező értékét táblázat tartalmazza. A mérést laboratóriumban legegyszerűbben areométerrel mérjük. Minden areométer csak bizonyos sűrűségi határok között használható.

Használható még sűrűségmérésre a Mohr–Westphal-féle hidrosztatikai mérleg vagy a piknométer is. Sorozatmérésekhez ipari körülmények között használatosak a rezonanciafrekvencia mérésén alapuló automata sűrűségmérők. A rezonanciafrekvenciát a viszkozitás is befolyásolja, de ezt a mai készülékek korrekcióba veszik. Pontosságuk eléri a 10 g/cm^3-t.

A folyékony tüzelőanyag felhasználhatóságát befolyásolja a viszkozitása, mely folyadékokban a belső folyadékrétegek egymáshoz képest való elcsúszásánál fellépő – súrlódás jellegű – mozgást gátló ellenállás. Newton törvénye szerint az F súrlódási erő az A súrlódó felületen

$$F = \eta * \frac{dv}{dx} * A$$

ahol $\frac{dv}{dx}$ a sebességgradiens, azaz a súrlódó felületek sebességkülönbségének és távolságának a hányadosa (pontosabban ennek határértéke), (η) pedig a folyadék belső súrlódási együtthatója, azaz (dinamikai) viszkozitása. Mértékegysége a Pa·s (Pascal-szekundum), de a gyakorlatban legtöbbször az ezredrészét, a mPa·s-t használják. A 20 °C hőmérsékletű víz viszkozitása közelítően 1 mPa·s. A folyadékok viszkozitása a hőmérséklet emelkedésével csökken, míg a nyomás növelésével nő.

A viszkozitás mérésére szolgál a Höppler-féle és általában minden esősúlyos viszkoziméter.

Használatosak dinamikai viszkozitás mérésére a rotációs viszkoziméterek, melyekben a folyadékba helyezett forgó alkatrészekre ható fékező erőt mérik. A dinamikai viszkozitásnak (η) és az egyazon hőmérsékleten mért sűrűségnek a hányadosát kinematikai viszkozitásnak (ν) nevezzük. Mértékegysége m^2/s.

Praktikus okokból milliomodrészét, a mm^2/s-t is használjuk, melynek régebbi neve a cSt (centistokes).

A lobbanáspont a folyékony tüzelőanyagok jellemzője. Az a 101,3 kPa (~1 bar) légköri nyomásra átszámított legalacsonyabb hőmérséklet °C-ban, melyen a vizsgálati minta gőzeiből előírt vizsgálati körülmények között a szabványos készülékben annyi gőz keletkezik, hogy a körülötte lévő levegővel elegyedve láng közelítésére az anyag egész felületére kiterjedően ellobban. Azt a hőmérsékletet, melyen a minta meggyullad, gyulladáspontnak nevezzük.

Conradson-szám:

Conradson-számon azt a tömegszázalékban kifejezett kokszmennyiséget értjük, amely az ásványolajtermék szabványos készülékben való elégetésekor keletkezik.

A gyulladási hajlam jellemzésére szolgál a gázolaj cetánszáma. A vizsgált gázolaj cetánszáma egyenlő a vizsgáló motorban vele azonos égési tulajdonságokat mutató normál cetánból (cetánszáma=100) és alfa-metilnaftalinból (cetánszáma=0) készült elegyben lévő cetántartalom

A gáz hőtartalmát mérő kaloriméterek többségének működése folyamatos átáramlású, égéstermék-hűtőközeg hőcserén alapszik.

$$Q_{gáz} \cdot \frac{dV_{gáz}}{dt} = c_{hűt} \frac{m_{hűt}}{dt} \cdot dT_{hűt},$$

ahol

$Q_{gáz}$ a gáz fűtőértéke (vagy égésmelege), J/m^3

$V_{gáz}$ elégetett gáz térfogatárama, m^3/h

$c_{hűt}$ a hűtőközeg hőkapacitása, J/(kg * K)

$m_{hűt}/dt$ a hűtőközeg tömegárama, kg/h

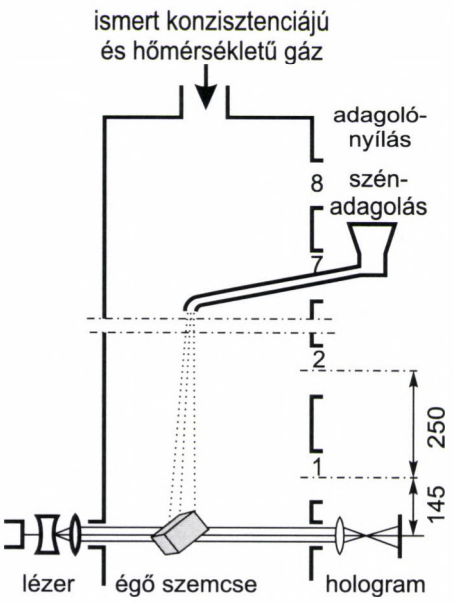
$dT_{hűt}$ a hűtőközeg hőmérséklet-emelkedése, K

A hőfelvevő közeg lehet víz vagy levegő.

A CalorVal 690 típusú kaloriméterrel végzett mérésnél a minta egy kapilláris rendszeren keresztül a hidrogéntüzelésű érzékelő lángba lép, ahol valamennyi éghető gázkomponens eloxidálódik. Az érzékelő láng fölé közvetlenül elhelyezett hőelem, a láng hőmérséklet-emelkedését elektromos jellé alakítja, ami arányos a gázkeverék fűtőértékével. A minta folyamatos bevezetéséről a nitrogén táplálású aspirátor szívása gondoskodik, és biztosítja a minta konstans térfogatáramát.

4.6. Szemcseégés-vizsgálat lézerholográffal

Az impulzushológráfiának a gáznemű, folyékony és szilárd tüzelőanyagok égésfolyamatának vizsgálatára való alkalmasságát több közlemény tartalmazza. A nemzetközi vizsgálatokkal egy időben végeztek szénszemcseégés-vizsgálatokat a Villamosenergia-ipari Kutató Intézetben. A vizsgálathoz alkalmazott berendezés, az abban előállított körülmények és az értékelés során nyert eredmények alapján az égéselméletre általánosítható eredményeket lehet megállapítani (Reményi et al. 1989).



4.7. ábra. A szemcse égésének vizsgálatára alkalmas ejtőcsöves kísérleti berendezés vázlata és a holográfiás mérés elve

Az impulzushológráfiai kutatásokhoz a kőszénszemcsék égésének kísérleti vizsgálatára alkalmas ejtőcsöves kísérleti berendezést (4.7. ábra) alkalmazták. A berendezés sokoldalúan alkalmas az égésfolyamat térbeni és időbeni lefolyásának tanulmányozására, így az egyes égő szénporszemcsék impulzushológráfiával való vizsgálatára is.

Elektromosan fűtött függőleges csőben (ejtőcső) felülről lefelé áramlik beállítható összetételű gáz, vagy nitrogén és levegő keveréke. A cső hossza mentén a fal hőmérséklete gyakorlatilag állandó. Ezt az átáramoltatott gázkeverék szabályozott előmelegítése is biztosítja. A szemcsék egymástól mért átlagos távolsága a szemcseátmérőnek kb. harmincszorosa. Ennek következtében a szemcsék égésénél ezek egymásra hatásától el lehet tekinteni. A szénporégés mechanizmusának felderítése érdekében az impulzushológráfia új módszerének alkalmazásával a szemcsék körüli termikus határréteg szerkezetének felderítését lehet elérni. A hologramokat a Magyar Tudományos Akadémia Műszaki Kémiai Kutató Intézete (MTA MKKI) Holográfiai Laboratóriumának munkatársai (Timkóné Józsa 1984) készítették.

Az első vizsgálatokhoz oroszlányi és balinkai szén különböző frakcióit használtuk. (Oroszlányiból $63 < d < 80$ \xm és $125 < d < 160$ jim; balinkaiból $63 < d < 80$ |im frakciókat).

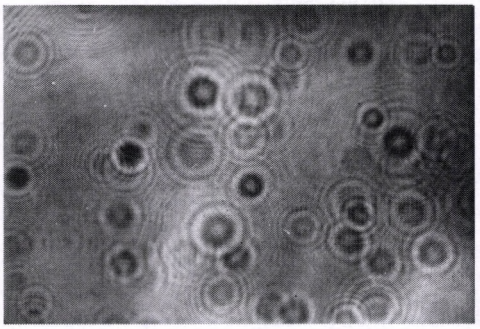
Az ejtőcső hőmérséklete a kísérletekhez 1000 °C és 750 °C hőmérsékletű volt.

A hologramfelvételek az ejtőcsövön létesített, átellenes nyílásokon keresztülvezetett lézersugár és a berendezést megkerülő referenciasugár alkalmazása mellett készültek.

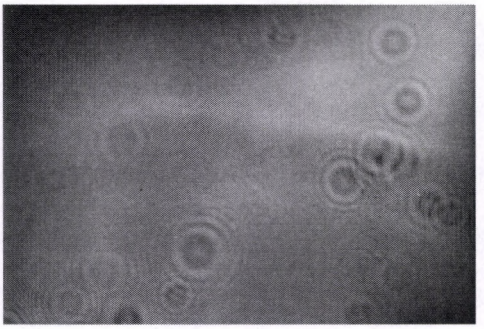
Az alkalmazott holografikus vizsgálati módszer azon alapszik, hogy egy impulzus-rubinlézer 20 ns felvillanási idejű, 5–10 MW teljesítményű, kettős óriásimpulzusával a vizsgálónyílás előtt elhaladó, égő szemcséket megvilágítja, és leképezi egy nagy felbontóképességű emulzióval ellátott filmre. A filmet a felvillanással azonos időben a lézerfényből eltérített, ún. „referenciasugár" is éri, amely a szemcsék érintése nélkül kerül a fotoemulzióra, és azon a szemcsékről jövő „tárgyhullámmal" interferál. Az így létrejövő interferenciaábra a hologram.

Jellemző a hologramra, hogy a tárgyról minden optikai információt tartalmaz, tehát a megvilágító hullámok fázisát és intenzitását egyaránt. Ez a különös tulajdonsága lehetővé teszi, hogy a „tárgy" valósághűen, háromdimenziósan rekonstruálható belőle, ha állandóan sugárzó gázlézerrel átvilágítjuk.

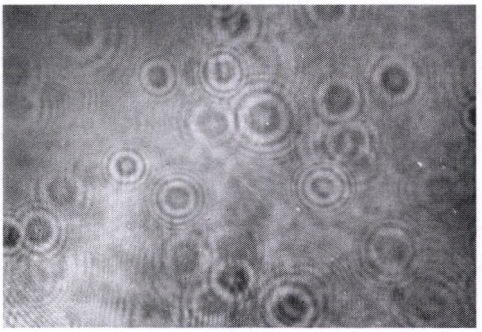
A kettős impulzus (időkésedelem 150–200 ns) két állapotot rögzít ugyanarra a hologramra. A hologramon tehát két állapot szuperponálódik. Ha a két állapotban nincs semmi különbség, akkor rekonstruálva a „tárgy" úgy jelenik meg, mintha egyszer holografáltuk volna, kétszer olyan hosszú időtartamú lézerimpulzussal.



4.8. ábra. Feketeszén, 1000 °C, 5% O_2, d = 140 μm, 520 mm égési út



4.9. ábra. Feketeszén, 1000 °C, 5% O_2, d = 140 μm, 1020 mm égési út



4.10. ábra. Feketeszén, 1000 °C, 5% O_2, d = 140 μm, 1270 mm égési út

Ha az égő szemcsében vagy környezetében a két impulzus között változás jön létre, akkor a hologramban interferenciagyűrűk jelennek meg a tárgy felületén vagy környezetében.

Mindezeket a lehetőségeket ismerve, feltételezhető, hogy a szénporszemcse körüli termikus határréteg szerkezetére vonatkozóan a hologramokból többletinformáció nyerhető.

A példaképpen bemutatott fényképsorozat (4.8., 4.9., és 4.10. ábrák), 125–160 μm (átlag 140 μm) szemcsetartományú feketeszénről, 1000 °C-ra beállított kemencehőmérsékleten felvett hologramok helyreállítása után készült.

A fényképsorozat 4.8. képe a vizsgálatok céljaira biztosított nyílás fölött 520 mm-re betáplált szénport mutatja. A szemcséknek csak egy része ég, a sötét magok a szemcséket mutatják.

A 4.9. képen láthatóan több szénporszemcse ég már; körülöttük egy-egy burok látszik. A kép az illóégés stádiumában készült a szemcsékről.

A 4.10. képen a szemcsék között sok a sötét, de interferenciagyűrűk sorozata veszi körül. A szemcsék a kokszégés stádiumába jutottak.

A készített hologramokról bemutatott felvételek egyértelműen igazolják, hogy ezzel a módszerrel számításokra is alkalmas vizsgálati eljárás hozható létre, ami új utakat nyithatna a szemcse körüli termikus határréteg szerkezetének felderítésében.

Szénszemcse és a különböző lángelemek égésének hullámjelenségei

A szénszemcséről, illetve más tüzelőanyag lángjairól készült lézerholográfiás felvételek azt mutatják, hogy a szemcséből, illetve lángelemekből (az irodalomban gyakran celláknak nevezett) többé-kevésbé szabályos vagy eltorzult gömbhullámok terjednek tovább. Az égés előtti fázisban készült felvételeken interferenciagyűrűk nincsenek, vagy sötét magok látszanak nagy számban, míg a gyulladást követően az interferenciagyűrűk megjelennek. A sötét magok a kokszégés fázisában is jól láthatók. Az interferenciagyűrűk arra is utalnak, hogy az égési viszonyok meghatározására a diffúziós egyenlet alkalmazása nem elegendő, mert stacioner állapotban az égő részecske körzetében beálló állandósult viszonyok a két lézerimpulzus között változást nem mutatnának. Az égő szemcséről készített felvételek szerint a szemcse körül gömbszimmetrikus interferenciasávok jelennek meg, ami az égésfolyamatot kísérő gömbhullámok létrejöttének feltételezésére ad alapos okot.

Az égés esetén a kémiai és energetikai folyamat periodikus jellegét az égés térbeli és időbeli lefolyásával magyarázhatjuk. A szemcsét körülvevő környezetből az oxigén és a folyamatba ékelődő aktiválás (gyulladás) után létrejött égéstermék mozgása ellentétes irányú.

Egyszerűsítve, az első félperiódusban éghető keverék tölti fel a reakcióteret, meggyullad, elég, és a második félperiódusban lép ki a reakciótérből. Itt nem kifejezetten egy reakcióról, hanem az égés térbeli és időbeli lefolyásáról van szó.

Természetesen a valóságos folyamat nem élesen szétválasztható részekre tagozódik, de az egyes időszakokban egyik, illetve másik uralkodóvá válva periodikus jelenséget idéz elő. Figyelembe kell venni azt is, hogy az égési térben igen aktív reakció közti termékek vannak jelen, és a lángban különböző módon végzett közvetlen mérési eredmények is egyértelműen arra utalnak, hogy a reakciótérben nem áll fenn egyensúlyi állapot. Az egyensúlytól való eltérés, az égésnek térben és időben történő lefolyása, tehát maga a reakció az égési térben és környezetében fizikokémiai hullámjelenség gerjesztését idézi elő, amely anyagáramlással és a fizikai paraméterek váltakozásával jár együtt. A lángokban végbemenő kémiai folyamatok nagy sebessége folytán a rendszer állapota nem jellemezhető az egyensúlyi egyenletekkel, a reakció és egyéb folyamatok időarányait figyelembe kell venni.

A tüzelőanyag égése, egyszerűsítve, a következőképpen jellemezhető: az általános tárgyalásban nem különböztetjük meg, hogy szilárd anyagról vagy kisméretű égő lángelemről van szó. E gondolat a különböző tüzelőanyagok (gáz, olaj, szén) égésének általánosítása.

A gyulladási hőmérsékletre felmelegített mikroelem és az oxidáló közeg közvetlen érintkezésben van. A gyulladás bekövetkezése után az igen gyors kémiai reakció az oxidáló közeget felemészti. Folyamatos utántáplálását (diffúzió) a lecsökkent koncentráció ellenére akadályozza az, hogy a reakciótérben erős hőmérsékletemelkedés mellett nagy mennyiségű magas hőmérsékletű égéstermék halmozódott fel, a reakció intenzitása lecsökkent. Rövid idő után azonban megindul az oxidáló közeg áramlása az égő elem felé, és nagyrészt kicserélődve az égéstermék és oxidáló közeg, a folyamat az első lökésszerű indulásnál kisebb intenzitással periodikusan ismétlődik. A periódusok gyakoriságát elsősorban a reakció sebessége, tehát a reakcióidő határozza meg.

Az égési folyamat általunk meghatározott periodikus jellegének gondolata előtt reakciókinetikai alapon hideg lángokra a kémiai folyamatok periodikus jellegét, különböző szerzőkre hivatkozva, már Kondratyev is ismerteti. E könyv hivatkozik Gervart és Frank-Kamenyeckij megfigyelésére is, amely szerint alkalmas körülmények között a hideg lángok hosszan tartó periodikus folyamatként is előállíthatók. Ez esetben a periodikusságot a lángban lévő átmeneti termékek reakciósebességi állandói közötti különbségekkel, tehát a reakciómechanizmussal magyarázzák.

Mivel a korábban elvégzett kísérleteknél a nyomásváltozás alapján kellett következtetéseket levonni, a viszonylag lassúbb folyamatokat lehetett vizsgálni. A lézerholográfia alkalmas eszköz az igen kis lángelemek gyors folyamatainak elemzésére.

Az említett kísérleteknél már azzal a jelenséggel is találkoztak, hogy a hideg lángból a meleg lángba való átmenetnél a hideg láng megszűnése lép fel.

Az égésnél fellépő hullámjelenségek leírására a csupán stacionárius állapotot figyelembe vevő modellek alkalmatlanok.

A reakciótérben nem áll fenn tömegegyensúlyi állapot. Olyan, differenciálegyenletekkel leíró modellre van szükség, amely alkalmas a dinamikus stabilitás leírására, szemben az idő-térbeli átlagértékkel operáló és csupán a statikus stabilitást leírni képes modellekkel.

A periodikus jelenség (vagy hullámjelenség) lényegét tekintve nem látszik különbség a kis méretű szilárd anyag (szénszemcse) égése vagy a kis égő lángelem között. Ezért mikroelem égésének feltételezett mechanizmusát írjuk le.

Az oszcilláció oka a kémiai viszonyokban, a termikus viszonyokban és a diffúzióban keresendő. Azok a rendszerek, amelyekben több egyensúlyi helyzet van, erős hajlamot mutatnak az oszcillációra. Óvatosnak kell lennünk, mert a teljes paramétertartományt átfogó vizsgálat sokszor még a két-három változós és egész egyszerűen felírható differenciálegyenletek esetében is beláthatatlanul nehéz lehet.

A nemlineáris dinamikai rendszerek rendkívül bonyolultak, és bonyolultságuk nem változóik számában, tehát nem kiterjedtségükben, nem is szerkezetük összetettségében rejlik elsősorban, hanem abban, hogy kevés állapotváltozó (2-3) és egyszerű szerkezet mellett is viselkedésük rendkívül változatos. Márpedig, ha az égő szénszemcsében lezajló folyamatok időbeli lefolyását meg akarjuk ragadni, akkor azt nemlineáris dinamikai rendszerként kell kezelni. Törekednünk kell azonban arra, hogy a lényeget meghatározó domináns fizikokémiai folyamatot ragadjuk meg, a lényegtelen folyamatoktól eltekintsünk. Természetesen az, hogy mikor mi a lényeges, mindig az adott körülményektől függ (szénfajta, szemcseátmérő stb.), és a választás jogosságát végső soron a kísérletek igazolhatják. E kísérletek laboratóriumi körülmények között is elvégezhetők. A meghatározó fizikokémiai folyamat segít értékelni az égési folyamatot.

Az égéskor kémiai reakciók, termikus folyamatok, anyagtranszport-folyamatok zajlanak le. A kémiai reakcióban az elemi reakciók számát igen széles határok között változtathatjuk. A CO égésmechanizmusának leírására Lyon és Hardy homogén reakciót javasol. A reakciót tekinthetjük koncentráltnak, de a térbeliséget is figyelembe vehetjük.

4.7. Derivatográfos égésvizsgálat

Szilárd anyagok termikus viselkedésének jellemzésére kiválóan alkalmasak a DTA-, TG- és DTG-görbék.

A módszer általános alkalmazásával lehetséges a minták szervesanyag-tartalmának meghatározása, az agyagásványok termikus viselkedésének vizsgálata, a karbonátok, a szulfátok, a szulfidok bomlási reakciójának vizsgálata, a polimorf

szerkezetek átalakulási folyamatainak vizsgálata. A számszerűsíthető paraméterek az abszolút tömegvesztés, reakciók szerinti tömegvesztés és a reakcióhő (energia). A vizsgálatokhoz szükséges anyagmennyiség 50 és 400 mg közötti tartományban választható. Az elemzési tartomány szabadon választható 20 és 1200 °C között, változó felfűtési sebességgel és hőntartási lehetőséggel

A derivatográf berendezés a vizsgálati eredményeket három görbével ábrázolja.

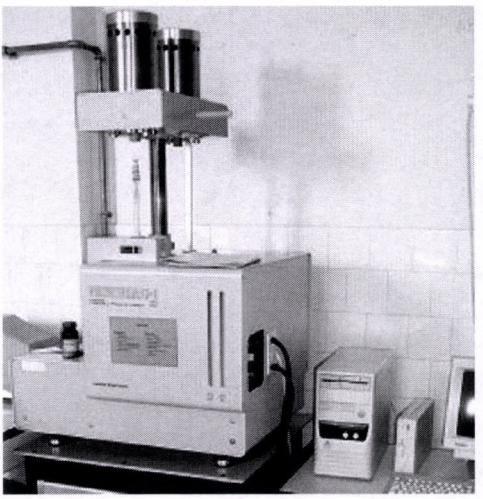
A termogravimetria (TG) görbe a hőmérséklet emelkedésének hatására a mintában bekövetkező tömegváltozást mutatja. Ez a tömegváltozás egyszerű függvénye.

A termogravimetria (TG) termogravimetrikus görbék kiértékelésének nehézségei szükségessé tették, és lehetségessé vált a (TG) derivált görbéjének, az ún. differenciál termogravimetrikus görbének (DTG) a megalkotása. Ahol a TG-görbének inflexiós pontja van, ott a DTG-görbén csúcs jelentkezik, ezáltal pontos képet alkothatunk a mintában lezajló termikus folyamatokról.

A differenciál-termikus analízis (DTA), ez a vizsgálati módszer azt a hőmennyiséget határozza meg, amely a vizsgálandó anyag felmelegítése, illetve hevítése esetén a hőtartalom-változással járó fizikai és kémiai változások miatt felszabadul, illetve elnyelődik a vizsgálati rendszerben. A kapott görbe a minimuma felé endoterm, míg a maximuma felé haladva exoterm folyamatokra utal.

A vizsgálathoz szükséges minták egy mérleg két karján helyezkednek el. A vizsgálni kívánt mintát egy porcelánpálcában elhelyezett termoelemmel ellátott tégelybe helyezik a mérleg egyik karján, a berendezés másik „karján" az etalon van,. A termoelemmel lehetővé válik a hőmérséklet mérése és regisztrálása. A mérleg segítségével a TG-görbét megkapjuk. A mérleg második „karja" egy mágneses erőtérbe benyúló, nagy menetszámú tekercs, amellyel a mérleg kitérésének sebessége, tehát a DTG-görbe határozható meg.

A DTA-görbe felvételéhez a kemencetérben, a vizsgálandó anyag mellett lévő etalonanyag szükséges. A berendezés a minta és az etalonanyag hőmérsékletét méri differenciál-termoelemmel. A mért jelek detektálása elektronikus úton, a mérési adatok gyűjtése digitalizálva, az adatok tárolása és kiértékelése pedig számítógépen történik. Derivatográfos vizsgálatok több tüzelőanyag-mintáról rendelkezésre állnak. A mérések eredményeként kapott diagramokon nyomon követhetők a tüzelőanyagoknak a hőmérséklet-emelkedés hatására bekövetkező változásai. A diagramok kiérté-



4.11. ábra. „MOM" derivatográf

kelésével adatokat nyerünk a tüzelőanyagok összetételére, illetve a különböző hőmérséklet-tartományokban végbemenő folyamatokra (Filho et al 2008).

Besorolás:
- analitikai berendezés (termogravimetriás)

Alkalmazás:
- TG-, DTG-, DTA-görbék rögzítése
- preformulációs, késztermékvizsgálatok

Mérés:
- számítógép által rögzített eredmények

Adatfeldolgozás:
- számítógépes szoftver (MOM)
- adatok exportálhatók (WinDerC szoftver segítségével)

Az Arrhenius-egyenlet gázreakciókra viszonylag egyszerűen alkalmazható. Az olyan bonyolult reakciókra azonban, mint az energetikai szenek oxidációja, jelentős nehézséggel és feltételezéssel is csak közelítőleg mennyiségi, főképpen kvalitatív értékelésre használható. Ennek legfőbb oka az, hogy a természetes szenek égésénél a hőmérséklet függvényében a reakció mechanizmusának változása mellett a külső környezet fizikai jellemzőinek értéke is változik (diffúziós tényező, hővezetési tényező, hőátadási tényező, fajhő stb.).

Ilyen körülmények között érthető, hogy ez esetben az aktiválási energia értelmezéséről és értelmezhetőségéről az irodalomban számos ellentmondást találunk. Még a grafittal végzett kísérleteknél is a kísérlet körülményeitől függően az aktiválási energia értékében, ugyanazon hőmérséklet-tartományban, különböző szerzőktől származó adatok között is lényeges eltérés van. Még körülményesebb a helyzet kazántüzeléseknél az alkalmazott szénfajták esetében.

Ilyen körülmények között különösen a szénkeverékek égésfolyamatának vizsgálatát tovább nehezíti az a tény, hogy nem áll rendelkezésre elegendő vizsgálati anyag kétfajta szén égés közben való egymásra hatásáról. A vizsgálat egyszerűsítése céljából csak kétféle szén keverékével elvégzett kísérlet eredményei kerülnek ismertetésre (Reményi 1969).

Az égésfolyamat sebessége és sebességállandója kétféle feltételezés alapján számítható:

Ha az egyes szénfajtákra különböző folyamatkinetikai állandókat feltételezünk, akkor az „1" jelű szénfajtára nézve a folyamatsebességi állandó k_1, a frekvenciafaktor A_1, a látszólagos aktiválási energia ΔH_1^{**} és a „2" jelű szénfajtára ugyanezek az értékek k_2, A_2 és ΔH_2^{**}.

A folyamatsebességi állandók értékei:

$$k_1 = A_1 \cdot e^{-\frac{\Delta H_1^{**}}{R \cdot T}} \text{ és } k_2 = A_2 \cdot e^{-\frac{\Delta H_2^{**}}{R \cdot T}}$$

és a folyamatsebességek:

$$w_1 = k_1 \cdot f_1(c_{02}, c_{sz1}, \ldots) \text{ és } w_2 = k_2 \cdot f_2(c_{02}, c_{sz1}, \ldots)$$

ahol $f(c_{02}, c_{sz1}\ldots)$ a reagens gázkoncentrációt, a reakcióba lépő anyag koncentrációját és a fizikai körülmények hatását kifejező függvény.

Ha a szénkeverék „a" részarányban tartalmazza az „1" jelű komponenst, és feltételezzük, hogy a két szénfajta égése egymás mellett, de külön-külön folyik, akkor az eredő folyamatsebességi állandó:

$$k_{1,2} = a \cdot k_1 + (1-a)k_2 = a \cdot A_1 \cdot e^{-\frac{\Delta H_1^{**}}{R \cdot T}} + (1-a) \cdot A_2 \cdot e^{-\frac{\Delta H_2^{**}}{R \cdot T}}$$

és a folyamatsebesség:

$$w_{1,2} = a \cdot w + (1-a) \cdot w_2.$$

Exponenciális függvények összegezésénél az eredő nem lesz exponenciális, tehát eredő aktiválási energia nem állapítható meg.

A második feltételezés szerint a két különböző szénfajtára az égésfolyamat reakciókinetikailag hasonló, amin azt értjük, hogy az aktiválási energiák és az akciókonstansok egyenlők, azaz

$$\Delta H_1^{**} = \Delta H_2^{**} = \Delta H \text{ és } A_1 = A_2 = A.$$

Az égésfolyamatok közötti különbség az $f(c_{02}, c_{sz}, \ldots)$ függvények tulajdonságaitól függ. Itt elsősorban emlékeztetni kell a szenek közötti szerkezeti különbségekre. A szenek koruktól és a keletkezési körülményeiktől függően más-más szénültségi fokot érnek el, és ez a szén mikrostruktúrájában is jelentkezik. A fiatalabb szenekre a nagyobb szénültségű szenekhez viszonyítva pórusosabb szerkezet jellemző. A fiatalabb szeneknél a reakció lefolyására jelentős belső felület áll rendelkezésre, míg az idősebb szenek tömöttebb szerkezettel rendelkeznek, pórusosságuk kisebb. E gondolatmenet szerint k_1, k_2 folyamatsebességi állandóval, $A_1 = A_2 = A$ frekvenciafaktorral jellemezhető szénfajtáknál az eredő folyamatsebességi állandó értéke „a" részarányú keverék esetén:

$$k_{1,2} = a \cdot k_1 + (1-a) \cdot k_2 = A \cdot e^{-\frac{\Delta H^{**}}{R \cdot T}},$$

és a folyamatsebesség

$$w_{1,2} = a \cdot w_1 + (1-a) \cdot w_2 =$$

$$= \left[a \cdot f_1(c_{02},\ c_{sz1},\ldots) + (1-a) \cdot f_2(c_{02},\ c_{sz2},\ldots) \right] A \cdot \mathrm{e}^{\frac{\Delta H^{**}}{R \cdot T}}.$$

A különböző szénfajták együttes égésének folyamatát azonos reakciómechanizmus feltételezésével vizsgálva az eredő folyamatsebességi állandó változása exponenciális jellegű marad. Az $f(c_{02},c_{sz},\ldots)$ függvények különböző viselkedése határozza meg az eredő folyamatsebesség alakulását.

Gyöngyösi lignit és nógrádi barnaszénkeverékkel végzett kísérletek eredményei és azok értékelése

Hazai szeneink égésének megismerésére, a differenciál-termogravimetria és termoanalitika elvén alapuló hazai kifejlesztésű, korábban világviszonylatban élenjáró Erdei–Paulik-féle derivatográffal, a Villamosenergetikai Kutató Intézetben már az 1960-as évek elején végeztek kísérleteket (Bassa 1962 ,Weltner 1962). A hazai konstrukciójú műszer az anyag hevítésekor vagy égésekor fellépő súlyváltozását (TG), a hevítőkemence hőmérsékletét (T), a súlyváltozás sebességét (DTG), a hőszínezet jellegét (DTA) fotometrikus úton ábrázolja. A kemencében a vizsgálatokhoz szükséges atmoszféra előállítható. A nitrogénáramban felvett görbék, az illóanyagok mennyiségének és az anyag nedvességének meghatározására, valamint a hőmérséklet hatására végbemenő folyamatok regisztrálására alkalmasak.

A derivatográfos vizsgálat legnagyobb előnye, hogy változásában vizsgálja az égésfolyamatot. Az égésfolyamatok megismerésére a folyamatsebességi állandó ismeretének nagy jelentősége van, ami derivatográffal, a súlyváltozás és a súlyváltozás sebességének jelleggörbéjét ismerve meghatározható.

Az égés lefolyását jelentősen befolyásolja a fix karbon, az illó, a fix karbon és a hamu aránya, a hamu összetétele, az illó összetétele stb. A szenek éghető tartalma és az égésisebesség-állandó között nem találtak egyértelmű összefüggést.

Korábban csak egyfajta, illetve csak rokon szenek keverékének vizsgálatát végezték el. A vizsgálat szükségességét az a feltételezés indokolta, hogy a szénkeverékek égésénél feltehető, hogy a komponensek egymásra hatással vannak, tehát az összetevők tulajdonságai nem az összetétel arányában jelentkeznek az eredő tulajdonság meghatározásában.

A szénkeverékek égésfolyamatának vizsgálatát erőműi szempontból nagy jelentőségű, szénültségi fokban egymástól eltérő visontai lignit és nógrádi barnaszén keverekével végeztük.

A nógrádi barnaszén és a gyöngyösi lignit kereken 0, 30, 50, 70 es 100%-os keverékeit együtt őröltük meg, és a derivatográfos vizsgálatokat az így nyert őrleményekkel végeztük. A pontos keverési arányokat, a nyersszén és az őrlemény összetételét a 4.4. táblázat foglalja össze.

4.4. táblázat. A vizsgált szénminták jellemzői

A minta jele	Mérték-egység	I	II	III	IV	V
Lignit részarány (nyersszenet figyelembe véve)	%	100	67,3	52,5	35,7	0
Nógrádi részarány (nyersszenet figyelembe véve)	%	0	32,7	47,5	64,3	100
Lignit részarány (őrlemény)	%	100	65,9	50,8	34,4	0
Nógrádi részarány (őrlemény)	%	0	34,1	49,2	65,6	100
Illó	%	27,2	26,0	24,1	22,1	21,3
Fix C	%	19,7	20,4	19,6	21,6	22,0
Nedvesség *n*	%	11,2	7,8	6,8	8,2	4,6
Hamu *h*	%	41,9	45,8	49,5	48,1	52,1
Karbon *C*	%	28,9	29,2	27,3	27,3	28,1
Hidrogén H	%	2,6	2,6	2,6	2,5	2,6
Nitrogén N	%	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Oxigén O	%	12,5	12,1	11,3	9,8	11,1
Éghető kén S	%	1,4	1,0	1,0	0,7	0,2
Bomba kén S	%	1,4	–	–	–	–
CO_2	%	0,9	0,7	0,9	2,8	0,7
Égéshő	kJ/kg	11 834	11 934	11 345	11 650	11 516
Fűtőérték	kJ/kg	10 989	11 173	10 609	10 901	10 835

A minta jele	Mérték-egység	I	II	III	IV	V
Hamuösszetétel						
Fe_2O_3	%	11,6	9,4	8,3	8,0	6,3
Al_2O_3	%	13,5	16,0	16,3	20,0	22,4
CaO	%	8,2	6,3	4,4	5,0	2,5
MgO	%	2,7	1,4	1,9	1,3	1,6
SO_3	%	5,3	5,7	2,1	1,2	2,2
SiO_2	%	51,8	55,3	60,6	58,4	63,6
Egyéb	%	6,9	5,9	6,4	6,1	1,4

A táblázatban megadott őrlemények valamivel finomabbak voltak az általában ilyenfajta szenek tüzelésénél szokásos őrleményeknél. A derivatográffal az égésfolyamat-sebességek alakulását kívántuk vizsgálni. Az előzőekben tett megállapításaink szerint ez függ a szén szerkezetétől és az őrlemény paramétereitől is. Az őrlemények finomságának összehasonlítására a 4.5. táblázatban az egyes keverékőrlemények szitaanalízisével nyert szitamaradvány-értékek alkalmasak.

4.5. táblázat. A vizsgált szénkeverék-őrlemények szemcseösszetétele

A minta jele:	I		II		III		IV		V	
Lignit részarány %	100		67,3		52,5		35,7		0	
Nógrádi részarány %	0		32,7		47,5		64,3		100	
Megnevezés	Szemcse-méret	Maradvány	Szemcse-méret	Maradvány	Szemcse-méret	Maradvány	Szemcse-méret	Maradvány	Szemcse-méret	Maradvány
	x	R	x	R	x	R	x	R	x	R
	µ-nál nagyobb	%	µ-nál nagyobb	%	µ-nál nagyobb	%	µ-nál nagyobb	%	µ-nál nagyobb	%
Szemcseméret szerinti frakció felső szemcsehatára (56 mikron fölötti szitalyukméret)	2,4	93,2	2,1	96,8	2,1	96,4	2,2	96,8	2,3	95,9
	3,5	87,5	3,1	91,7	3,2	91,6	3,3	89,1	3,3	90,3
	6,1	80,0	5,4	83,9	5,5	83,5	5,7	80,9	6,0	82,6
	10,5	71,3	9,2	76,4	9,5	75,8	9,9	73,6	10,2	75,1
	16,8	62,4	14,9	69,1	15,2	68,6	15,8	64,9	16,4	67,9
	31,2	47,3	27,8	59,7	28,4	59,5	29,4	55,0	30,4	55,2
	39,1	41,0	35,7	54,9	35,5	54,4	36,8	49,9	38,1	49,4
	44,4	37,5	39,3	52,1	40,2	51,7	41,7	47,1	43,2	46,2
	56,0	34,1	56,0	40,9	56,0	42,1	56,0	36,8	56,0	42,7
	88,0	18,4	88,0	22,3	88,0	28,0	88,0	21,6	88,0	29,9
	102,0	12,1	102,0	14,9	102,0	18,0	102,0	11,3	102,0	19,6
	120,0	9,1	120,0	10,8	120,0	14,4	120,0	7,8	120,0	15,3
	150,0	4,6	150,0	3,8	150,0	7,9	150,0	2,9	150,0	8,0
	200,0	2,4	200,0	0,9	200,0	2,9	200,0	0,6	200,0	2,6
	300,0	1,0	300,0	0,2	300,0	1,0	300,0	0,1	300,0	0,5

A szenek összehasonlítására szolgáló nedvesség- és hamumentes anyagra számított égéshő, fix C és hidrogén H értékek a 4.6. táblázatban találhatók.

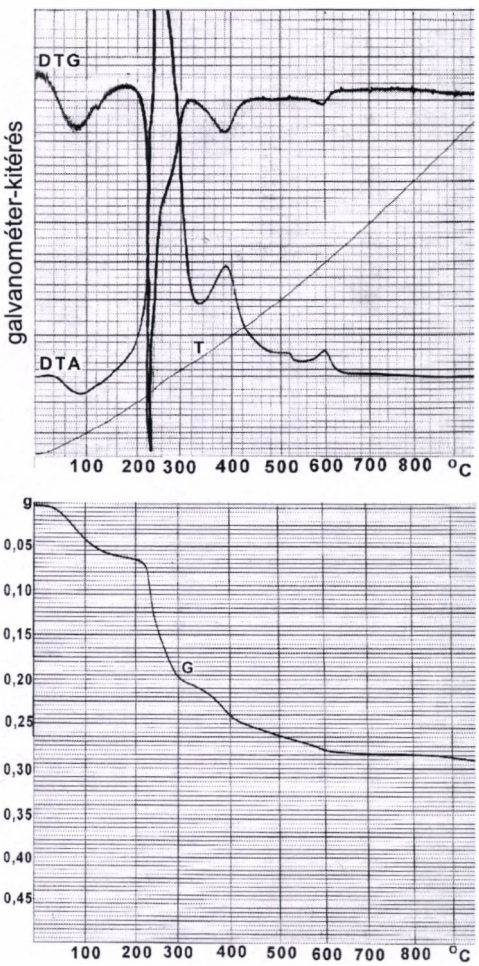
4.6. táblázat. Nedvesség- és hamumentes szénjellemzők

Megnevezés \ A minta jele	Dimenzió	I	II	III	IV	V
E_0	kJ/kg	25 289	25 749	25 958	26 543	26 627
Fix C	%	42,0	44,0	45,0	49,4	50,8
Illó	%	58,0	56,0	55,0	50,6	49,2
C	%	61,7	62,8	62,4	62,6	64,9
H	%	5,54	5,6	5,96	5,73	6,0

Levegőáramban az égési vizsgálatok 0,5 g, a nitrogénáramos hőbomlási vizsgálatok 1,0 g bemért anyagmennyiséggel történtek. A kemence felfűtési sebessége 5 °C/perc volt. A vizsgálatoknál a kemencén 15 l/h gázmennyiség áramlott keresztül. A korábbi tapasztalatok alapján az első vizsgálatoknál alkalmazott magas falú tégely helyett 20 mm átmérőjű, alacsony oldalfalú tányér került alkalmazásra. A bemért anyagmennyiséget figyelembe véve ez lehetővé tette, hogy megfelelő mennyiségű oxigén jusson a minta felületéhez, illetve a belsejébe.

E lapos tányérkák az égésfolyamatok vizsgálatára jól beváltak, a tüzelőanyag a hamutartalomig teljesen eléghetett. Az égési feltételek a kiégés folyamán kedvezőbbé válnak, mert az anyagmennyiség fogyásával, az áramlási feltételek korlátjai az oxigén számára egyre inkább megszűnnek. E lapos tányérkákkal végzett vizsgálatok azt mutatták, hogy a kísérleti eredmények jól reprodukálhatók, és így az értékelések nagy biztonsággal elvégezhetők.

A különböző keverékőrleményekkel mind nitrogénáramban, mind levegő-

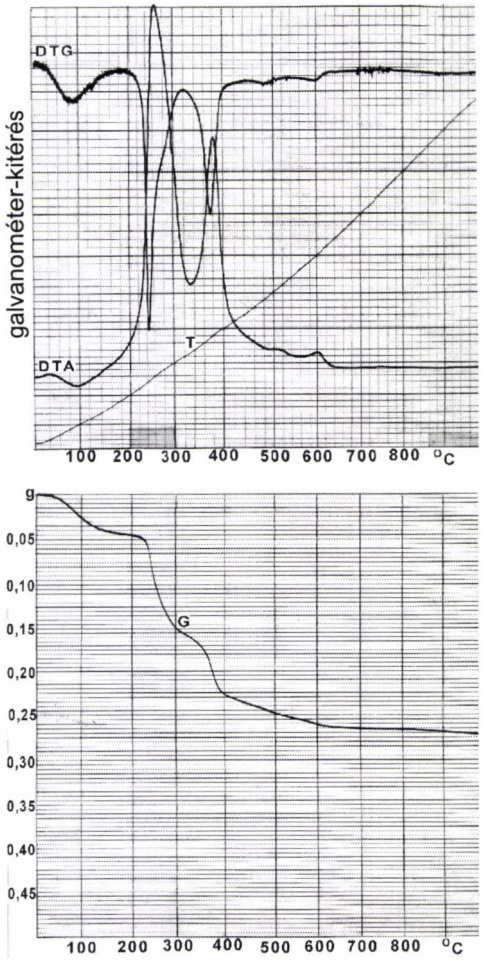


4.12. ábra. A gyöngyösi lignit derivatogramja (levegőáramban)

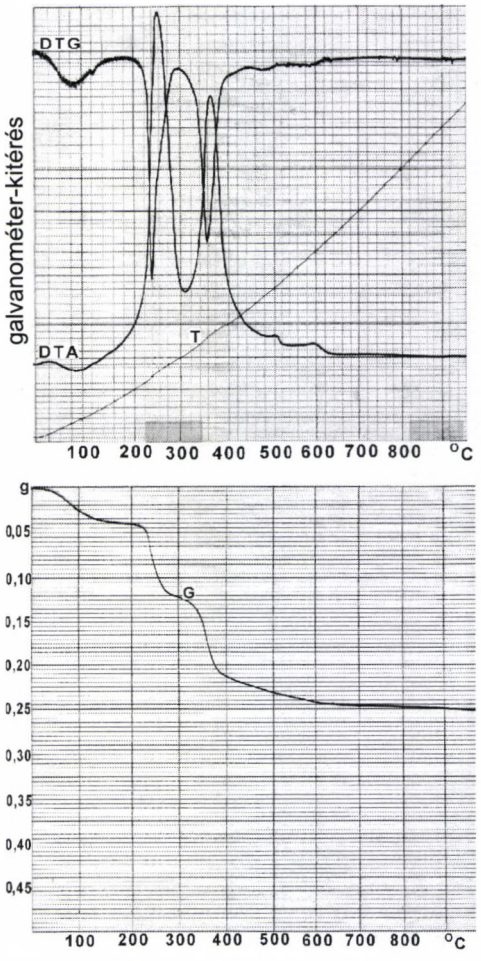
áramban megtörténtek a derivatográfos kísérletek. A felvett görbék közül néhányat a 4.12.–4.16. ábrák szemléltetnek.

Az égési folyamat megismerésére a diagramok közül főképpen a levegőáramban végzett égésvizsgálatok használhatók. A nitrogénáramos felvételek elsősorban az illótartalom meghatározására szolgálnak.

A 4.12. ábra, a táblázat szerinti összetételű lignitőrlemény égésfolyamatát szemlélteti. A (TG) görbe a súlyváltozást a (DTG) görbe a súlyváltozás sebességét, a (T) görbe a derivatográfban lévő, a vizsgálati tányérhoz hasonló platinatégelyben elhelyezett (AlO_3) aluminiumoxid hőmérsékletének a változását, a (DTA) görbe, a vizsgálati anyag és az Al_2O_3 közötti hőmérséklet-különbséget (és ezzel a folyamat



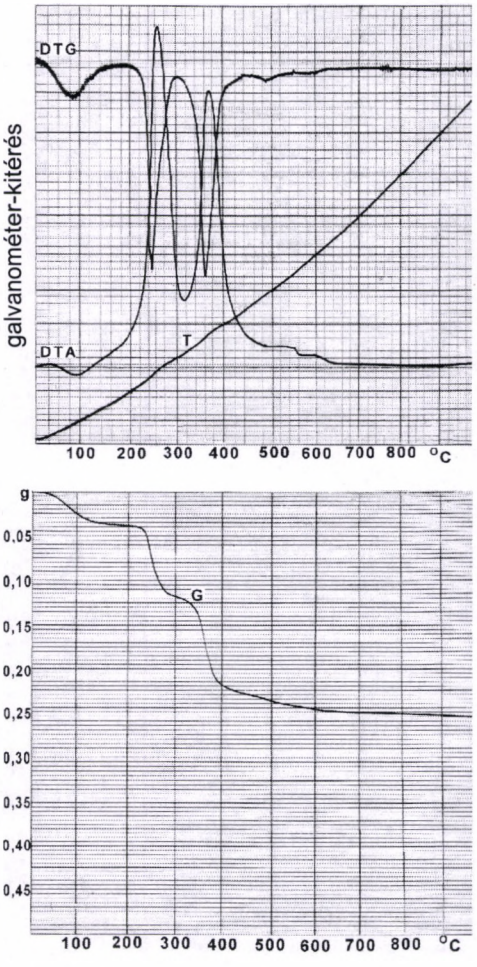
4.13. ábra. 70% gyöngyösi lignit
és 30% nógrádi barnaszén derivatogramja
(levegőáramban)



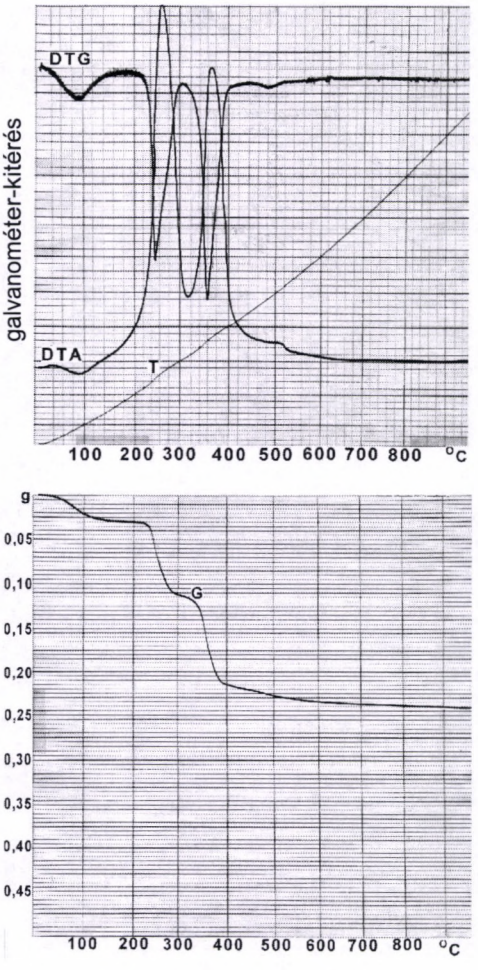
4.14. ábra. 50% gyöngyösi lignit
és 50% nógrádi barnaszén derivatogramja
(levegőáramban)

exoterm vagy endoterm jellegét) mutatja. A kemence hőmérsékletét emelve a szénből először a nedvesség távozik. A száradás sebessége kb. 80 °C-on éri el maximumát, amit a (DTG) görbén jelentkező csúcsérték mutat.

A 11,2%-os nedvesség eltávozása kb. 130 °C-on fejeződik be. A (DTA) görbéből az látható, hogy a vizsgált szénminta hőmérséklete az inert anyag hőmérsékleténél alacsonyabb, ami a párolgás endoterm jellegére mutat. A hőmérséklet emelkedésével, a nedvesség távozása után fokozódik az illófelszabadulás sebessége, majd erős exoterm hatás jelentkezik, ami nyilvánvalóan a felszabadult illó égése következtében lép fel. A (DTG) görbén 230 °C-on igen nagy mértékű maximum jelentkezik, az inertanyag és a szénpor hőmérséklete közötti hőmérséklet-különbség jelentős.



4.15. ábra. 30% gyöngyösi lignit és 70% nógrádi barnaszén derivatogramja (levegőáramban)



4.16. ábra. A nógrádi barnaszén derivatogramja

A maximum elérése után a súlyváltozás sebessége rohamosan csökken és kb. 310-320 °C-on egészen kis értékre esik vissza. Az anyag éghető tartalmának kb. 60%-a elégett. A kemence-hőmérséklet további emelésével a súlycsökkenés sebessége ismét növekedni kezd és 380-390 °C-on ismét maximumot ér el, amely azonban az előbbinél lényegesen kisebb. A (DTA) görbe is a csökkenő szakasz után ismét emelkedik. A második csúcsot követőleg a (DTG) görbe fokozatosan esik, majd 440 °C-on közel egyenesbe való átmenet után, később még kisebb exoterm színezetű maximumok tapasztalhatók.

A nógrádi szénőrlemények derivatográfos vizsgálatakor felvett diagram a 4.18. ábrán látható. Első maximumértéke a száradási sebesség csúcsértékét jelzi. A 4,6% nedvességtartalom már kb. 105 °C-on teljes egészében eltávozott, utána megkezdődött az illó felszabadulása. Nógrádi szénnél kb. 250 °C-on jelentkezik az első, erős exoterm hatásra utaló maximumhely, amelynek abszolút értéke azonban a lignit ugyanezen hőmérséklet-tartományban a talált maximumértéknél jelentősen kisebb. A (DTA) görbén látható maximum is a lignithez viszonyítva kisebb, vagyis az égési hőmérséklet alacsonyabb. Az első exoterm folyamatot jellemző csúcsérték elérése után a (DTG) görbe 300–310 °C hőmérsékletig csökkenő tendenciát mutat. E görbeszakasz felső határértékének eléréséig, a 4.16. ábra (TG) görbéjéből megállapítva az éghetőnek kb. 41,5%-a lépett reakcióba. A 4.4. táblázatot figyelembe véve megállapítható, hogy az illónak a szénből való távozása nem történt meg teljes mértékben ezen időpontig. A súlycsökkenés sebessége 300 °C után ismét növekszik, és 360 °C-nál ismét maximumot mutat, amely az első maximum értékét meghaladja. A súlycsökkenés sebessége a továbbiakban 400–410 °C-ig fokozottan csökken, majd ezt ismét kisebb csúcsérték követi.

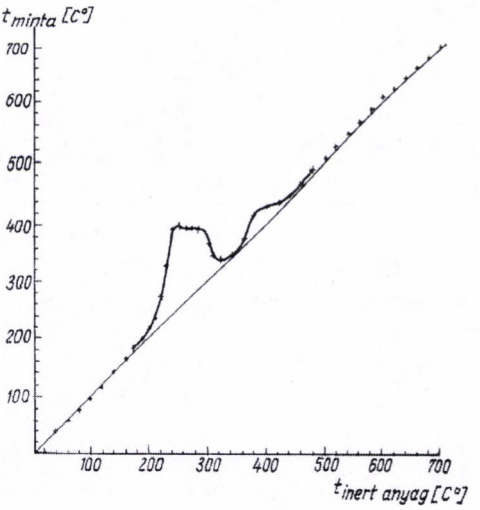
A 4.13–4.15. ábrák a keverékkel végzett derivatográfos vizsgálatoknál felvett görbéket szemléltetik. A (DTG) görbéből jól megállapítható az összetevő komponensek változásának hatása. A lignitösszetevő részarányának csökkenésével a vízmaximumot követő első (DTG) maximum csökken, a második pedig fokozatosan növekedik.

A felvett diagramok alapján a szénkeverékek égésével kapcsolatban levonható következtetések:

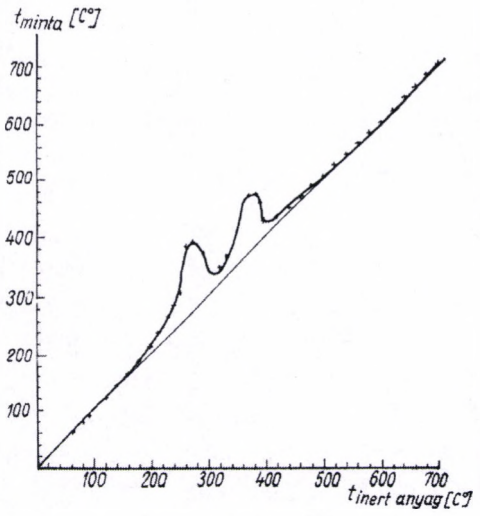
A gyöngyösi lignit és nógrádi barnaszénkeverékek égésfolyamatának elemzésére sokatmondóak a derivatográfos görbékből szerkeszthető, a mintahőmérséklet függvényében ábrázolt diagramok. A reakció szempontjából a minta hőmérsékletének jelentős szerepe van. A vizsgálatkor a szénőrlemények hőmérséklete a (DTA) görbék tanúsága szerint a kemencében uralkodó hőmérséklettől kisebb-nagyobb mértékben negatív vagy pozitív irányban eltér. A (DTA) galvanométer állandójának, azaz a (DTA) görbe léptékének ismeretében a (DTA) görbék alapján megszerkesztethetők a vizsgált minták hőmérséklet-változásainak görbéi. A görbék szerkesztésének módja az,. hogy a derivatogramokon ábrázolt (T) görbén található hőmérsékletértékhez hozzáadják a (DTA) görbéből, az adott abszcisszánál kimetszett ordináta alapján számítható hőmérséklet-különbséget. A számított értékek

alapján az őrlemények égésekor az őrlemények hőmérsékletének változásai a 4.17., 4.18. és 4.19. ábrákon láthatók.

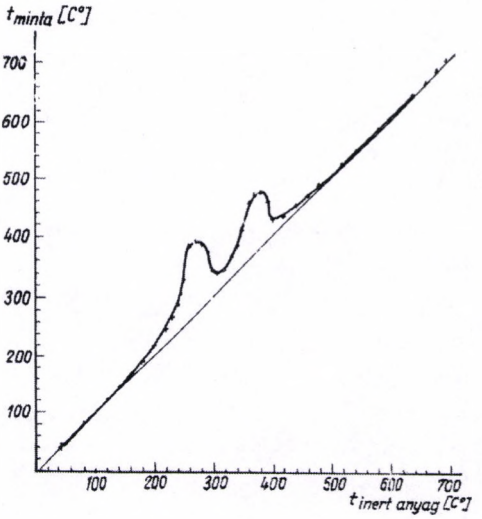
A derivatográffal felvett görbékből kiolvasható változások értékelésének legegyszerűbb eljárása szerint az egyes (DTG) csúcsértékeket a (DTG) görbe alatti terület átlagához viszonyítva adjuk meg. Az értékelési munka úgy történik, hogy a (DTG) görbe alatti területet 20 és 800 °C hőmérséklet-határok között planimetrálással meghatározzuk. A terület ismeretében kiszámítható e tartományban az átlagos galvanométerkitérés, amely az anyag átlagos bomlási sebességének felel meg. Az így kapott értéket 100%-nak fogadva el,



4.17. ábra. Gyöngyösi lignitőrlemény hőmérsékletének változása a derivatográfban való vizsgálat folyamán



4.18. ábra. 50% gyöngyösi lignit és 50% nógrádi barnaszénőrlemény hőmérsékletének változása a derivatográfban való vizsgálat folyamán



4.19. ábra. Nógrádi barnaszénőrlemény hőmérsékletének változása a derivatográfban való vizsgálat folyamán

a (DTG) görbéről leolvasható maximumértékek az átlagérték százalékában meghatározhatók. Az így meghatározott értékeket, továbbá a lignit és a nógrádi szén derivatogramja (DTG) alapján a keverékek esetén az összetétel arányában számított első és második égési csúcsértékeket a 4.7. táblázat tartalmazza.

4.7. táblázat. A bomlási csúcsértékek az átlagértékek arányában

	I	II	III	IV	V
Mért első égési csúcs	1157	983	910	828	656
Mért második égési csúcs	171	492	677	795	807,5
Számított második égési csúcs	171	389	484,8	588,6	807,5

A 4.7. táblázat adatai azt mutatják, hogy az átlagos súlycsökkenési sebességhez viszonyítva, a súlyarány szerint számított értékek az első égési csúcsot tekintve nagyobbak, míg a második égési csúcs esetén kisebbek, mint a mért értékek.

A gyakorlat számára lényeges a súlycsökkenési sebességek korrekció nélküli értékeinek az összehasonlítása is. A súlyváltozási sebességek mért és számított, korrekció nélküli, a (DTG) görbékből lemért csúcsértékeit az 4.8. táblázat tartalmazza. Az 4.8. táblázat adatainak meghatározása tehát egyszerűen a (DTG) görbéken lemérhető kitérések és a (DTG) galvanométer állandójának ismerete alapján történt.

4.8. táblázat. A tényleges tömegváltozási csúcsértékek

	I	II	III	IV	V
Mért első égési csúcs	27,8	19,85	17,15	15,65	14,38
Számított első égési csúcs	–	23,20	21,22	18,97	–
Mért második égési csúcs	4,18	11,42	14,47	16,20	17,50
Számított második égési csúcs	–	8,72	10,72	12,94	–

A 4.8. táblázat hasonló eredményt szolgáltat, mint a súlyváltozási sebességcsúcsok százalékos értékelése. A mért súlyváltozási sebesség az első égési csúcsnál nem éri el a súlyarány szerint számítható értéket, míg a második égési csúcs a súlyarány szerint számítható értéket meghaladja. Ez a jelenség a következő meggondolással magyarázható: a lignit égésekor az illó nagy része 380 °C-on szabadul fel. A lignit magasabb hőmérsékleten felszabaduló illó részekből viszonylag keveset tartalmaz, az összetételnek megfelelően nagy első égési csúcs után viszonylag kis második égési csúcs következik, és a hőmérséklet is viszonylag alacsony. Ha a lignithez nógrádi szenet keverünk, akkor a 380 °C-on felszabaduló illó részaránya csökken és ennek következtében a minta rövidebb ideig lesz ezen a hőmérsékleten. A rendelkezésre álló kevesebb idő alatt a lignitből is viszonylag kevesebb illó szabadul fel. Ezzel magyarázható, hogy a súlyarány szerint várhatónál kisebb súlyváltozási sebességet kapunk. A második égési csúcs esetén a nógrádi szénből felszabaduló illó égése által létrejött hőmérséklet-emelkedés kihat a lignit égésére is. A tiszta lignit égéséhez viszonyítva a keverékben való égésnél a lignit súlycsökkenési sebessége is megnő, ezért a számításnál nagyobb súlycsökkenési sebességet kapunk. A következtetések helyességét a (TG) görbék alapján meghatározott, az

egyes csúcsokig elért kiégési értékek is alátámasztják. A kiégett anyagmennyiség, a (TG) görbén lemérhető kitérés, továbbá a lépték, a galvanométer állandó ismeretében meghatározható. Az ily módon meghatározott adatokat a 4.9. táblázat tartalmazza.

4.9. táblázat. Az égés különböző szakaszainak végéig elégett anyagmennyiség

	I	II	III	IV	V
Mért kiégés az első csúcsot magában foglaló szakasz végéig	0,2	0,157	0,121	0,117	0,112
Számított kiégés az első csúcsot magában foglaló szakasz végéig	–	1,1702	0,1584	0,1431	–
Mért kiégés a második csúcsot magában foglaló szakasz végéig	0,253	0,235	0,125	0,228	0,217
Számított kiégés a második csúcsot magában foglaló szakasz végéig	–	0,405	0,235	0,229	–

A 4.9. táblázat szerint a szénkeverékek égése esetén a kiégés mértéke mind az első, mind a második égési csúcs eléréséig elmarad a súlyarány alapján számítható kiégéshez képest. Az első és a második égési csúcs között a kiégett anyagmennyiség több, mint a számítás szerint adódik, de a teljes elmaradást nem képes kiegyenlíteni. Végeredményben tehát keveréknél ugyanazon mennyiségű anyag elégése hosszabb idő alatt megy végbe. Ez a mintahőmérsékletek alakulásával magyarázható.

Az éghetőre vonatkoztatott folyamatsebesség-állandó meghatározására vonatkozó új módszerünk alkalmazásával értékelhető a különböző szénkeverékek égésének folyamata. A vizsgálatnál az éghető anyag mennyisége fokozatosan csökken a teljes elégésig. Ez arra hívja fel a figyelmet, hogy bár a kísérlet későbbi szakaszaiban jelentkező (DTG) csúcsértékek és kitérések kisebbek abszolút értékben az égés első fázisában mérhető értékekhez viszonyítva, de jelentőségük a kis éghető mennyiség figyelembevételével nem hanyagolható el. Ezért olyan értékelési eljárásra van szükség, amely az éghető anyag koncentrációjának változását is figyelembe veszi, azaz e jelentős különbségtől elvonatkoztatva vizsgálja a viszonyokat. Az anyag nagymértékű elégése miatt a (DTA) görbében a változások viszonylag kisebbek, de határozottan megállapíthatók. A vizsgálathoz felhasznált műszer érzékenysége a lapos tányérka alkalmazásával jelentősen megnőtt, ezenkívül a fotoregisztrálás szintén megbízható módszer a kis változások megállapítására. A javasolt értékelési módszer a következő: A (T) görbe és a (DTA) görbe alapján az előzőekben megállapíthatók a 4.19., 4.20. és 4.21. ábrákon látható mintahőmérséklet-változási görbék. Ennek jelentőségére azzal lehet rámutatni, hogy láthatóan bizonyos hőmérséklet-tartományokban a kemencében mért és a mintahőmérséklet-értékek között közel 200 °C különbség is jelentkezik, amelyet a folyamatsebességi állandó hőmérsékletfüggését ismerve feltétlen figyelembe kell venni. Ezt követően min-

den hőmérséklethez (5–10 °C-os osztással) meghatározzuk a (DTG) görbéből a súlyváltozás-sebesség a (DTG) galvanométer-karakterisztika ismeretében. Ezután a (TG) görbéből, a hamutartalom ismeretében, az elemzésből és a (TG) görbéből is meghatározzuk az adott hőmérsékletnél még meglevő éghető mennyiségét. A (T) galvanométer-állandója, illetve az ordinátabeosztás ismert. Ezen adatok birtokában a folyamatsebesség-állandó értékei a következő képlettel határozhatók meg:

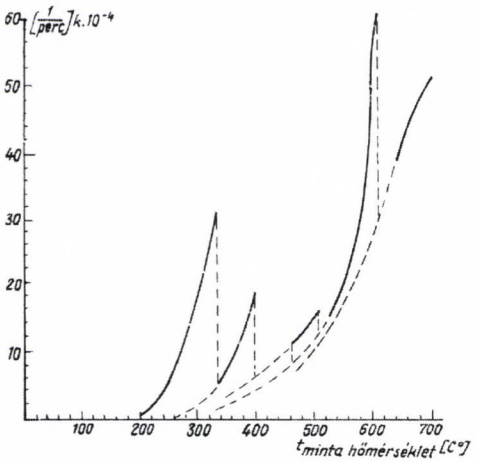
$$k = \frac{C_{DTG} \cdot Y_{DTG}}{0{,}5 - h - C_G \cdot Y_G} [1/\text{perc}],$$

ahol

C_{DTG} a (DTG) galvanométer állandója;
Y_{DTG} a (DTG) görbéből lemérhető metszék;
C_G a (TG) galvanométer-állandója;
h a hamutartalom;
Y_G a (TG) görbéből lemérhető metszék

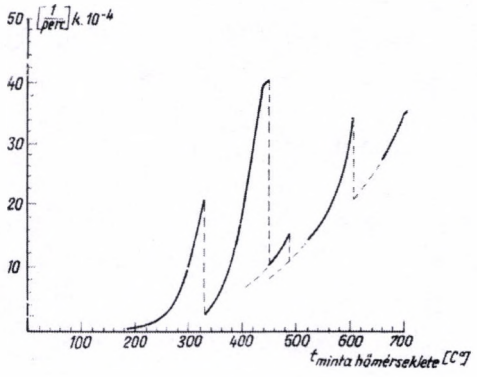
A különböző szénkeverékkel végzett kísérletek eredményei alapján számított folyamatsebességi állandók változásai a hőmérséklet függvényében a 4.20., 4.21., és 4.22. ábrákon láthatók.

Az őrleményben minden időpillanatban még ténylegesen meglevő éghetőre számított folyamatsebességi állandónak a hőmérséklet függvényében való változása alapján igen értékes következtetéseket lehet levonni az égés mechanizmusára. Az ábrák szerint a szénégés folyamatában 200–700 °C-ig öt, egymástól élesen elválasztható hőmérséklet-tartományt lehet megkülönböztetni. Kb. 200–300 °C-ig az első, 330–440 °C-ig a második, 450–510 °C-ig a harmadik, 520–610 °C-ig a negyedik és 610–700 °C-ig terjed az ötödik tartomány. A folyamatsebességi állandók változását vizsgálva megállapítható, hogy az egyes hőmérséklet-tartományokban valamelyik komponens égése meghatározó szerepet játszik. A különböző keverékek égésekor a megfelelő hőmérséklet-tartományban a változás jellegét a komponens mennyisége határozza meg. A 4.20., 4.21. és 4.22. ábrákon látható folyamatsebességi állandók változásának kialakulásában mind a fizikai, mind a kémiai körülmények hatása együtte-

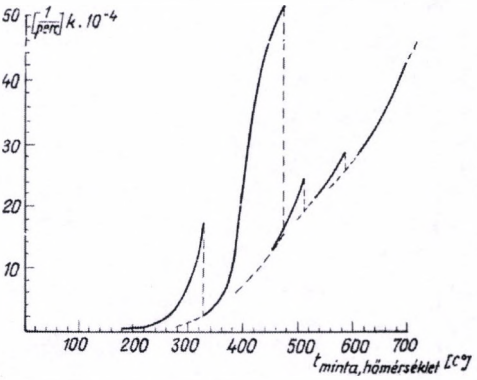


4.20. ábra. Gyöngyösi lignit reakciósebesség-állandójának változása a mintahőmérséklet függvényében (levegőáramban). Az adatok az összes éghetőre számítva

sen érvényesül. Így például jelentős a befolyása a szén szerkezetének, az illó komponensek felszabadulási sebességének stb.



4.21. ábra. 50% gyöngyösi lignit és 50% nógrádi barnaszén reakciósebesség-állandójának változása a mintahőmérséklet függvényében (levegőáramban). Az adatok az összes éghetőre számítva



4.22. ábra. Nógrádi barnaszén reakciósebesség-állandójának változása a mintahőmérséklet függvényében (levegőáramban). Az adatok az összes éghetőre számítva

A szénvizsgálatoknál a jelenségeket mint bonyolult fizikai-kémiai folyamatot kell tekinteni. Ennek megfelelően kerülni célszerű az égésvizsgálatoknál a reakció szó használatát, és a folyamattal kapcsolatban lehet észrevételeket tenni. Az eredmények azonban azt mutatták, hogy bizonyos hőmérséklet-tartományokban létezhet olyan reakció, amely meghatározza a folyamat lefolyását. A folyamatsebesség nagyságát tehát számos tényező befolyásolja, de a megfelelő hőmérséklet-tartományokban a folyamatok között hasonlóság van. Ez biztosítja, hogy az egyes folyamatsebességi állandó függvények alapján az aktiválási energiához hasonló jellemzőt lehessen megállapítani. A 4.20., 4.21. és 4.22. ábrák görbéi alapján a különböző hőmérséklet-tartományokra megállapított aktiválási energia jellegű folyamatjellemzőt kJ/kmolban a 4.10. táblázat tartalmazza.

4.10. táblázat. Az egyes égési szakaszokra számítható folyamatsebességi állandók kJ/kmol

Hőmérséklet- tartomány °C	I	II	III	IV	V
200–330	70 224	74 404	74 195	83 040	74 704
330–480	77 934	81 928	81 092	80 256	76 076
450–510	52 250	59 356	54 549	58 526	56 430
520–610	105 754	107 844	103 500	112 024	84 436
610–700	38 038	38 038	33 858	39 710	34 694

A 4.10. táblázatban szereplő adatok szerint a megfelelő hőmérséklet-tartományokban az ily módon számított, látszólagos aktiválási energiák között nincs nagy eltérés. A különbségek 10%-nál kisebbek, és ilyen nagyságú eltérések a meghatározás hibatartományába esnek. A szénkeverékek őrleményeinek derivatográfos vizsgálata azt mutatta, hogy az égésfolyamat eredő folyamatsebesség-értékei a komponensek folyamatsebességének a keverési arány szerint, közvetlenül nem számíthatók. A folyamatsebességi állandók hőmérséklet szerinti változását leíró függvény szakadásos. Az egyes hőmérséklet-intervallumokban van olyan jellemző alkotó, amelynek égési mechanizmusa meghatározó jellegű az egész keverékre, tehát számos tényező befolyásolja, de a megfelelő hőmérséklet-tartományokban a folyamatok között hasonlóság van. Ez biztosítja azt, hogy az egyes folyamatsebességi állandó függvények alapján az aktiválási energiához hasonló jellemzőt lehessen megállapítani

4.8. Félüzemi, üzemi kísérletek. A berendezés rövid leírása

Félüzemi kísérleteket elsősorban a nagy gyártócégek fejlesztéseik során vagy az üzemek, új technológiák bevezetése előtt hajtanak végre. Ezek nagyon költséges kutatások, ezért általában szak-kutatóintézetekben, vagy gyári laboratóriumokban végzik. Ilyen például a fluidizációs tüzelés bevezetésével kapcsolatos kutatás-fejlesztés. A Villamosenergia-ipari Kutató Intézetben (VEIKI) folyó kutatásokhoz létesített félüzemi fluidizációs kazán kapcsolási vázlata a 4.23. ábrán és fényképen a 4.24. ábrán látható.

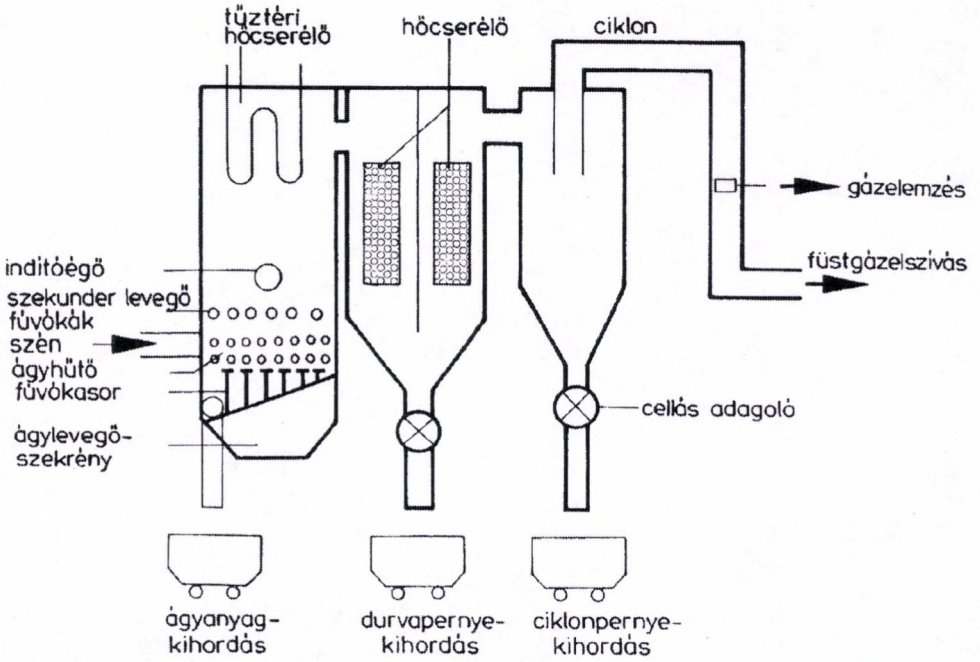
A kazánberendezés háromhuzamú, kényszerkeringtetésű, melegvizes, atmoszferikus fluidizációs, egyedi tervezésű, félüzemi léptékű kísérleti kazán.. A kazán fontosabb névleges adatai, 4.11. táblázat:

4.11. táblázat. A VEIKI félüzemi fluidizációs kísérleti kazán adatai

Hasznos hőteljesítmény	0,5 MW,
Fluidágy-hőmérséklet	750–900 °C,
Ágyanyagszemcsézet	0,8–1,2 mm,
Szénszemcse max. átmérője	6 mm
Hűtővízáram	4 kg/s
Ágy átlagos keresztmetszete	0,49 m^2
Ágy hűtőfelülete	1,39 m^2
Konvektív hűtőfelület	4,83 m^2
Szabadtéri hűtőfelület	0,628 m^2
Ágy anyagmagassága	0,4–0,6 m
Fluidizációs sebesség	1,5–2,3 m/s

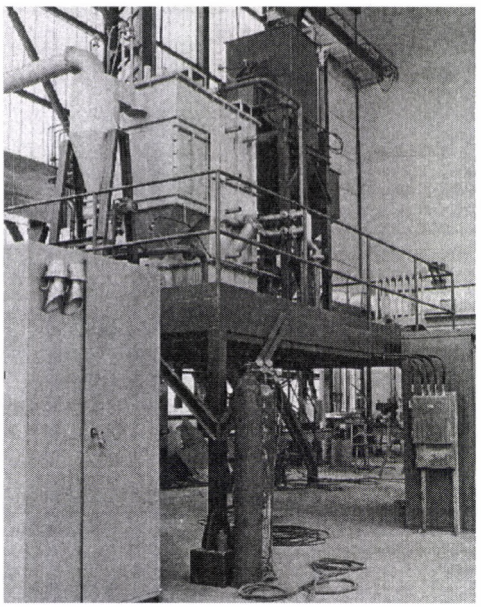
Az égési levegőellátás nagyobb hányada a fluidizáló fúvókákon keresztül történik, kisebbik – és természetesen szintén szabályozható mennyiségű – hányada az ún. „szekunder" levegőnyílásokon áramlik a tűztérbe, kevéssel az ágy felső szintje felett. A szekunder levegőadagolás főként a szén-monoxid elégetése miatt történik.

A tüzelőanyag-ellátó rendszer egy szén- és egy adalékanyag-hombárral rendelkezik. Mindkét hombár alján egy szabályozható fordulatszámú cellás adagoló biztosítja a kívánt mennyiséget, illetve keverési arányt. A cellás adagolókból ejtőcsövön jut a szén, illetve az adalék a közös szállítócsigára, amely a szenet, illetve keveréket a tűztérbe juttatja, az ágyanyag kb. fele magasságában.



4.23. ábra. Laboratóriumi fluidizációs kísérleti berendezés

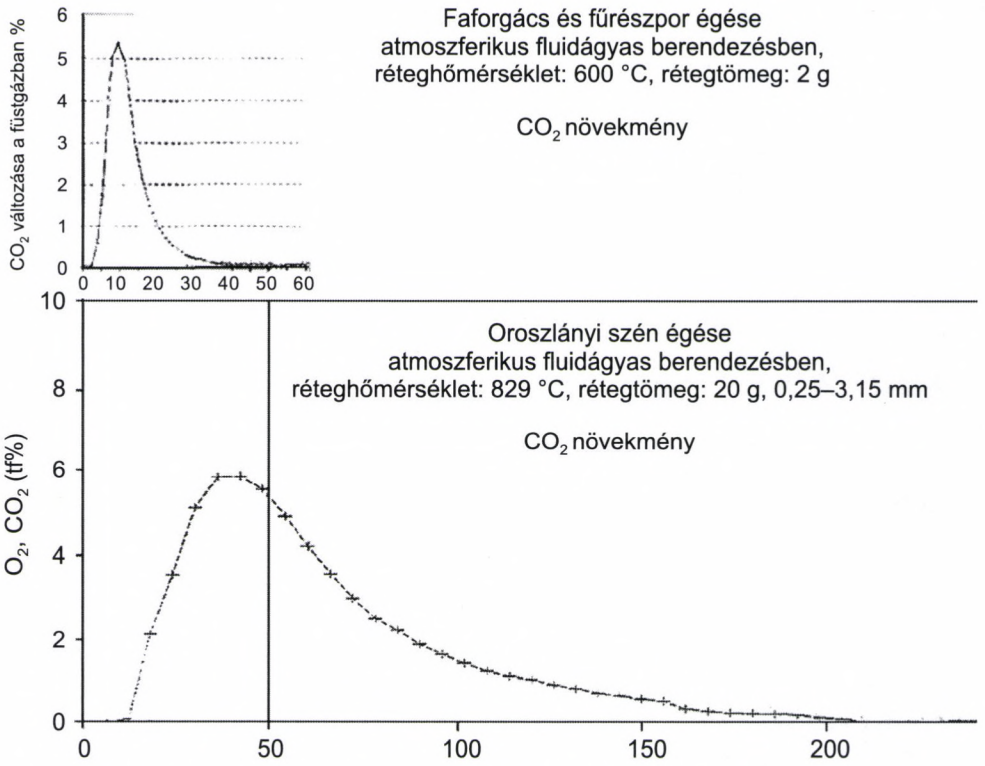
A félüzemi berendezésekben nyert eredmények mélyebb égéselméleti elemzésére laboratóriumi, de a folyamatot jól leképező égésvizsgálatok is történnek. A fluidizációs eljárásnál a kis méret ellenére a folyamat eléggé hasonlatos a nagyobb méretűhöz. Ilyen elemzésekre különösen szükség van, amikor egy újabb tüzelőanyag alkalmazására kerül sor. Ilyen eset volt, amikor a biotüzelőanyagok az energetikai iparban is szélesebb körben kezdtek teret nyerni. A fa és az oroszlányi szén égését befolyásoló paraméterek közül, az előzetesen célszerűnek megállapított hőmérséklet mellett mutatja a 4.25. ábra (Balogh et al. 1997).



4.24. ábra. Kísérleti kazán fényképe

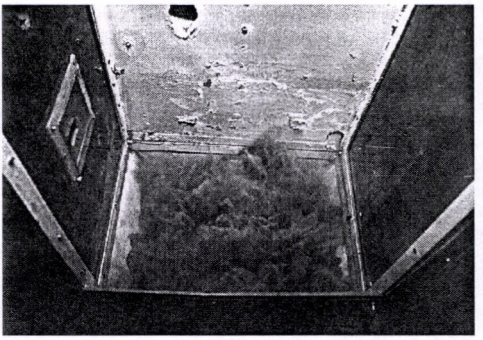
A fluid tüzelési rendszerű erőműi kazánokkal szerzett tapasztalatok alátámasztják ezen tüzelési rendszer előnyeit. Esetenként a kénmegkötéshez szükséges kalciumtartalom mintegy 3-szoros feleslegben van magában a szénben, de a kénmegkötés hatásfoka mégsem haladja meg a 75%-ot.

A növelés lehetőségeinek megállapításához ismerni kell az égés és kénmegkötés, illetve a megkötött kén visszaalakulásának egymással összefüggő részfolyamatait. Az üzemi, például szénportüzelésű kazánokban kísérletek céljára nagyobb szerkezeti változtatásokra nincs lehetőség, ezért laboratóriumi meleg, illetve hideg modellberendezéseken végeznek kísérleteket. A hasonló-



4.25. ábra. Oroszlányi szénőrlemény égési vizsgálata fluidizációs körülmények között

sági törvények betartásával kisméretű kísérleti berendezésen végzett mérési eredmények jól egyeznek az üzemi berendezésen végzett mérések eredményeivel, és ennek alapján az átalakítás biztonságosan elvégezhető.



4.26. ábra. Fluidizációs kísérlet hideg modellen

Fontos a jó keveredés, amit a szemcsés anyag többszörös cirkuláltatásával lehet elérni. Különösen fontos a jó keveredés elérése olyan tüzelőberendezésben, amelyben a tüzelt szén kalciumtartalma nem magas, és viszonylag nagy tömegarányban adalékot kell biztosítani. A jó keveredéssel kevesebb adalékanyaggal is elérhető ugyanolyan jó kénmegkötési hatásfok, mint a többszörös adagolási felesleg esetén. A fluidágyon létrejövő áramlásokat hideg modellben, homokkal jól lehet tanulmányozni (Reményi et al. 1997).

5. Paradigmaváltás a tüzeléstechnikában

Ma lényegében három legfontosabb ipari méretű energiafejlesztési lehetőség áll az emberiség rendelkezésére: a fosszilis energiák (szén, gáz, kőolaj), a megújuló energiák (természeti közvetlen, azaz víz-, szél-, napenergia) és az atomenergia. Minden más vagy futurisztikus, azaz ma még az ipari megvalósíthatósága nem dönthető el, vagy marginális, azaz jelentősége igen csekély, mert az összes energiaigény elhanyagolhatóan kicsiny részét tudja csak szolgáltatni.

2001-ben a világon megtermelt villamos energia döntő részét (86%) a fosszilis energia adta, a vízenergia részaránya 6,8%, az atomenergiáé 6,7%, az összes többié pedig mindössze 0,8%.

A különböző energiahordozó-fajták részesedését és a részesedésük változását mutatják az 5.1. ábra és az 5.1. és az 5.2. táblázatok.

5.1. táblázat. Energiahordozók energiaforrás szerint 2008

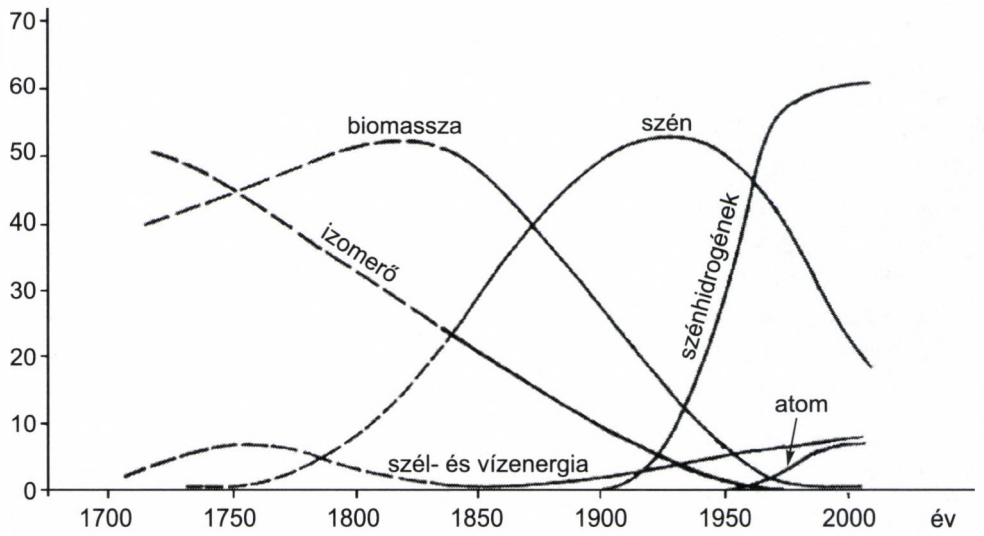
Tüzelőanyag-fajta	TWh	%
Olaj	48 204	33,5
Szén	38 497	26,8
Gáz	30 134	20,9
Nukleáris	8 283	5,8
Víz	3 208	2,2
Egyéb RE*	15 284	10,6
Plusz	241	0,2
Összes	143 851	100,0

*=nap, szél, geotermál és bio
Forrás: IEA

5.2. táblázat. A teljesítménymegoszlás tüzelőanyag-fajták szerint

Tüzelőanyag-fajta	Átlagos teljesítmény TW		
	1980	2004	2006
Olaj	4,38	5,58	5,74
Gáz	1,80	3,45	3,61
Szén	2,34	3,87	4,27
Víz (villamos)	0,60	0,93	1,00
Nukleáris	0,25	0,91	0,93
Geotermális, szél, napenergia, fa	0,02	0,13	0,16
Összes	9,48	15,0	15,8

Forrás: USA Energia Információs Hivatal



5.1. ábra. A világ primer energiaszerkezete (Vajda 1999)

Az energiaigények kielégítésében a múltban egyeduralkodóan, de a jelenben és a jövőben is a fosszilis energiahordozók játsszák a fő szerepet. Az energiaigények jelentős növekedésével nagymértékben növekszik a környezet szennyezése is, elsősorban szilárd és gáznemű komponensekkel. A legfontosabb szilárd szennyezések a salak, pernye, korom, nehézfémek stb., a gázneműek a SO_2, NO_x, (CO_2-t is idesorolják, pedig nem szennyező), illó szénhidrogének stb. A legrégebbi harc a pernyekibocsátás és a kén-dioxid ellen kezdődött. Az elmúlt 50 évben elérték, hogy a pernyeemisszió mennyisége elhanyagolható lenne, ha a nagyon kismértékű kibocsátott mennyiséget nem a különböző nehézfémeket tartalmazó, extrafinom frakció jelentené. A kénkibocsátás elkerülésére számos eljárást, leválasztási mód-

szert és tüzeléstechnikai eljárást dolgoztak ki, amelyek sikeresnek nevezhetők. Az egyéb kibocsátásokat szigorú előírások korlátozzák, amelyek követik a technika színvonalát. Az elmúlt évtizedek slágertémája az NO_x-kibocsátás korlátozása volt, paradigmaváltást hozott az elméleti és gyakorlati tüzeléstechnikában.

Az NO_x-et az első vonalból, a jelenben már kiszorította az „üvegházgázok" kibocsátásának drasztikus csökkentési igénye. A globális felmelegedést kapcsolják indokolatlanul különösen a szén-dioxidhoz.

A paradigmaváltást mégis a nitrogén-oxidok csökkentési igénye hozta. Nem véletlenül, és teljesen logikusan került a tüzeléstechnika középpontjába. A nitrogén-oxid nem egy gáz a sok közül. Az NO_x olyan füstgázösszetevő, amelynek mennyiségét gyakorlatilag ingyen, a tüzeléstechnikai alapelvek és konstrukciók kisebb módosításával lényegesen lehet csökkenteni, bizonyos esetekben a kénkibocsátás csökkentésével együttesen. Az SO_2 és az NO_x helyi környezetszennyezők, és az egészségre, továbbá a létesítményekre is károsak. Mindkettő erősen maró savat tud képezni.

$$SO_2 + H_2O = H_2SO_3 \text{ kénessav } SO_3 + H_2O = H_2SO_4 \text{ kénsav}$$

$$NO_2 + H_2O = HNO_3 + 1/2H_2 \text{ salétromsav}$$

A paradigmaváltást elsősorban az kényszerítette ki, hogy a káros anyagok kibocsátásának elkerülése egyenrangúvá vált a gazdaságossággal, illetve gazdasági tényező lett (a társadalmi szemléletben meg is előzte azt).

A korábbi tüzeléstechnikai szemlélet elsődleges szempontjai:
- magas égési hőmérséklet, nagy tűztérterhelés;
- magas levegő-előmelegítési hőmérséklet, kis légfelesleg, jó kiégés, füstgáz-recirkuláció;
- kevés elégetlen szilárd és gáznemű;
- jól összekeverni a tüzelőanyagot és az égési levegőt (nagy O_2, N_2);
- finomra őrölni a szilárd tüzelőanyagot;
- kevert láng a gáznál (kék láng), olajnál, porlasztás;
- salakolvasztó tüzelés (rosszul hűtött ciklon);
- tüzelt gáz előmelegítése;
- a lángstabilitást magas hőmérséklettel, jó keveredéssel elérni;
- a tüzelőanyag-kiégést magas hőmérséklettel elérni.

Az új tüzeléstechnikai szemléletben a gazdaságos tüzelőanyag-felhasználás igénye mellett gyakorlatilag minden korábbi tüzeléstechnikai szempontot felül kellett vizsgálni. Mindent, de természetesen a tüzelés stabilitásának megőrzése a legfontosabb szempont maradt.

Az új tüzeléstechnikai szemlélet szerint a tüzelésnél elsődleges:

- az égési hőmérséklet csökkentése,
- a tüzelőanyagot és a levegőt az égési szempontokat és a szennyező csökkentési szempontokat érvényesítve kell célszerűen (fokozatos) összekeverni.

Világszerte rendkívül intenzív és eredményes kutatás-fejlesztés folyt (hazánkban is) az új tüzeléstechnika létrehozására.

A tüzelőanyagok égésével végzett fizika-kémiai kutatások eredményei segítenek megfogalmazni és megoldani a tüzeléstechnikai feladatokat. Az igen mélyreható kutatási eredményekkel az elméleti kérdésekre válaszolva megteremtődtek a gyakorlati alkalmazás lehetőségei.

A gyakorlat számára érdekes adatok a számos reakció lefolyása utáni végtermékek mennyisége. A végtermékben a reakciótermékekből álló gázkeverék már egyensúlyi állapotban van. Ezt a gázkeverék fizikai paramétereitől függő egyensúlyi állandó fejezi ki.

Az izobár-izoterm kémiai egyensúlynak a kémiai reaktorokra alkalmazott alakja egy független kémiai reakcióra:

$$[K = \Pi_B (a_B)^{\nu B}]_{p,T}$$

ahol

K az egyensúlyi állandó

a_B egyensúlyi állapotban az egyes komponensek kémiai aktivitása

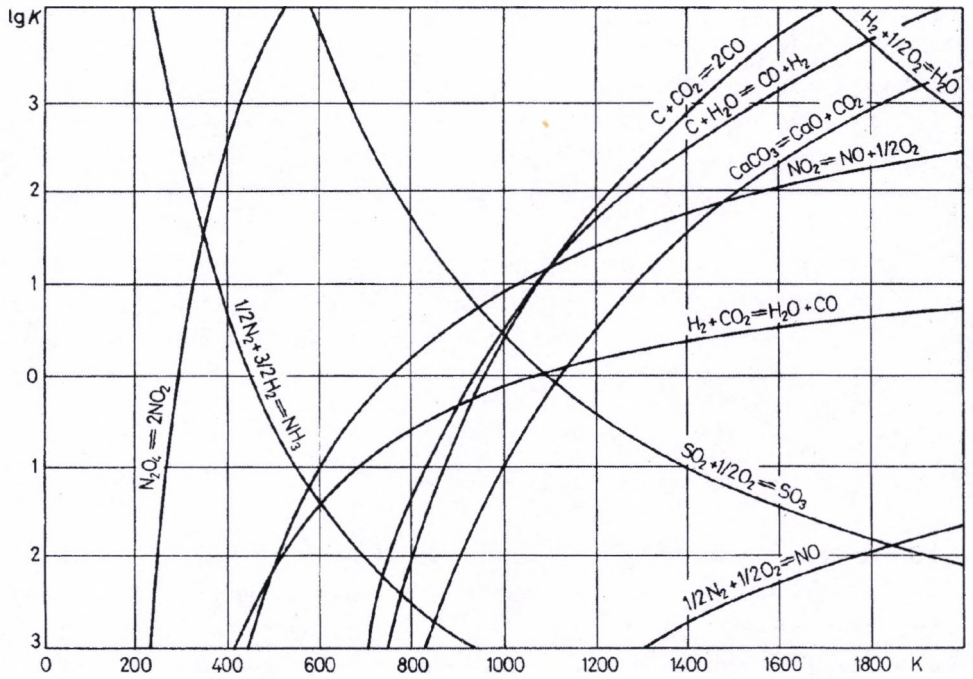
ν_B sztöchiometriai szám

p, T állandó nyomás és hőmérséklet

Néhány, a tüzeléstechnikában érdekes reakció egyensúlyi állandójának függése a hőmérséklettől az ábrán látható (Berecz 1991).

Tüzeléskor egymást követő és párhuzamos reakciók sokasága található, a tüzelőanyag összetételétől és a környezeti gázkomponensektől függően. A legegyszerűbbek:

Égési reakciók	Környezetszennyezők
$C + O_2 = CO_2$	
$C + 1/2O_2 = CO$	$N_2 + O_2 = 2NO$
$S + O_2 = SO_2$	
$CH_4 + O_2 = CO + H_2 + H_2O$	$2NO + O_2 = NO_2$
$CO + H_2O = CO_2 + H$	
$O_2 + 2H_2 = 2H_2O$	



5.2. ábra. A tüzeléskor fontosabb reakciók egyensúlyi állandójának változása a hőmérséklet függvényében (Berecz 1991)

5.1. Az energetika légköri szennyezései, etikai kérdések

A tudományos kutatás eredményeinek közkinccsé tétele mind a kutatók számára, mind a társadalom számára alapvető feladat. Hamis eredmények közlése vagy megtévesztés, ezek etikai kérdések, elítélendők, súlyosabb esetben büntetendők. A tévedés vagy a kísérleti hiba kellemetlen, de korrigálható (általában), és sajnos az eredmények hajszolása közben elkerülhetetlen, nem ritka esemény. Nagyon vékony jégre lép azonban az, aki a média eszközeit kihasználva, esetleg jóindulatúan, de ismertséget, elsőbbséget vagy tudományos vezető szerepet kíván elérni.

A média nagy segítőeszköz, de saját törvényei szerint működik. Egyik legfontosabb eszköze a szenzációhajhászás, a túlzások alkalmazása, nemritkán felületesség. Ezek még a tudományos írott és elektronikus ismeretterjesztésben is jelentős szerepet kapnak. Ezt a sci-fiben elfogadják, sőt a műfaj létalapja. A sci-fi és a szigorúan szakmai tudományos világ között helyezkedik el az ismeretterjesztés. Ez a műfaj valódi tudományos eredményeket kíván ismertetni, igénybe véve a hatásvadászat eszközeit. Elismerve a rendkívüli szerepét, az adott szakterület művelői azonban gyakran találnak kisebb-nagyobb, esetleg tudatos, de

nem helytálló képeket, szövegeket, jeleneteket, amelyek csak a hatás fokozását szolgálják és hitelrombolók.

Az adott jelenség bemutatásakor például a tájékoztatás tárgyát képező téma előtérbe helyezése helyett megtévesztően, a fogalomhoz látszólag csatolható, meghökkentő jelenséget láthat a szemlélő. Ilyen eszközt a „médiatudósok" gyakran alkalmaznak (pl. porfelhő – füstfelhő, füst – pára helyettesítés stb.).

Az energetika nélkülözhetetlenségéről és áldásáról írni, beszélni közhely lenne. A társadalom energiaigénye növekszik, aminek a kielégítéséhez a különböző energiaforrások különböző mennyiségben, költséggel és minőségben állnak rendelkezésre. A három nagy csoport:

1. fosszilis,
2. nukleáris,
3. megújuló (természeti közvetlen).

A környezetre minden energiatermelési módnak van valamilyen közvetlen vagy közvetett, károsnak is mondható hatása. A környezetvédelem előtérbe kerülése okán a szennyező anyagok kibocsátása szempontjából leginkább szennyező a fosszilis tüzelőanyagok használata. Ez nemcsak az energiafejlesztésben betöltött döntő szerepe (75–85%) miatt van, hanem a környezetbe kerülő hulladék mennyisége és fajtája is a legnagyobb változatossággal rendelkezik.

A különböző energiaforrások használata által okozott szennyezés jellege más és más (vegyi, sugárzás, légköri, földhasználat stb.), ezek elemzése külön feladat. Be kell viszont mutatni a környezetszennyezés tárgyalásakor használt, de megengedhetetlen hatásvadászatot, és felhívni a figyelmet az elkerülésére.

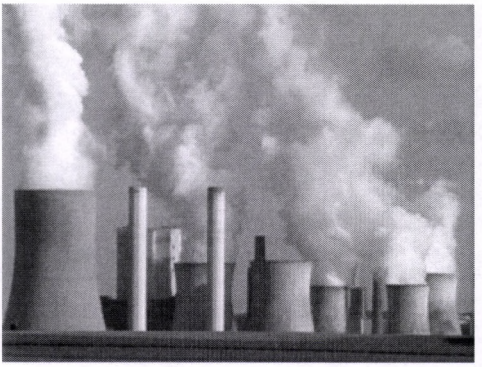
A fosszilis tüzelőanyagoknak az energiafejlesztésben való felhasználásakor keletkező szennyező anyagok fajtái:

- szilárd,
- folyékony,
- gáznemű,
- vegyi,
- hőkibocsátás.

A folyékony (csurgalékvizek, olaj stb.), vegyi (víztisztítókból, savazás stb.), hőszennyezés (folyók, tavak, tengeröblök stb.) kibocsátásokkal nem foglalkozunk.

A környezetszennyezéssel kapcsolatos visszásságok általános felvetése után konkrétan a szakterületen, az energetikában előforduló jelenséget tapasztalva, a leggyakoribbakat példákkal lehet szemléltetni. Az energetikai környezetszennyezés tárgykörében található egy nagyon bántó, legtöbbször az adott cikk vagy film belépőjeként használt látvány. Ez a kép a fosszilis energiahordozót használó erőmű áttekintő látképét

mutatja, a különböző létesítményekkel, nagy fehér „füsttel" borítva a környezetet (mellesleg ilyen képet akár atomerőműről is lehetne készíteni, bár értelmetlen).



5.3. ábra. Megtévesztő illusztráció egy szénerőmű környezetszennyezéséhez

Az erőműi gáznemű-emissziók csökkentésének igénye a XX. század második felében elsőrendű feladattá vált. A kéményen távozó fontosabb füstgázösszetevők (nem mind szennyező): N_2, O_2, CO_2, SO_2, N_xO_x H_2O.

Legelőször a nagy kéntartalmú szeneket tüzelő erőművek környezetében fellépő savas esők súlyos környezetkárosító (erdők, építmények stb.) hatásának csökkentésére nagy hatásfokú kénleválasztókat fejlesztettek ki. Ez a pernyeleválasztó mellett része lett a tüzelési rendszernek. Ezután a keletkező nitrogén-oxidok (NO, NO_2, N_2O) csökkentése következett. Ezt szerencsére a tüzelési módszerben megvalósított diszciplínaváltással és új technológiákkal is el lehetett érni. Nagyobb igény esetén a rendszert NO_x leválasztóval egészítették ki.

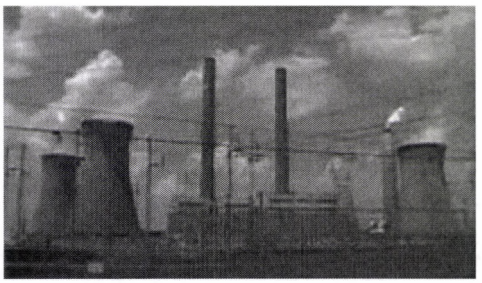
Néhány évtizede leporolták Furier 1837 és Arrhenius 1896 években írt tanulmányát, és a légkör CO_2- tartalmának növekedése miatt a globális hőmérséklet-növekedésre, ennek a következményeként pedig klímaváltozásra következtettek.

A témában a média közreműködésével egy, ennek igazolásán munkálkodó, erős nemzetközi tábor alakult ki. Az utóbbi években azonban a kijelentett evidenciák és konszenzusok megalapozottságai kérdésessé váltak. Ennek az új felfogásnak képviselője és elméleti megalapozója e könyv szerzője is.

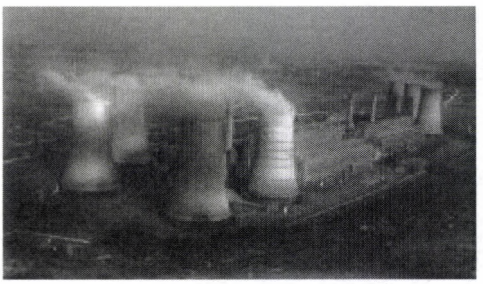
Sajnos, az igen nagy gazdasági érdekek, egyes kutatók feltűnési vágya meghamísított eredmények közlését is hozta. Ez etikai kérdés. Ami viszont korrigálandó, az erőműi szennyezést bemutatni hivatott, elsősorban a képi és filmes, befolyásolásra alkalmas interpretáció. Ez tudományos cikkekre és ismeretterjesztő bemutatókra egyaránt vonatkozik.

5.4. ábra. Széntüzelésű erőmű Kampung Sinakutban, képkocka egy környezetvédő filmből

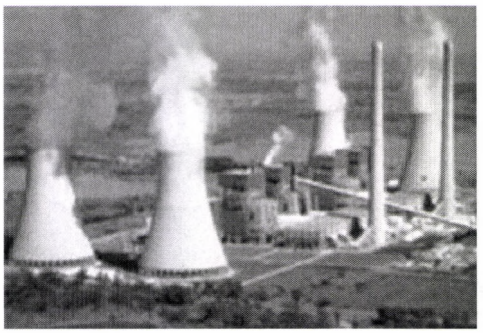
Mind az ismeretterjesztő, mind a tudományos közleményekben az indító jelenet az erőműi környezetszennyezésről elrettentő képet kíván nyújtani. Aki a témával foglalkozik, kivétel nélkül már találkozott ezekkel az esetekkel. Ha hitelesen azt támasztaná alá, amit hangsúlyozni kíván, az erőműi környezetszennyezést, semmi probléma nem lenne, de nem az, és megbocsáthatatlanul megté-



5.5. ábra. Erőmű Georgiában



5.6. ábra. Kanadai erőmű



5.7. ábra. Széntüzelésű erőmű Kínában. A 2008-as pekingi olimpia bojkottjára használták

5.8. ábra. Széntüzelésű erőmű, Homer City, Pennsylvania

vesztő. Néhány esetet a végtelen sokból bemutatunk, mintánkat a világ különböző helyeiről válogatva.

A képek általában a széntüzelésű erőműi szennyezést hangsúlyozandó teljes erőműrálátást mutatnak be. Iparosok számára a képek szépnek is mondhatók, de ha a nagy mennyiségű hófehér emissziót szennyezőnek tekintjük, elborzasztóak. Itt van a csalafintaság (nem teljesen tisztességes), mert a nedves hűtőtornyokból kiáramló pára nem tekinthető globális szennyezőnek.

Korábban részleteztük a tüzeléskor keletkező és a környezetbe kibocsátott füstgáz összetételét. A szilárd anyagokat, a ként és a nitrogén-oxidokat eltávolították, a távozó füstgázban szén, olaj és gáztüzelés esetén N_2, O_2, CO_2 és H_2O található. A kéményből távozó füstgázban, tehát láthatatlan gázösszetevők és nedvesség távozik. Főleg hidegebb időszakban a kéményből kiáramló gázt is a nedvességtartalom festi fehérre. Még inkább elítélendő az erőmű teljes képét uraló hűtőtornyokkal és az azokból távozó szintén fehér, nagy tömegű nedvességgel a környezetszennyezés hangsúlyozása.

Ezt kötelező leleplezni, mert etikátlanul, rossz színben tünteti fel az energetikát.

A fosszilis tüzelésű erőművekből, bár nem látható, de kétségkívül fajlagosan a legnagyobb mennyiségű szén-dioxid-kibocsátás, ez létezik. A szén azonban nem

szennyező anyag, az élet alapját szolgáló szénciklus része. Szerepéről egyre világosabb képet kapunk.

Ha az érvek alátámasztására hatásos jelenségeket félrevezetően használjuk, hitelünket gyengíti.

A jövőben mind a széntermelés, mind a szénfelhasználás erősen függ a műszaki fejlődéstől. A bányászat, a dúsítás folyamata jelentősen fejlődik. Különös jelentősége van a „tiszta-szén"- technológiák megjelenésének. A széntechnológiáknál nagy jelentősége van a környezetszennyező és nem környezetszennyező anyagok kibocsátását csökkentő eljárásoknak. A szilárd szennyezők, a nitrogén-oxidok, a kén-oxidok megengedett kibocsátási határértékei egyre szigorodnak. Az üvegházhatású gázok, elsősorban a CO_2- (nem szennyező anyag) kibocsátás csökkentéséhez az energiafejlesztés hatékonyságának jelentős növekedésére van szükség.

A tüzelőanyagok elégetésével az energetika az „alapanyag" hőt állítja elő. A szén energetikai hasznosítása jelenleg és a jövőben is nélkülözhetetlen, figyelembe véve az összgazdaságosságot és a környezetszennyezési határértékeket is. A technológiai fejlesztések jelentősen javították a felhasználás közben jelentkező problémákat. A tüzelőanyag-választásban és a hatékonyság növelése jelenőségének megértéséhez tisztázni kell a hő értékelésének módját.

A hő energetikai és gazdasági értékelése mindig a tudományos viták egyik legfontosabb kérdése volt, és koronként még változott is, elsősorban gazdasági szempontból. Talán érdemes röviden Fonó Albert 2011-ben 100 éves jubileuma alkalmából, a közte és egy másik neves energetikus, Schimanek Emil közt a huszadik század közepén lezajló vitára emlékezni.

Fonó Albert akadémikus és mérnök zseni, akit a világ technikatörténetében elsősorban a repülőgép-sugárhajtómű szabadalma révén jegyeznek kiemelkedően. Méltatlan az, hogy napjainkban az energetikában nem eléggé ismert és méltatott a munkássága, amely az energetikához kapcsolódik.

A mérnöki zsenialitása mellett széles látókörére jellemző, hogy hazánkat ő kapcsolta be a világ energetikai vérkeringésébe. Alapító tagként lépett be az 1923-ban létrehozott World Energy Conference-be (WEC, jelenleg World Energy Council), a ma legjelentősebb és legnagyobb energetikai világszervezetbe.

Fontos dolognak tartotta a szakmai elméleti és gyakorlati eredmények hasznosítási kérdései között a gazdasági értékelést is, amiről a *Magyar Energetiká*ban 1950-ben megjelent és az *Energiagazdálkodás* 2011. 1. számában részletekben ismételt, „A hő gazdasági értéke" című cikke tanúskodik.

A téma részben tudomány- és részben gazdaságfilozófiai, csak bizonyos megegyezések alapján lehet egyetértő vagy ellentétes véleményt kialakítani. Mindenképpen hasznos az eszmefuttatás, mert nagyon kezd leszokni az energetikai társadalom a vitáról és határozott vélemény kialakításáról. Helyette valamilyen társadalmi, szakmai vagy politikai lobbi véleménye formálja az energetikát.

Az alapállás minden elemzésnél: a hő és a munka egymásba átalakíthatók, de a lehetőségeket a termodinamikai törvények pontosan meghatározzák. Egyik szempont lehet: mi az a legnagyobb hatásfok, amellyel a hő munkává alakítható. A hőből körfolyamatban lehet folyamatosan munkát nyerni. Az izoterm reverzibilis körfolyamat munkája zérus. Ezért a legnagyobb hatásfokú körfolyamatnak nem izotermnek (és reverzibilisnek) kell lennie.

Jedlik Ányos írta valamikor 1847 és 1851 között a következőket: „A meleg, vagy alanyilag, vagy tárgyilag tekinthető. Itt az alanyilag vett meleg a hőérzet, a tárgyilag vett pedig maga a hő". A hő és a munka egymásba átalakíthatók, amint azt a hőerőgépek példái is mutatják. A munka hőegyenértékét Rumford határozta meg elsőként. A hő mibenlétének mélyebb megértéséhez a hőerőgépek szélesebb körű alkalmazására volt szükség. Ugyancsak fontos volt egy, a hővel kapcsolatos jellemző a hőmérséklet fogalmának bevezetésére. A gyakorlat megelőzte az elméletet, a gőzgép a termodinamikát. Megszülettek a termodinamika főtételei és az új fogalom, az entrópia.

Clausius abban az időben a gázok kinetikai elméletének kiépítésén dolgozott. Olyan versenytársai voltak, mint Maxwell; Clausius 1857-ben publikálta kinetikai gázelméletét, Maxwell 1860-ban vezette le a gázok sebességeloszlását. Rudolf Clausius, a hőelmélet egyik legnagyobb szaktekintélye a második főtétel még világosabb megfogalmazása érdekében bevezetett egy új fizikai mennyiséget, amelyet entrópiának nevezett el. Időről időre visszatért a második főtételnek általa először 1850-ben kimondott állításához. 1865-ben alakította ki az entrópia fogalmát.

A mechanikai hőelmélet két főtételen alapszik: a hő és a munka ekvivalenciáján és az átalakulások ekvivalenciáján.

$$dQ = dU + dw.$$

Ha a hőelemet elosztjuk a megfelelő abszolút hőmérséklettel:

$$\frac{dQ}{T} \geq 0$$

ahol az egyenlőségjel, amikor a körfolyamatban lezajló összes változás megfordítható; a „nagyobb" jel a nem megfordítható változást jelenti.

Az a külső munka *(w)*, amely nemcsak a kiindulási és a végső állapottól függ, hanem az átmenet módjától is.

A test U energiája, amelynél az adott kezdeti és végállapot határozza meg az energiaváltozást; tehát nem érdekes, hogyan játszódott le a két állapot közötti változás, mert sem a változás lépései, sem a megfordíthatósága nem befolyásolja az energiaváltozást.

A dQ/T integrál mindig zérus, amikor a test bármely kiindulási állapotból reverzibilisen tér vissza tetszőleges közbülső állapotokon át, a kiindulási állapotba. Ekkor a dQ/T integrál egy olyan mennyiség teljes differenciálja, amely csak a pillanatnyi állapottól függ, de nem függ attól, hogy a test miként jutott ebbe az állapotba. Az integrált S-sel jelölve, akkor $dS = dQ/T$. Ha az egyenletet bármely megfordítható folyamatra integráljuk, amelynek révén a test egy kiválasztott kezdeti állapotból elérheti korábbi állapotát, és S értékét a kiindulási állapotban S_0 jelöli: az így kapott differenciált a teljes ciklusra integráljuk, akkor a következőt kapjuk:

$$S = S_0 + \int \frac{dQ}{T}$$

S a test átalakulását, az U a test hő- és munkatartalmát jellemzi.

1872-ben az akkor 50 éves Rudolf Clausius bonni egyetemi tanárt és Helmholtz és Kirchhoff tudósokat a Magyar Tudományos Akadémia tiszteleti tagjává választották. Akkor már több mint tíz éve nem választottak külföldi fizikust a Magyar Tudományos Akadémia tagjává.

Tehát a hő és a „hasznos" munka az, amely az emberiség számára értéket jelent, és amelynek alapján mérlegeli, hogy megéri-e a költség- és „energia"-ráfordítás.

A Fonó-cikk egy erőteljes és erőltetett fejlődési időszak kezdetén keletkezett, amikor a technika által rendelkezésre bocsátott lehetőségek közül kellett választani. A választáshoz igény volt valamilyen objektív jellemzőre, amellyel a választott megoldás indokoltságát alá lehetett támasztani. Az energia az ipari fejlődésnek minden korban az alapeleme. Az ipari folyamatokban többféle formában van rá igény, legfontosabbak: hő-, mechanikai, villamos. A különböző energiafajták egyik közbenső fázisa a hő. Ha gazdasági értékelésről van szó, már itt elakad a vizsgálat, mert kezdetnek ezt választva, a gazdasági érték fogalma jelentősen korlátozott. Gazdasági vizsgálatnál a kiindulási pontnak minimum a hőforrásnak (fosszilis, nukleáris, természeti közvetlen stb.) kell lennie. Ugyancsak nem lehet eltekinteni a gazdasági rendszer figyelembevételétől, erősen központosított, szabadpiac stb. A felosztásnál meg kell állapodni, hogy termodinamikai, vagy általános gazdasági értékelésről van szó. A korabeli vita nem tett ilyen megkülönböztetést, tehát a kérdésre adott válasz eleve vitatható. Az elemzési sávot tovább szűkítették azzal, hogy a gőz (elsősorban vízgőz) hőtartalmának értékét használták példaként. Ebben az esetben leegyszerűsödik a feladat, mert ha a maximális munkavégzés lehetőségét véve feltételként egyszerű expanzióval, akkor a feladat kisebb vitatott részletekkel, korrekten megoldható. A számításához Fonó Albert lényegében ezt tette, azzal a kisebb módosítással, hogy „az eltérés a tisztán munkaképesség alapján való értékeléshez képest az, hogy a fűtőközegnek, gőznek, vagy víznek a hőtartalma gazdasági értékét egységesen, hőmérséklete függvényében vesszük számításba". A munkavégző képesség alapján történő korrekt értékeléshez azonban a „munka-

képesség" fogalmát kell tisztázni. Egy ilyen „értékelési jellemző" megalkotásával már problémák vannak. Talán indokolni sem kell azt, hogy felesleges a Fonó által tett első feltétel, amely szerint a jellemzőnek „lineárisan változónak" kell lennie. Nem világos, miért? Lényegesebb probléma az, hogy miért kellene egyszerű hőerőgépeknél különválasztani a túlhevített és a nedves tartományban expandáló gőzt. Ha fűtésre fordítódik, akkor pedig a munkavégzés fogalmát kellene tisztázni (nincs rá szükség). A lezárhatatlan vita valóban a kombinált ciklusú energiahasznosításnál, a hőhasznosítás során létrehozott mechanikai, illetve villamos energia és a fűtésre fordított hő közötti tüzelőanyagköltség-megosztás „gazdasági kérdése". Ez tisztán elméletileg megoldhatatlan, valamilyen megállapodás szükséges. A kombinált ciklusú hőhasznosítás termodinamikai és gazdasági problémájával kapcsolatban bőséges irodalom áll rendelkezésre, időszerű lenne a jelenlegi gazdasági helyzetre világos, a hazai alkalmazásra való megoldást készíteni. Jelenleg ötletszerűen, támogatással juttatnak előnybe különböző megoldásokat.

A Fonó-cikk, szerzőjére jellemzően korrekten (etikusan) bemutatja módszerének önkényesen választott feltételeit (ma is követendő példa lenne). Az önkényességek elég jelentősek, és például az alapul választott „1 ata nyomású telített gőz" a mai technikánál már nagyon korszerűtlennek mondható. A választott egyszerű expanzióvonal a mai bonyolult körfolyamatoknál munkavégzési „modellezési" alapként nem szolgálhat. Ki kell mondani, hogy az értékelési módszer ma már nem használható, bár néhány részlet segíthet a megfontolások során.

Fonó Albertnek mély termodinamikai ismeretei a szabadalmaiban testesültek meg. A már említett repülőgép-sugárhajtómű elve a világban a legnagyobb műszaki zsenik közé emelte. Itthon maradt, nem értékelik megfelelően nagyságát. Fonó Alberttel tudományos vitát kezdeményezett Schimanek Emil, a BME professzora elsősorban részletekben bírálja, de maga is a részletek elemzésébe bocsátkozik. Kifogásolja, hogy Fonónál: „...a vízgőzhőtartalom értéke független a nyomástól és a hőmérséklettől". Ez nem állja meg a helyét, mert Fonó éppen abban látja a többletet javaslatában, hogy egy hőmérséklet-korrekciót is bevezetett.

Észrevételei részben jogosak. Például, hogy az expanzióvonalnál nincs figyelembe véve az elvétel, újrahevítés stb. lehetősége. Ugyancsak jogos észrevétel, hogy nincs elválasztva a hőtani és a gazdasági vizsgálat, nagy különbség. De javaslata rossz, amely szerint: „Ezért nem is lehet a hő gazdasági értékének megállapításánál mást, mint az ideális értéket (az érték felső határát) megállapítani. „...Ezért meg kell elégedni a hő ideális gazdasági értékének megállapításával". Míg az általános észrevétel jogos, annyira zavaros ez utóbbi megállapítás.

Termodinamikai szempontból viszont helyes Schimaneknek a következő megállapítása: „Ez az érték attól függ, milyen célra akarjuk a hőt hasznosítani". A gazdasági szempontot azonban ez sem veszi figyelembe, ez is csak egy célon belül érvényes. A hő gazdasági értékének általános meghatározásához a célokon belüli optimumokat is össze kellene vetni, de ilyen feladat valóságban nem merül fel.

Fonó professzor válaszában vitázott Schimanek Emillel. „Schimanek professzor lényegileg nem a hő értékét, hanem a hő-értékesítő folyamatot akarja egy ideális megállapítandó és hasznosító körfolyamattal összehasonlítani". „Schimanek professzor felfogása az enyémtől (Fonóétól) abban különbözik, hogy én a hő, tehát a kalória gazdasági értékét akarnám meghatározni, azért ..., hogy jól van-e megoldva a feladat...".

Fonó Albert tervező, gyakorlati ember volt, neki a tervvariációk gazdasági összehasonlításához volt szüksége valami jellemzőre. Amit kitalált, sok szempontból kifogásolható, de a tervek első összevetéséhez talán alkalmas.

A vitázó feleknek, Fonó Albert akadémikusnak és Schimanek Emil professzornak sok-sok részigazsága van, de etikai szempontból mintaszerű a vita akkor is, ha módszerüket, akár termodinamikai, akár gazdasági szempontból a mai tudomány már túlhaladta. Jelentős segítséget jelent éppen az ötvenes években előretört entrópiaszemlélet, amelyet a vitázók még nem használtak. Az entrópiaváltozás alapján végzett termodinamikai elemzés és a számos rendelkezésre álló gazdasági modell az adott körülmények között eléggé biztonságos gazdasági vizsgálatot tesz lehetővé. Ettől függetlenül a bonyolult gazdasági rendszerek révén a viták talán még élesebbé váltak.

Ha ilyen általánosan kerül terítékre a kérdés, nem válaszolható meg. Mivel energetikai szaklapban jelent meg, természetesen leszűkíthető a villamosenergia- és hőszolgáltatásra. Ebben az esetben az energiaforrástól kiindulva (fosszilis, nukleáris, természet közvetlen stb.) kell a szolgáltatás összes paraméterének figyelembevételével a gazdasági számítást elvégezni. A termodinamikai vizsgálat a gazdasági számításnak csak egy eleme. Ez utóbbi az entrópiaszemlélettel elég egyértelműen elvégezhető.

A jelenlegi feladatok megoldására lehetséges alternatívák összevetése különösen bonyolult értékelési rendszerek felépítését teszi szükségessé. Az utóbbi évtizedekben megjelent „tiszta szén" technológiák az energetikai hatásfok növelése mellett a környezetszennyezés jelentős csökkentését is biztosítják. A fluidizációs tüzelés gyors ütemű fejlesztésével jelenleg már megfelelő erőművi blokknagyság valósítható meg e technológiával.

A külfejtés jelentős beavatkozás a természetes környezetbe, mert területén megszűnik a mezőgazdasági művelés lehetősége, és az újbóli termelésbe állítás csak a bányaművelés után végrehajtott rekultivációval lehetséges. A külfejtés jelentősen átalakítja a tájat, esetleg települések szűnnek meg, megváltoznak az utak, a vízfolyások stb. nyomvonalai. Számos etikai problémát is felvet.

A rekultiváción például egy környezeti változásnak tudományos alapossággal megtervezett, természeti és társadalmi eredeti visszaállítási folyamatát értjük.

Az energetikában lényegében háromféle nagy mennyiségű szilárd hulladékkal kell számolnunk, pernyével, salakkal és gipsszel. A kis mennyiségű egyéb hulladék (pl. mésziszap) elhelyezése környezetvédelmi szempontból nem játszik döntő

szerepet, és megoldottnak tekinthető. Az erőműben keletkező szilárd égéstermékeket és a füstgáz-kéntelenítés végtermékét, a gipszet az erőmű egész élettartama alatt olyan körülmények között kell lerakni, hogy a felszíni és a talajvizeket sem a szilárd hulladék, sem a rajta átszivárgó csapadék ne szennyezhesse, a levegő porszennyezése megakadályozható legyen, és a gipsz szükség esetén tiszta állapotban felhasználható legyen. A lerakótér helyének kiválasztásakor azonkívül figyelembe kell venni a termőföld védelmét és a tájesztétikai követelményeket.

A kőszén hőmérséklet- és nyomásnövekedés hatására átalakult növényi anyag. Az energiáját a növény fejlődése során a napsugárzásból nyerte. Egy kőszénlelőhely vagy -előfordulás számos kőszénréteget tartalmazhat, amelyeket meddőrétegek választanak el.

5.2. Pernye

A világ villamosenergia-termelésében a szén részaránya 38%, az EU-ban 25%. A szén marad a legjelentősebb energiaforrás a jövőben is. Ez indokolja, hogy a nagyobb hatékonyság és a kisebb környezetszennyezés érdekében a fejlesztésekre nagy hangsúlyt kell fektetni. A szilárd szennyezők kibocsátásának csökkentése elsősorban a XX. század első felének és közepének a témája volt, lényegében megoldódott. A széntüzeléseknél a salak és a pernye, olajtüzelésnél a korom leválasztása a múlt század közepétől rendkívüli gyorsasággal fejlődött. Első lépésként megelégedtek a kiváló minőségű, mechanikus leválasztók hatékonyságával, elsősorban a durva frakciók leválasztására volt alkalmas. Az előírások szigorodásával megjelentek a kiváló villamos leválasztók (< 99,9% hatásfok), amelyekből csak a legfinomabb frakciók egy része távozott. Sajnos, bár ezek tömege kevés volt, egy részük például a Braun-mozgás eredményeként sokáig a légkörben maradt elég magas koncentrációban. Ezenkívül a kutatások szerint még számos, kis mennyiségben, de egészségre káros elemet (Hg, V, Ni, Pb, Cd, As stb.) is tartalmazhatnak. A finom szemcsék leválasztási igénye az ún. szövetszűrőkkel elégíthető ki. A kutatási és fejlesztési folyamat jelenleg is folytatódik.

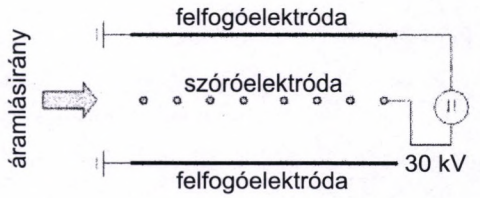
A szilárd szennyezők

Az utóbbi évtizedekben a szilárdszennyező-kibocsátás csökkentése gyakorlatilag tetszőleges mértékben elérhető a következő eljárásokkal:

- ciklonok,
- villamos leválasztás,
- szövetszűrős leválasztás,
- kerámiaanyagú leválasztók,
- nedves leválasztás.

A technológiák biztosítják az 50 mg/Nm^3 alatti előírt értékeket, és szigorúbb rendszabályok csak valamely különösen veszélyes összetevő esetén indokoltak.

A pernye leválasztására a környezetszennyezés-csökkentés első lépéseként a mechanikus eljárást felváltotta a nagy hatásfokú és a por finom frakcióját is leválasztó villamos módszer. A hatásfok elérte a 99,99%-ot. Ennél finomabb leválasztás szövetszűrőkkel érhető el.



5.9. ábra. A villamos pernyeleválasztás elve

5.3. Kénszennyezés

A tüzelőanyagokban a kén legfontosabb előfordulási formái az organikus és a piritkén. A kén-oxidok közül a kén-dioxid mint elsősorban az erőművi tüzelőanyagokban jelen lévő kén égési terméke az egyik legtöbb gondot okozó energetikai környezetszennyező.

A kéményen át távozó füstgázok összetétele és így szennyező hatása természetesen az alkalmazott tüzelőanyag függvénye. Így elsősorban a széntüzelésű erőművek kerültek az érdeklődés középpontjába. Kézenfekvőnek mutatkozott az alternatíva, hogy a szénerőművekben térjenek át az alacsony kéntartalmú olaj- és gáztüzelésre. Különösen az utóbbi évtizedekben a kén-dioxid-szennyezés problémájára világszerte nagy figyelmet fordítottak, amiről a kísérleti és kutatómunkák terjedelme, valamint az egyre jelentősebb pénzügyi előirányzat is tanúskodik.

A kén-dioxid-emisszió környezetre gyakorolt kedvezőtlen hatásának csökkentését célzó eljárások négy főbb kategóriába sorolhatók:

- kis kéntartalmú vagy (időszakosan, esetleg állandóan) kénmentes tüzelőanyagok alkalmazása,
- új tüzelési technológiák alkalmazása, mint például a fluidágyas tüzelés vagy pedig gázosítás a kombinált gőz-gáz módszerrel együtt,
- magas kémények építése,
- a füstgázok kéntelenítése vagy semlegesítése (időszakosan vagy folyamatosan).

5.4. Kénleválasztás

A kénlekötési folyamatot a felhasznált tüzelőanyag hamujának vegyi összetétele is befolyásolja. Ezenkívül jelentős szerepe van a hamu tartózkodási idejének a tűztérben és a gázfázisban, valamint a szilárd fázis és a gázfázis hőmérsékletének.

A tűztéri hőmérséklet és a tartózkodási idő szabja meg a hamuban lévő szulfátok és karbonátok viselkedését.

A szulfátok 1200 °C felett elbomlanak, és a keletkező SO_2 növeli a füstgáz kéntartalmát. Alacsonyabb hőmérsékleteken (250–500 °C) elméletileg visszakötődés is megvalósulhat a maradékhamu-alkotókba, fizikai-kémiai alapon, például felületi adszorpció révén. A felületi adszorpció lejátszódásában a hamuszemcse vagy pernye méretének (felületének) lehet döntő szerepe, például az ajkai kénlekötési vizsgálatok során gyűjtött ciklonpernyeminták szemcsefrakciók szerinti vizsgálata is azt mutatta, hogy a finomabb frakció, 2–1 μm között, 2%-kal több ként tartalmazott, mint a 13–56μm közötti méretű szemcsék.

A hamuban lévő karbonátok 800 °C felett kalcinálódhatnak, majd a fém-oxidok (CaO, MgO) kén-dioxidot, kén-trioxidot köthetnek le. Ha kalcinálódás nem megy végbe (túl alacsony a tűztérhőmérséklet) vagy „túlégetés" áll elő (túl nagy, 1400 °C hőmérséklet), vagy a fémoxidok reakcióképessége csökken és kisebb mértékű lesz a kénlekötés.

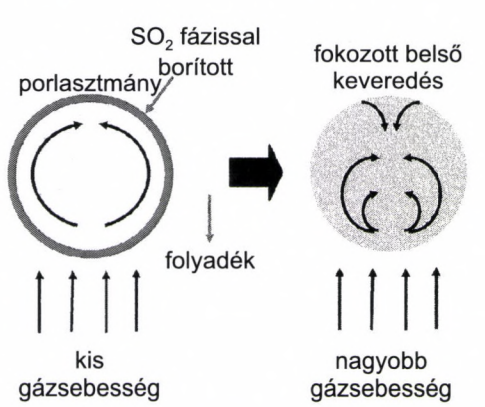
A kénlekötéshez elsősorban a szénhamu mészkőtartalma járul hozzá, és adalékanyagként is leggyakrabban mészkövet használnak.

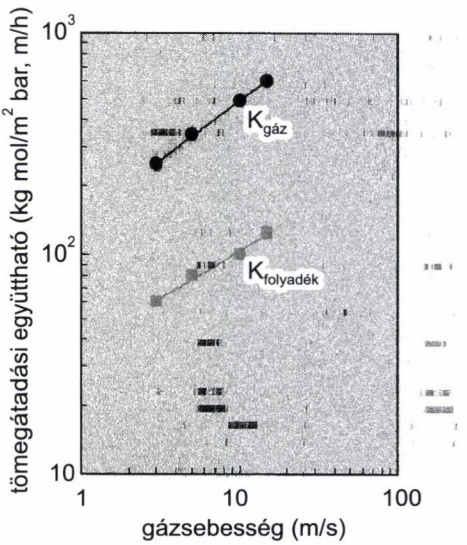
A kémiai reakciók és a fizikai folyamatok viszonylag egyszerűen leírhatók:

$$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2 + 169 \text{ kJ/mol}$$

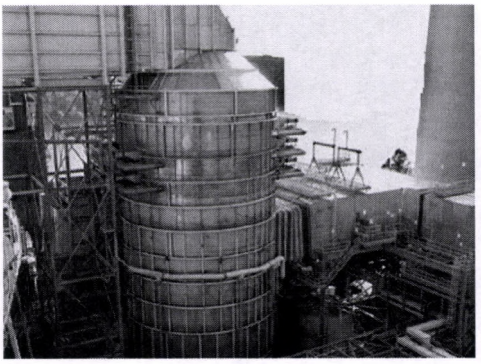
$$CaO + SO_2 + 1/2O_2 = CaSO_4 - 747 \text{ kJ/mol}$$

Túl magas hőmérséklet miatt a hamu részleges vagy teljes olvadása is gátolhatja az SO_2+CaO reakciót, például a reagálási felületek csökkenése következtében.





5.10. ábra. A füstgáz-kéntelenítő működésének elve



5.11. ábra. Kéntelenítő elhelyezése a tüzelési rendszerben

5.12. ábra. Nedves kéntelenítéssel működő széntüzelésű erőmű kéményén kiáramló füstgáz, a Bowen Erőmű kéménye

A szénhamuval lekötött és eltávolításra kerülő kénmennyiség növelését esetleg salakleválasztó tüzelési ciklonnal is el lehet érni.

A füstgáz-kéntelenítés gyorsan követte a környezetszennyezés-csökkentésben a pernyeleválasztást. Leggyakoribb a nedves eljárás, amely a 99% feletti leválasztási hatásfokot is eléri, szükség esetén akár 99,9% értéket is (5.10. ábra). A legszigorúbb előírások is teljesíthetők.

A széntüzelésű erőmű kéményéből elrémítőnek kinéző kiáramlás (5.12. ábra) nem jelent jelentős légszennyezést. A füstgáz nagy részét jelentő fehér gőzmennyiség a tüzelőanyag nedvességtartalmának és a nedves kénleválasztó gőzének összege. A Bowen Erőmű az egyik legnagyobb kénhasznosító létesítmény.

5.5. A kalcium kénlekötése

A mészkő, illetve adalékanyag minősége jelentősen befolyásolja a kénlekötést. Különböző forrásokból származó mészkővel különböző eredmények érhetők el. Az adalékanyag előkészítését és különösen a szemcseméret szerepét kell kiemelni. A 10 és 100 mikrométer közötti minimumérték szembetűnő, de okát nehéz megállapítani. Mivel számos kémiai és fizikai paraméter hatása érvényesül (tartózkodási idő, felület stb.), így feltehetően azok eredő hatása eredményezi a lekötés jellegét. Kísérletek és közelítő számítások alapján elsősorban a mészkő minősége mellett a Ca/S mólarány és a hőmérséklet szerepe jelentős. E két paraméter tisztázására végzett kísérletekről számos közlemény beszámol (Szabolcs–Vörös 1977).

A különböző bányákból származó mészkövek között jelentős különbségek lehetnek. Azonos tüzelési körülmények között is a különböző mészkövek a petrográfiai szerkezetük különbsége miatt jelentősen eltérő viselkedést mutathatnak. Ugyancsak jelentős szerepe van a kénmegkötésben az adalék szemcseösszetételének. Az üzemi körülményektől függően a szemcsehalmazból egy bizonyos szemcsézet kö-

rüli tartományban a szemcsék kénlekötése kevésbé érvényesül. Ennek az a magyarázata, hogy a felületi reakciónál döntő szerepe van a felületnek és a tartózkodási időnek. A nagyon finom szemcséknél a felület nagy, míg a durvábbaknál a tartózkodási idő elegendően hosszú.

A fluidizációs tüzelés kedvező kénlekötési tulajdonságait azonban csak az adalékanyagok tulajdonságainak ismeretében és megfelelő üzemviteli körülmények mellett lehet hasznosítani. A tapasztalatok szerint a leggyakrabban használt mészkő kénlekötési tulajdonságait jelentősen befolyásolja

– a származási helye,
– az előkészítés.

A tűztérbe adagolt mészkőpor-adalékanyaggal együttes égésénél az anhidritképződés heterogén kristályképződési folyamat, amelynél a kristályok a mészkőrészecskéket körülvevő kalcium-oxid réteg határán keletkeznek. A heterogén kristályképződés két egymás utáni lépésben játszódik le, éspedig:

– egy adszorpciós réteg keletkezik a kalciumkarbonátból keletkező kalcium-oxid környezetében;
– kristályképződés és -növekedés megy végbe az adszorpciós rétegben.

A folyamat leírása rendkívül bonyolult. Fontos szerepet játszik a hőmérséklet. A kalcium-oxid porozitása, és ezáltal a $CaSO_4$ keletkezése 1000 °C hőmérséklet felett erősen lecsökken.

A reakciók hőhatását értékelve a $CaSO_4$-képződés exoterm, míg a CaO, valamint az $CaSO_3$ képződés reakciói endotermek.

A kalcium-oxid keletkezési folyamata hőt igényel: egyrészt a mészkő felmelegítéséhez, másrészt a mészkő kalcium-oxiddá való átalakulásához szükséges hő.

A keletkező kalcium-oxid az égéstermékben lévő kén-dioxidot – feltételezés szerint – két lépcsőben köti meg, melyek a következők:

$$CaO + SO_2 = CaSO_3$$

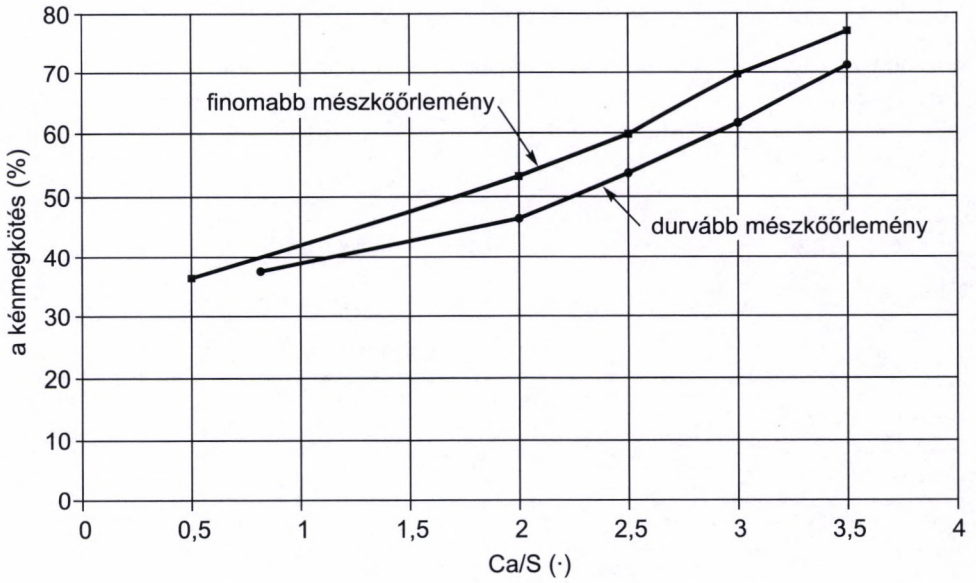
$$2CaSO_3 + O_2 = 2CaSO_4$$

Adott Ca/S arányú adalékolási aránynál, finomabb és a durvább mészkőőrleményt vizsgálva, a kénmegkötés, a finomabb őrlemény nagyobb fajlagos felülete, a kalcinálódás és a kénmegkötés (gipszképződés) szempontjából előnyt jelent (Balogh et al. 1996).

Különösen a finomabb és jobb hatású mészkőpor adagolásánál meg kell oldani azt, hogy a mészkő a szénporral jól összekevert legyen, és ne fajtázódjék, mert ennek hiánya a kisebb kénmegkötésben jelentkezik (5.13. ábra).

5.3. táblázat. Az átalakulások hőmérlege 1 kg mészkőre vonatkozóan

1 kg $CaCO_3$ felmelegítéséhez 20 °C -ról 950 °C-ra	–992 kJ
1 kg $CaCO_3$-ból keletkezik 0,5603 kg CaO + CO_2	–1782 kJ
Összes hőszükséglet	– 2774 kJ
0,5603 kg CaO + SO_2 + 1/2 O_2 -ból keletkező $CaSO_4$	+5024 kJ
A hőmérleg eredményeként a hőfelszabadulás	+3250 kJ
A tűztér utáni fűtőfelületeken a $CaSO_4$ hűléséből 950 °C-ról 180 °C -ra átadott hő	+ 838 kJ
Az összes hőfelszabadítás	+ 5862 kJ
A kazán teljes hőfolyamatában tehát 1 kg mészkő hőfejlesztése (az előbbiekben megjelölt hőmérsékleti viszonyokat és100%-os kémiai átalakulást feltételezve)	5862kJ – 2774kJ = + 3088 kJ



5.13. ábra. A kalcium kénlekötésének függése az őrlemény finomságától és a Ca/S aránytól

A mészkő előkalcinálásának hatása

A tűztérben a hőmérséklet-eloszlás megfelelő biztosítása, a kénlekötéshez szükséges CaO keletkezése, majd a $CaSO_4$-képződés optimálása miatt rendkívül fontos. Egyúttal az alacsonyabb hőfokszint az égési levegőből keletkező nitrogén-oxid képződését is csökkenti.

Az üzemviteli körülmények közül elsősorban a hőmérséklet és a Ca/S mólarány szerepe emelhető ki. A fluidizációs tüzelés körülményei közötti kénlekötésnél a

legkedvezőbb eredmények azonos mólaránynál 800 °C körüli – esetleg kissé alacsonyabb – hőmérsékletnél érhetők el. Az adalékanyag mennyiségének csökkentése igen jelentős, mert

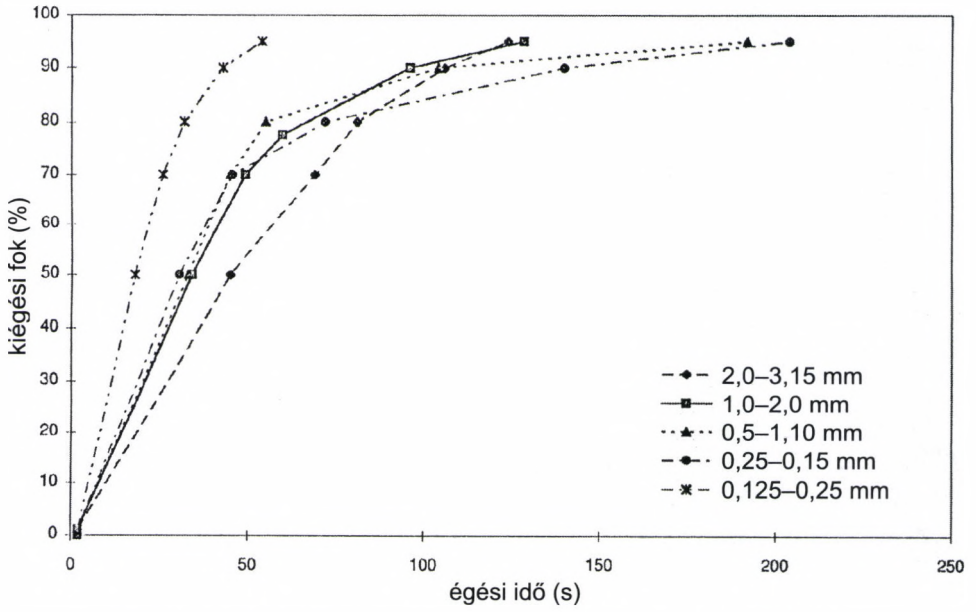
– a költsége magas,
– többlethőveszteség lép fel,
– a hulladékkezelés többletköltséget jelent.

A t = 0 időpontot az állandósult állapothoz képest éppen meginduló változást: a $C(O_2)$átlag – $C(O_2)$ >0, illetve a $C(CO_2)$ – $C(CO_2)$ átlag >0 jelenti.

Az égés legnagyobb sebessége az O_2, illetve a CO_2 koncentrációeloszlások maximumához tartozó időpontban van. Az égés időbeli lefolyását a 25, 50, 70, 80, 90 és 95%-s kiégési értékekkel lehet vizsgálni.

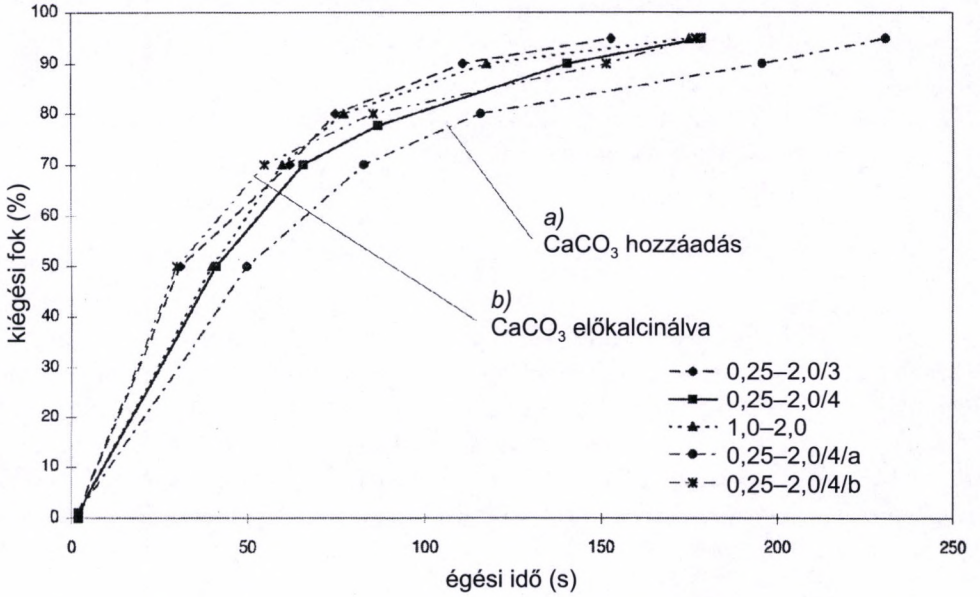
Az oroszlányi szén vizsgálati eredményei

A széntüzeléskor az égéstermék egyik komponense a szén-dioxid. A mészkővel történő kénleválasztásnál a $CaCO_3$-ból, a kénlekötés során jelentős szén-dioxid szabadul fel. Az égéstermékek összetétele jelentősen befolyásolja az égésfolyamatot magát is. Nagyon fontos ismerni a mészkőadagolás következtében fellépő égésfolyamat-módosulást. A mérés adataiból az O_2-, CO_2-koncentrációk alapján számított relatív kiégési foknak az idő függvényében való változását mutatják a következő ábrák.

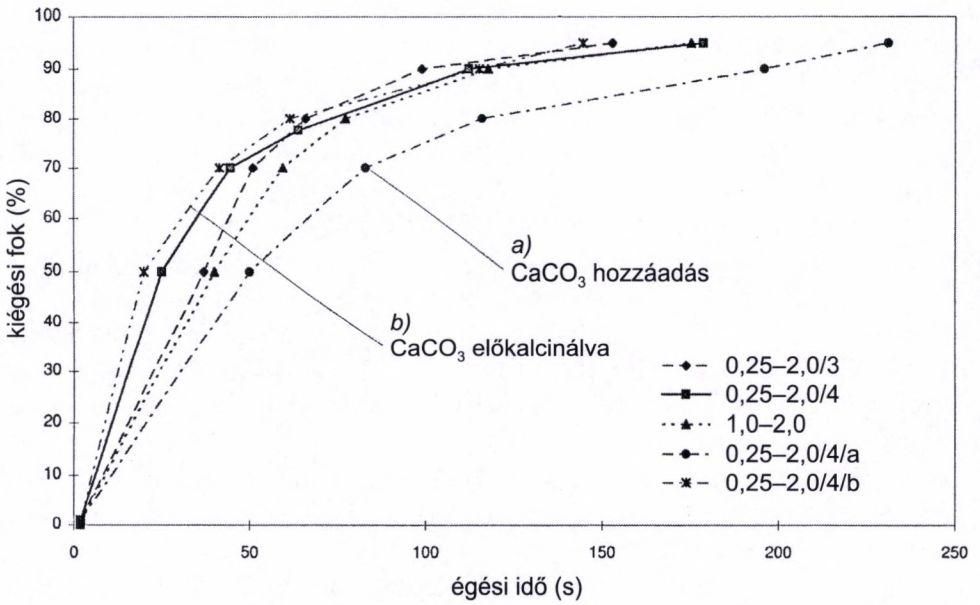


5.14. ábra. A különböző szemcseméretű monodiszperz szénhalmazok égése

Az 5.14., 5.15. és az 5.16. ábrák egy mono- és négy polidiszperz halmaz kiégését mutatja (Balogh et al. 1997)



5.15. ábra. A természetes $CaCO_3$ és az előkalcinált $CaCO_3$ hatása a szénszemcsehalmaz égésére



5.16. ábra. A természetes $CaCO_3$ és az előkalcinált $CaCO_3$ hatása a szénszemcsehalmaz égésére az égéstermék CO_2 tartalma alapján

Az a-val jelölt szénminta Ca/S = 3,5 arányban 0,2–0,5 mm szemcseméretű $CaCO_3$ kénmegkötő adalékot tartalmaz. A b-vel jelölt esetben 30 g ugyanilyen anyagot a szénadagolás előtt előkalcináltuk, ami igen nagy CaO-felesleget (Ca/S > 10) jelent az adott szénminta égésénél.

A $CaCO_3$ adalék nélküli és az előkalcinálást követően adagolt szén égésénél nem tapasztalható lényeges eltérés a kiégés időbeli lefolyásában. A szénhez kevert adalék azonban az égést számottevően lassította, ami mindhárom vizsgált alkotó (O_2, CO_2, SO_2) változásában egyaránt megmutatkozott.

5.6. Nitrogén-oxidok

A nitrogén-oxidok a fosszilis tüzelőanyagok tüzelésekor a lángban és a magas hőmérsékletű égéstermékekben, az égési levegő nitrogén-molekuláinak részleges oxidációjával és a tüzelőanyag nitrogéntartalmának vegyi átalakulásával keletkeznek. Általában NO és NO_2 keletkezik, éspedig az erőművekből emittált nitrogén-oxidokból kb. 95% NO és 5% NO_2. A jelenlegi ismeretek szerint három különböző mechanizmus létezik (Sanders et al. 1996; Furuhata et al. 1996; Naruse–Ohtake 1996; Tigges et al. 2004):

– a „termikus NO",
– a „prompt NO",
– a „tüzelőanyag NO".

A termikus NO a nitrogénmolekulákból, a Zeldovich-mechanizmus szerint képződik. Az átalakulás kb. 1300 °C-nál kezdődik, erősen hőmérsékletfüggő és arányos az oxigénkoncentrációval. A prompt-NO-mechanizmusnál szénhidrogén jelenlétében, a lángfront korai fázisában a nitrogénmolekulákból közbenső termékként jön létre NO.

A tüzelőanyag-NO a nitrogén részleges oxidációjaként organikus formában képződik a tüzelőanyagban. Mind az illóban, mind a kokszmaradékban megtalálható. A kokszmaradékban lévő nitrogén átalakulhat NO-dá és N_2-né. A szénportüzelésnél a tüzelőanyag NO 60–80%-a átalakul illó nitrogénné. Az átalakulás erősen hőmérsékletfüggő, jelentős az oxigénkoncentráció befolyása, azaz a tüzelőanyag-égési levegő keveredése. Elsősorban itt van jelentős szerepe az égő áramlási viszonyainak és a tüzelési módnak.

A legfontosabb reakciókra vonatkozó tájékoztató számításokra különböző képletek alkalmazhatók, amelyek alapján azok a tényezők is értékelhetők, amelyekkel a NO_x-mennyiségek csökkenthetők.

A dinitrogén-oxid gáz (N_2O) jelentős szerepet játszik az üvegházhatás kialakításában. A N_2O hosszú élettartamú gáz, a légkörben kb. 130 évig marad meg. Az atmoszférában lévő N_2O -növekedést különböző tényezők befolyásolják, kisebb

mértékben a széntüzelés. A NO-csökkentő technológiák, és a fluidágyas tüzelés kissé növelhetik a N_2O-emissziót szén esetében. A teljes szénfelhasználás az emberi tevékenység következtében keletkező összes N_2O ~2–6%-áért felelős, míg a világ összes N_2O-keletkezésének kevesebb mint 1-2%-áért. A füstgáz-kéntelenítési technológiák, az égés módosítása és a NO szelektív katalitikus csökkentése nem befolyásolja a N_2O-emissziót. A szelektív nem katalitikus redukció kissé növeli a N_2O-emissziót. A jelenlegi fluidizációs széntüzelés kissé nagyobb N_2O-emissziót eredményez, mint a konvencionális széntüzelések. A VEIKI hibrid fluidtüzelés e szempontból is kedvező technológia az égési levegő fokozatos bevezetésével.

A reakcióknál figyelembe kell venni, hogy a reakciómechanizmusban számos különleges összetevő létezik, amelyek közül többnek döntő szerepe van. Elsősorban az utóbbi évtizedekben a figyelem előterébe került a nitrogén-oxidok keletkezését meghatározó tényezők szerepe. A turbulens tüzelésnél az NO_x-képződés ismeretének gyakorlati jelentősége igen nagy, mert számos fizikai-kémiai paraméterrel befolyásolni lehet. Fel kell használni a gázkeverék különböző helyein az egyensúlyi égés vékony rétegében keletkező NO és a maximálishőmérséklet-adatokat. A turbulens égésnél az NO átlagos keletkezési fokát a következő kifejezés adja:

$$\overline{\omega}_{NO} = \overline{\rho}\tilde{S}_{NO} = \overline{\rho}\int_0^1 S_{NO}(Z)\tilde{P}(Z)dZ$$

ahol

$\overline{\rho}$ átlagsűrűség

$S_{NO}(Z)$ függvény, a vékony rétegben, szűk tartományban erős csúccsal rendelkezik

Z a tömegáram bármely helyén a keverék részaránya

$$Z = \frac{\dot{m}_1}{\dot{m}_1 + \dot{m}_2}$$

A tüzelőanyag és az oxidáló gáz (levegő) tartalmazhat inert gázt, például nitrogént. Tüzeléskor éppen a nitrogén-oxid keletkezése lényeges.

$\widetilde{P}(Z)$ a turbulens fluxus gradiens transzport (a lángtest belső rétege (δ), tüzelőanyag (CH_4) = 0).

Az egyenletet δ- függvény szerint integrálva az NO-reakcióarány meghatározható. Az 5.17. ábra hidrogén-levegő keverék reakciójára mutat példát.

Az átlagos reakciófok a maximális hőmérséklet környezetében:

$$\overline{\omega}_{NO} = \overline{\rho}\tilde{P}(Z_b)\varepsilon S_{NO}(Z_b)$$

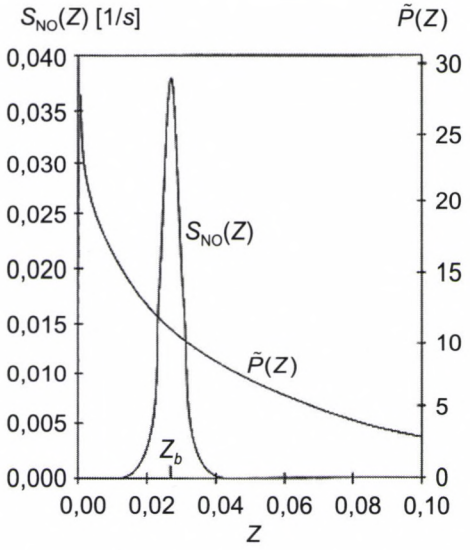
ahol

Z_b a maximális hőmérsékleti helyen a keverék részaránya

T_b a hőmérséklet-maximum

$S_{NO}(Z_b)$ a reakció maximuma

ε a keverékben az NO-keletkezés helyén a reakciózóna vastagsága.



5.17. ábra. Nem előkevert hidrogén – levegő tüzelésekor az NO reakció folyamata (Peters 2000)

$$\varepsilon = \left(\frac{-2RT_b^2}{Z_b^2 E_{NO} \left(\frac{d^2T}{dZ^2} \right)_{T_b}} \right)^{\frac{1}{2}}$$

ahol E_{NO} az NO aktiválási energiája.

A várható NO emisszió jellemzésére javasolják az EINO indexet, amely a teljes tömegáramban a keletkezett NO tömegnek a tüzelőáramhoz való arányát adja.

$$EINO \sim S_{NO}(Z_b)\varepsilon \left(\frac{L}{d} \right)^3 \frac{d}{u_0}$$

ahol

L a lánghossz

d a fúvóka átmérője

$\frac{L}{d} \sim$ állandó

$$Fr = \frac{u_0^2}{gd} \text{ így } \frac{L}{d} \sim Fr^{\frac{1}{5}}$$

Mérések szerint uralkodó nehézségi erő esetén a propánláng diffúziós szakaszánál az emisszió index a Fr számtól az $Fr^{3/5}$ függvénye.

A várható NO_x-emisszió:

$$\frac{EINO}{\frac{d}{u_0}} = 22Fr^{\frac{3}{5}} \left[\frac{gNO_2}{kgtüzas} \right]$$

Az ε-t minden tüzelőanyagra egyenlőnek véve (ε=0,109), az $S_{NO}(Z_b)d/u_0$ a Damköhler-számmal kifejezve:

$$\frac{EINO}{\left(\frac{L}{d} \right)^3} \sim \varepsilon Da$$

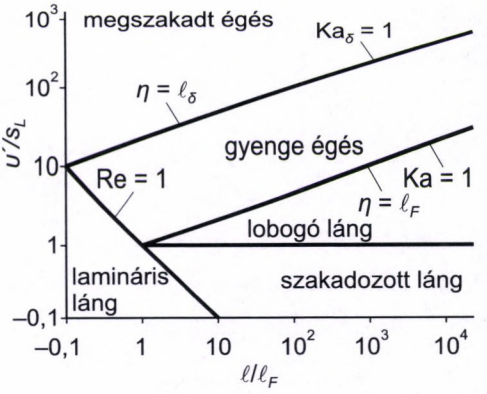
A Damköhler-szám igen jelentős a turbulens tüzeléstechnikában. Az előkevert lángok tartományát mutatja az 5.18. ábra.

A Damköhler-szám (*Da*) értelmezése szerint a turbulenciaidő és a kémiai reakcióidő hányadosa.

$$Da \equiv \frac{\tau_t}{\tau_c}$$

Például, ha a $Da << 1$, a turbulencia sokkal gyorsabb, mint a kémia.

A *Da* felírható egyensúlyi és nem egyensúlyi állapotra.



5.18. ábra. Az előkevert turbulens égés előkevert tartománya

$$Da_1 = \frac{t_{res}}{\tau} \text{ és } Da_2 = \frac{q_{ne}}{h_0}$$

$t_{res} = \frac{l_{ref}}{u_{ref}}$ a referenciahossz és a referenciasebesség

$\frac{q_{ne}}{h_0}$ a nem egyensúlyi folyamat energiája és az áram teljes entalpiája

a *Da* számot diffúziós turbulens lángra felírva:

$$Da = (\chi_{st}.t_c)^{-1}\ \chi_{st} \text{ a láng felületen a disszipáció.}$$

Ez paraméterként használható a diffúziós lángok kutatásánál. Az előkevert lángokkal szemben itt a „láng" idő egyenlő a kémiai idővel és így a Da mindig egységgel egyenlő.

A turbulens és lamináris égés közötti különbség, hogy független a Reynolds-számtól.

A gravitációtól független turbulens diffúziós láng hossza független az Re- és Da-számtól.

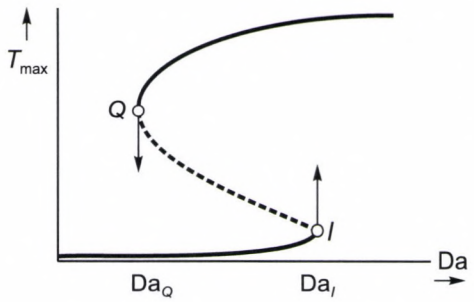
Az NO-emisszió indexe a pl. H – levegő diffúziós számnál független az Re-számtól, de arányos a Da-számmal.

A diffúziós láng emelkedési magassága független a fúvókaátmérőtől, és közel arányosan növekszik a sugár kilépési sebességével.

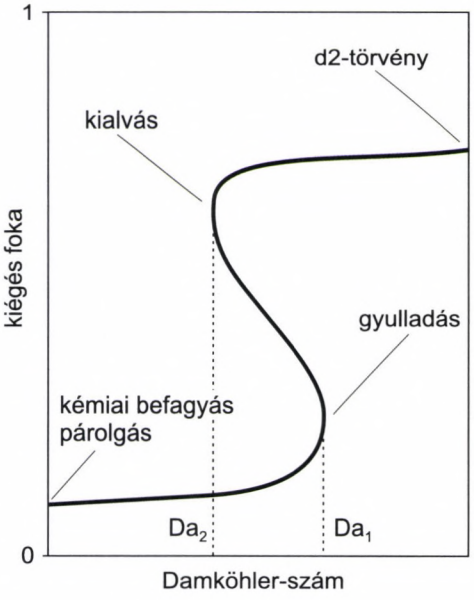
A kémia és a turbulencia kölcsönhatása következtében nő a hőmérséklet az égésihő-felszabadítás növekedése miatt, a hőmérséklettel együtt nő a reakció sebessége.

Az 5.19. ábrán a Da-szám reprezentálja a tartózkodási idő és a kémiai idő arányát.

Az 5.19. ábrát „S" görbének szokták nevezni. Az alsó rész a lassú reakciószakasz a gyulladásig. A Da-szám nő a gyulladásig. Ezután a reakció instabil állapotban



5.19. ábra. A jól kevert turbulens égés esetén a Damköhler-szám szerint változó, maximális hőmérsékletet leíró „S" görbe (Peters 2000)



5.20. ábra. A csepp párolgására és az égésére jellemző „S" görbe (Dryer 1997)

nő az ún. kialvási pontig. A felső görbeszakaszon a reakció növekszik, és ismét stabil állapotban van.

A Damköhler-szám mind a folyékony, mind a gáztüzelések esetén jól alkalmazható. A tüzelőanyag-porlasztmányban a cseppek felületén végbement párolgási folyamat után a gáz-gőz fázisnak az oxigénnel való keveredése történik és az égési folyamat. A cseppégésre a klaszszikus d^2-törvényt egylépéses kémia-kinetikai folyamattal szokták alkalmazni, nagy aktiválási energiával. A Da-szám:

$$Da = \frac{\frac{r_s^2}{D_g}}{reakcióidő}$$

ahol

r_s a cseppátmérő

D_g a gázfázisú közeg diffúziós tényezője.

A *Da* függvényében az égési folyamatot az 5.20. ábra mutatja.

Ha a szénhidrogén nem tartalmaz nitrogénvegyületet, akkor tüzeléskor termikus és prompt NO keletkezik. Ha nagyon ritkán a folyékony szénhidrogén N vegyületet is tartalmaz, akkor N_2O is lehetséges az égéstermékben.

A termikus NO az N- és O_2-koncentrációnak megfelelő egyensúlyban áll be.

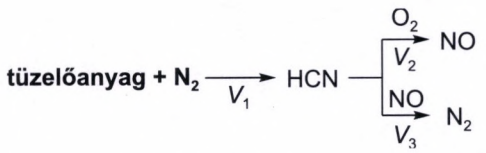
$$\frac{d[\mathrm{NO}]}{dt} = V_{NOT} = A_T [\mathrm{N_2}][\mathrm{O_2}]^{\frac{1}{2}} \exp-(\frac{E_T}{T})$$

ahol

$$A_T = 5{,}74 \cdot 10^{14} \left[cm^3 / mol^{\frac{1}{2}} / s \right]$$

E_T = aktiválási energia

A prompt NO a turbulens szénhidrogénlángban N_2- és HCN-reakcióval képződik, és vagy NO-vá oxidálódik, vagy N_2-vé alakul. A folyamatot az 5.21. ábra mutatja.



5.21. ábra. A prompt NO-képződés egyszerű modellje

A reakciók:

$$V_1 = \rho X_{tüza}^{0,9} \cdot X_{N2} \exp - \frac{30000/RT}{M_m},$$

$$V_2 = \rho(1 \cdot 10^{10}) X_{HCN} X_{O2}^{b} \exp - \frac{67000/RT}{M_m},$$

$$V_3 = \rho\left(3 \cdot 10^{12}\right) X_{HNC} X_{NO} \exp - \frac{60000/RT}{M_m},$$

ahol

X_i (i = tüza, O_2, HNC, NO) molfrakció

b az O_2 mol frakció szerint változó reakciórend

kg/kmol a keverék moltömege

M_m (= $1 \cdot 10^3$) az NO- és HCN-koncentráció összehasonlítása

A_p Lamináris lángban a Zeldovich-mechanizmust szokták alkalmazni.

$$N_2 + O = NO + N; \ldots\ldots\ldots O_2 + N = NO + O; \ldots\ldots\ldots N + OH = NO + H$$

Az első reakció a leglassúbb, így jó közelítéssel használható. A reakció:

$$\dot{\omega}_{NO} = BC_O C_{N2} M_{NO} \exp\left(-\frac{T_a}{T}\right) \ldots\ldots\ldots kgm^{-3}s^{-1}$$

ahol

C_0, C_{N2} az oxigén- és a nitrogénkoncentráció mol/cm^3

M_{NO} az NO molekulatömege

$B = 1{,}9 \cdot 10^{14}$ cm^{3}mol^{-1}s^{-1}

T_a aktiválási energia 38 375 K

Turbulens lángnál a termokémiai folyamatnál az u és D változását is figyelembe kell venni.

Az E emissziós tényező:

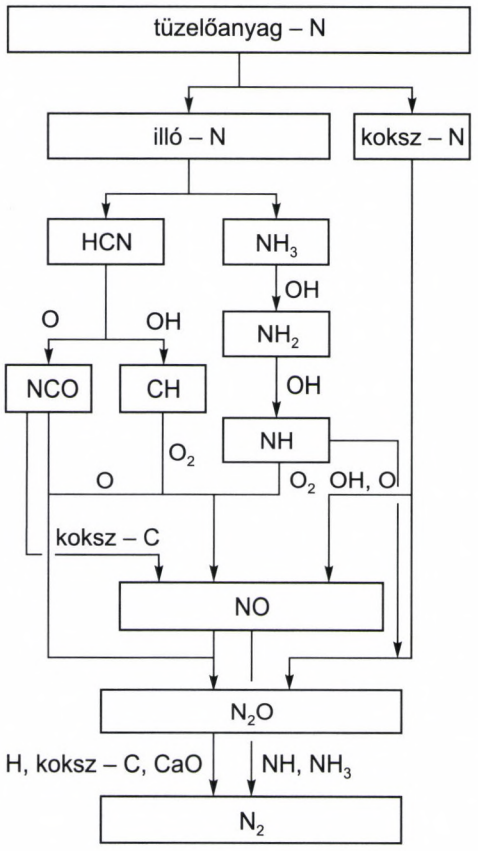
$$E = \frac{2\pi D^3 \int_0^\infty d\left(\frac{x}{D}\right) \int_0^\infty \frac{r}{D} \bar{\omega}_{NO} d\left(\frac{r}{D}\right)}{\frac{1}{4}\pi \rho_f u D^2} = \frac{8}{\rho_f} \frac{D}{u} I$$

ahol

ρ_f a tüzelőanyag (gáz) sűrűsége

$$I = \int_0^\infty d\left(\frac{x}{D}\right) \int_0^\infty \frac{r}{D} \bar{\omega}_{NO} d\left(\frac{r}{D}\right)$$

A kémiai egyensúly és változatlan lánggeometria esetén minden profil független az u-tól és D-től, I = állandó, és E a D/u-val meghatározható.



5.22. ábra. Az N_2O képződési és bomlási reakciófolyamata (Naruse–Ohtake 1996)

Egyes esetekben a mérések a képlettől eltérést mutattak. L/D = állandó esetén, (lánghossz/diffúziós tényező).

$$\frac{I}{\rho_f} \sim \left(\frac{u}{D}\right)^{\frac{1}{2}}$$

Mások szerint

$$\frac{I}{\rho_f} \sim Fr^{\frac{3}{5}}$$

Általában megállapítható, ha ω'_{NO} a turbulens lángban a növekvő időtartományban növekszik, ami hozzájárul a teljes NO-emisszió növekedéséhez.

Ha a tüzelőanyagban nitrogén is található, akkor N_2O-képződéssel is számolni kell (Naruse–Ohtake 1996). Ez elsősorban mint üvegházgáz jelentős, továbbá a sztratoszféra ózonrétegének szétrombolásában tulajdonítanak neki szerepet. Szénhidrogén-tüzeléseknél elhanyagolható, de a teljesség kedvéért egy viszonylag egyszerűsített sémát az 5.22. ábrán bemutatunk.

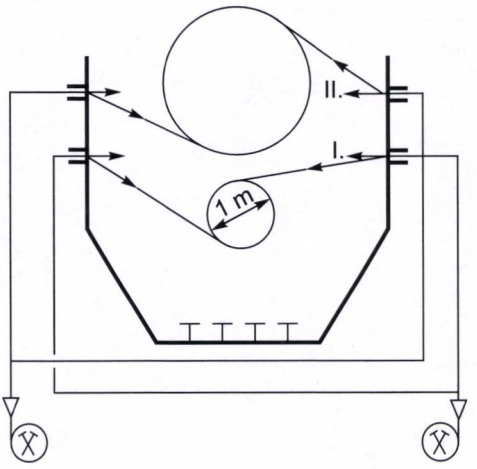
Az N_2O a HCN és NH_3 oxidáló reakciójával NCO és NH radikálok közbenső termékeivel keletkezik (a reakciómechanizmusra már több ezer lépéses folyamat is található). Az N_2O mind homogén, mind heterogén reakció közvetlen terméke.

5.7. Tüzelési móddal történő NO_x-csökkentés

A konstrukciós megoldások mind a régebbi, üzemelő kazánoknál, mind az új berendezéseknél számos lehetőséget biztosítanak a környezetszennyezés, nevezetten az NO_x csökkentésére.

A korábbi saroktüzeléseket úgy alakították ki, hogy az égők tengelyei egy a tűztér közepére képzelt, kb. 1 m átmérőjű kör érintőjeként helyezkedtek el. Így üzem közben, a tűztérben egy örvény képződött, a tüzelőanyag és az égési levegő mielőbbi jó keveredése mellett. E tüzelési módnál is van lehetőség az NO_x-emisszió csökkentésére.

A levegősugarak egy részét nem az eredeti 1 m-es kör érintőjeként irányítják, hanem ennél nagyobb átmérőjű, ezzel koncentrikus kör érintőjeként (5.23. ábra). Ezzel az égés első fokozatában léghiányos zónát létrehozva, ennek ismert hatásaként az NO_x csökkenését lehet elérni.



5.23. ábra. Az NO_x-mennyiség csökkentése a tüzelőanyag-sugarak befúvási szögének módosításával

A tűztéri tűzvezetéssel a különböző paraméterek közül a következők befolyásolhatók:

- az átlagos oxigénmennyiség csökkentése,
- a helyi oxigénfelhasználás dinamikája,
- fokozatos oxigénadagolás,
- az átlagos hőmérséklet csökkentése,
- a hőmérsékletcsúcsok csökkentése,
- az NO_x-képződést csökkentő kémiai elemek keletkezése,
- az NO_x-képződést csökkentő gázkörnyezet létrehozása.

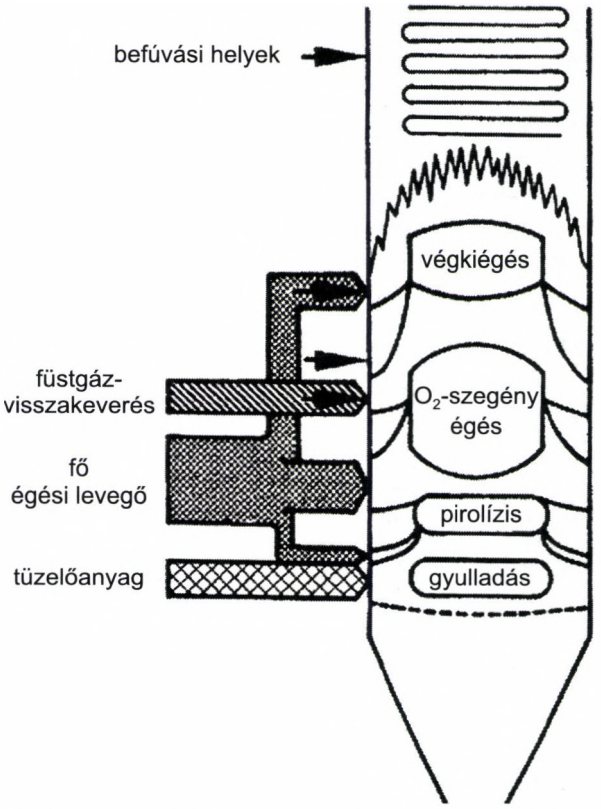
E feltételek megteremtését biztosítja a megfelelő tüzelési elrendezés. E rendszerekben az égés főbb szakaszai: gyulladás, pirolízis (az illó nitrogénvegyületek felszabadulásával), égés. Az oxigénszegény környezetben alacsony NO_x-képződés mel-

lett folyik a pirolízist követő égés. Ezt azonban még a megfelelő kiégést biztosító szakasznak kell követnie. Az égésilevegő-adagolás megválasztásának azonban a szénfajta égési tulajdonsága korlátot szab.

Az égőknek a következő legfontosabb feltételeket kell kielégíteni:
- a tüzelőanyag gyulladását és a lángstabilitást,
- széles terhelési tartományban biztonságos működést,
- minimális éghetőveszteséget,
- alacsony szennyezőanyag-kibocsátást.

A fosszilis tüzelőanyagokra különböző módszerekkel érik el a felsorolt feltételeket.

Az égők a következő legfontosabb nagyobb csoportokba sorolhatók:
- többfokozatú levegőadagolás,
- többfokozatú tüzelőanyag-adagolás,
- füstgáz-recirkuláció.



5.24. ábra. A többfokozatú levegőadagolás hatása az égési folyamatra

Az égési levegőnek több fokozatra, primer, szekunder és tercier levegőre való osztásával a tüzelőanyag égésének feltételeit és ezzel a nitrogén-oxidok keletkezését tudjuk befolyásolni.

A tüzelési vázlatot az 5.24. ábra mutatja. A láng belső zónájában tüzelőanyagban igen gazdag (30–50% az elméleti levegőmennyiségre vonatkoztatva) keverék, erős redukáló környezetet hoz létre. A második szakaszban a további égéshez szükséges levegőt táplálják a lángba, majd a tercier levegővel szén esetében a sztöchiometrikus arány kb. 120%-ának megfelelő levegőmennyiséggel a teljes kiégést biztosítják.

Gyakran az égőknél a levegőadagolás több fokozatra történő osztása mellett a tüzelőanyagot is több fokozatban táplálják a tűztérbe. Ezzel a megoldással az égési zónában a környezeti viszonyok jelentősen változtathatók, és jól megteremthetők az alacsony NO_x-képződés feltételei.

Az égési zónában a redukáló környezet kialakításának egyik eszköze közvetlenül az égőn keresztül betáplált füstgáz-recirkuláció is lehet. A központi nyíláson a primer levegő és tüzelőanyag kerül betáplálásra. A visszakevert füstgáz a szekunder és tercier levegővel kerül a tűztérbe (pl. Babcock Hitachi).

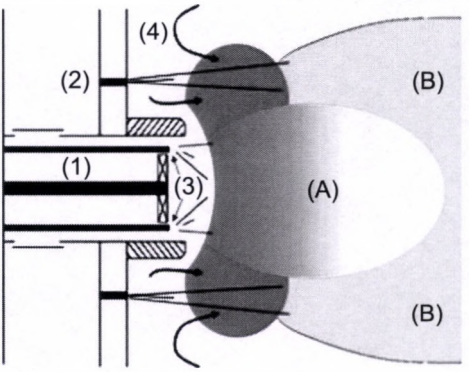
A szénhidrogének tüzelésekor az égők általában mind olaj-, mind gáztüzelésre alkalmasak, lényeges szempont az alacsony NO_x-érték biztosítása. Ilyen égőre mutat példát a Stork egyik impulzuségő megoldása (5.25. ábra).

Az égő különválasztott levegő- (1) és tüzelőanyag- (2) befúvással rendelkezik. Ez azt jelenti, hogy a füstgázból a visszakeringtetésre elvont rész (4) elsődlegesen az égési levegővel keveredik, és utána képezi az éghető keveréket. Csökken az oxigénkoncentráció, de nő az áramló tömeg. Mindkettő az NO_x csökkentését segíti. A levegőáramba egy impellert is elhelyeznek. Ezzel az „A zónában" stabil gyulladás lesz, majd a gáz egy részét az impeller után táplálják be (3). Az égés a „B zónában" fejeződik be, ahol alacsony a levegőtényező és a hőmérséklet is.

Stork Thermeq Ultraalacsony NO_x-gázégő

Tüzelőanyag	NO_x-szint
Földgáz	10 mg/m$^3_0$
Nehézolaj	150 mg/m$^3_0$

Kétfokozatú égés
Füstgáz-visszakeringtetés
Utóégetés



Műszaki adatok
Tüzelőanyag: gáz
Hőteljesítmény-tartomány: 5–100 MWth
Szabályozási tartomány: 1 : 5

5.25. ábra. Kétfokozatú, füstgáz-visszakeringtetéses égő

5.8. Nitrogén-oxidok leválasztása

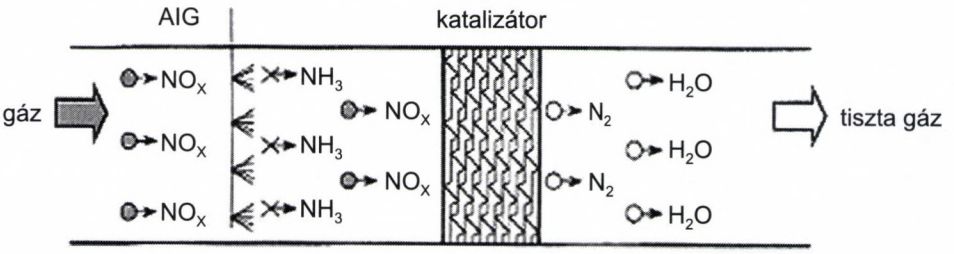
A nitrogén-oxid-kibocsátás csökkentése tüzeléstechnikával és leválasztással lehetséges. Az új tüzelési elvek alapján történő tűzvezetési módosítások jelentős csökkentést biztosítanak, de szükség esetén kémiai leválasztást is alkalmaznak. Igen sok eljárást fejlesztettek ki, de széles körben az ammóniabefúvásos DeNOx-rendszer terjedt el.

A DeNOx-eljárás elve az 5.26. ábrán látható.

$$4NO + 4NH_3 + O_2 \Rightarrow 4N_2 + 6H_2O$$

$$NO + NO_2 + 2NH_3 \Rightarrow 2N_2 + 3H_2O$$

$$6NO_2 + 8NH_3 \Rightarrow 7N_2 + 12H_2O$$



5.26. ábra. A nitrogén-oxidok leválasztásának elve

6. A szén-dioxid

6.1. A Föld szénciklusa

A földi élet egyes szakaszait többféle módon lehet meghatározni. A szénciklusok is adnak egy lehetőséget a földi élet tanulmányozására, a következők szerint (Alföldi):

A szénciklus I.

- Szénforrások: légkör, szárazföldi élőlények, talajban szerves maradványok, kőzetek
- A légkörben jelenleg 750 milliárd tonna CO_2 (C karbonban kifejezve) ⇒ fotoszintézis (pl.: trópusi esőerdő 1-2 kg/m^2/év C-t köt meg) ⇒ szerves anyag
  → Növényevők légzése
  → Elhalt élőlényeket lebontók

Ezáltal újra visszakerül a CO_2 a környezetbe. Évente 54–60 milliárd tonna keletkezik lebontással, 60 milliárd tonna pedig életfolyamat során jut vissza.

A szénciklus II.

- A szárazföldi élővilág jelentős szénforrás: kb. 560 milliárd tonna a C-tartalma
- Legjelentősebb az erdőirtás: évente kb. 1 milliárd tonna pluszszenet jelent a légkörben
- Az erdőirtás mértékét a FAO a '80-as években évi 11,4 millió ha-ra becsülte → ma 16-20 millió ha/év!
- Csökken a zöldfelület → fotoszintézis mértéke → kevesebb CO_2-t vonnak el a légkörből
- Természetkárosító hatás: fajpusztulás (4-6 ezer faj/év), talajerózió

A szénciklus III.

- A talaj révén nagy mennyiség: 1200–1400 milliárd tonna C raktározódik szerves maradványok, humusz formájában

– Stabilizálás: óriási biomassza és irtás utáni telepítés (növény helyére növény); instabilizálás: erdőirtás.
– Fosszilis tüzelőanyagok elégetése – évi 5–8 milliárd tonna C kerül a levegőbe
– Égetés során CO_2, CO, korom keletkezik

A szénciklus IV.
– Tengerben: a felszíni vizekben az oldás 725 milliárd tonna karbont, CO_2-t képes hasznosítani a fotoszintézishez
– Fitoplankton → tengeri állatok → elhalt szerves anyag → ebből 4 milliárd tonna jut a mélységi vizekbe és 1 milliárd tonna az üledékekbe (fosszilis tüzelőanyagok)!
– A tengervíz áramlása nyomán kb. 40 milliárd tonna áramlik a felszíni vizekbe és kb. 39 milliárd tonna jut fentről a mélyebb rétegekbe (a keveredés ciklusa 1000 év)
– Óceán elnyel 3 milliárd t/év, a többletet nem nyeli el → az a légköri CO_2 koncentrációt növeli (100 év alatt: 290 ppm → 380 ppm)

A szénciklus V.
– A legegyszerűbben erdősítéssel köthető meg a CO_2.
– Üvegházhatású gáz is (CO_2, CH_4, N_2O,...stb.)
– Melegedés → tenger hőmérséklete emelkedik → kevesebb CO_2–ot tud oldani.
– Geológiailag a karbonátos kőzeteknek legnagyobb a CO_2 raktározó képességük.
– A különböző földtörténet időszakokban, a felhalmozódó elhalt mészvázak CO_2 ciklusa.
– Mállás és vulkáni működés útján kerülhet változó mennyiségű CO_2 a kőzetraktárból a levegőbe.

6.2. A különböző energiaforrások fajlagos szén-dioxid-fejlesztése

A magyarországi különböző tüzelőanyagok fajlagos CO_2-kibocsátásai általában magasak. A hatásfokjavítás egyik eszköz a káros anyagok és a szén-dioxid-kibocsátások csökkentésére. Az energiafejlesztés hatásfokának javításához az utóbbi évtizedekben legfontosabb eszköznek a gázturbina bizonyult. Míg 1980-ban a kombinált gáz-gőz körfolyamatokat csak kismértékben alkalmazták, 1990 táján az új hőerőművek egyharmadát tették ki, és úgy jósolják, hogy az elkövetkezendő években az új hőerőművek 60%-a ezen eljárás szerint épül. A folyamatos fejlesztések eredményeképpen a folyamathatásfok eléri a 60%-ot, 96%-os rendelkezésre

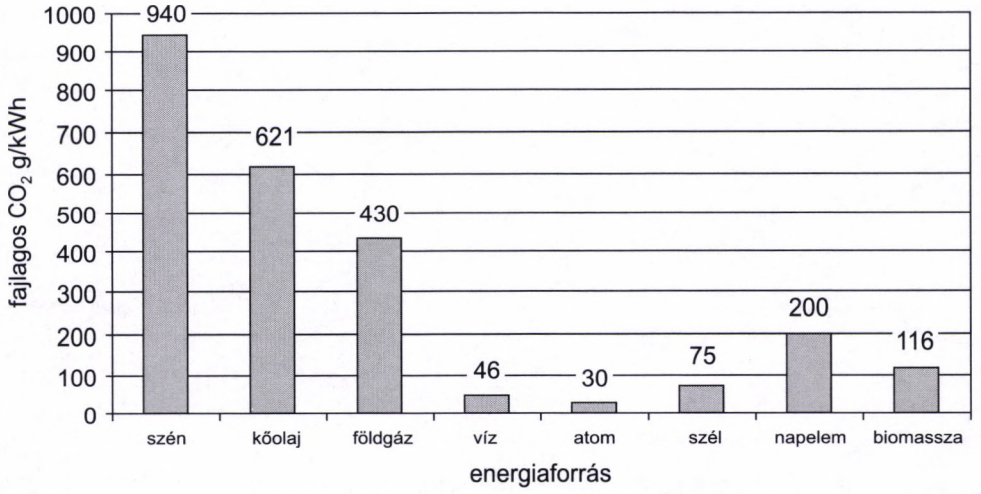
állás mellett. Hőszolgáltatással egybekötve egyes esetekben 90%-os tüzelőanyag-hőkihasználás is elérhető.

Az energetikában felhasznált tüzelőanyagok közvetlenül is hatással vannak a kibocsátott CO_2 mennyiségére, de közvetve is, a tüzelőanyag-hasznosítás elérhető hatásfokán keresztül. Az adott tüzelőanyagon belül a hatásfokjavítás az egyik leghatékonyabb eszköz, minden környezetszennyező anyag és a CO_2 kibocsátásának csökkentésére.

A hatásfok növelése különösen az alacsonyabb értékeknél hatásos. Ha a hatásfokot azonos villamosenergia-termelés mellett 20%-ról 30%-ra növeljük, 33% CO_2-emissziócsökkenést lehet elérni, míg 30%-ról 40%-ra a csökkenés csak 25%.

Általában a környezetszennyező anyagok kibocsátásának, de a CO_2 mennyiségének csökkentésében is az erőműtechnika lényeges szerepet játszik. Néhány technika már a jelen, illetve a közeljövő technikája, néhány csak kissé a távolabbi jövőben kerül szélesebb körben alkalmazásra, például az integrált elgázosításos kombinált folyamatok.

Az emberi tevékenységekhez kapcsolódó szén-dioxid-kibocsátások meghatározó hányada a tüzelőanyag felhasználásából származik. A tüzelőanyag felhasználásához kapcsolódó szén-dioxid-kibocsátás a világon jelenleg mintegy évi 8 milliárd tonnára becsülhető. Ehhez jön még a tüzelőanyag-felhasználáshoz viszonyítva 20–25% az emberiség, a háziállatok kilélegzéséből, a biomassza-égetésből, a háztartási hulladék bomlásából, valamint az egyes technológiai folyamatokból származó kibocsátás. Az energetikában ugyanazon mennyiségű, fejlesztett energiára a kibocsátott szén-dioxid jelentősen függ az elégetett tüzelőanyag fajtájától. Az összehasonlításra az egységnyi energiára (Joule, Wh stb.) eső szén-dioxid mennyisége, az úgynevezett fajlagos szén-dioxid-kibocsátás szolgál.



6.1. ábra. A különböző tüzelőanyagok fajlagos szén-dioxid-kibocsátása

A földgázégés

$$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$$

vagyis $16 + 64 = 44 + 36$

Tehát 1kg metán eltüzelésekor 44/16 kg szén-dioxid keletkezik. Ha a földgáz fűtőértéke H MJ/m^3, 1kg metán eltüzelésekor 44/16 kg szén-dioxid keletkezik, sűrűsége γ kg/m^3.

A metán égésére vonatkozó szén-dioxid-emisszió tényező:

$$e_{CO2} = \frac{44 \cdot \gamma \cdot 10^3}{16 \cdot H} \text{.....} kt/PJ \text{.....} (\rightarrow g/MJ)$$

Figyelembe véve a hazai földgáz fűtőértékekét és sűrűségeket

$$e_{CO2} = 43 - 59 \; kt/PJ$$

értékeket kapunk.

A különböző olajfrakciókat nyílt láncú és gyűrűs szénhidrogén-vegyületek alkotják. Feltételezve egy „jellemző" paraffinsortagot, amelyre egy sztöchiometriai egyenletet lehet felírni.

A jellemző tagokat a BME Kémiai Technológiai Tanszékétől, a frakciókra kapott C/H arányokra Tajthy a következő közelítő értékeket adta.

6. 1. táblázat. A különböző szénhidrogének frakció-összetétele

	Sor-tag-szakasz C_i–C_j	„Jellemző tag" C_k
Benzin	C_5–C_{11}	C_7
Kerozin	C_{10}–C_{18}	C_{14}
Dízelolaj, HTO	C_{12}–C_{26}	C_{18}
Könnyű fűtőolaj	C_{26}–C_{38}	C_{30}
Nehéz fűtőolaj	C_{35}–	C_{40}

Az adatokkal az adott olaj tökéletes égésére vonatkozó sztöchiometriai egyenletet

$$C_mH_n + (m + \frac{n}{4})O_2 \rightarrow mCO_2 + \frac{n}{2}H_2O.$$

Meghatározhatók az egyes frakciók szén-dioxid-kibocsátására vonatkozó emissziótényezők.

6.2. táblázat. Az olajégés a szén-dioxid-emisszió tényezői:

	e_{CO2} kt/PJ
Benzin	72,07
Kerozin	73,52
Dízelolaj	73,76
Könnyű fűtőolaj	77,47
Nehéz fűtőolaj	78,30
Metil-alkohol (metanol) esetében	69,2
Etil-alkohol (etanol) esetében pedig	72,2

Szilárd tüzelőanyagok égése

A keletkező szén-dioxid meghatározásakor a karbontartalom (C) a mérvadó.

Közelítésként a szén karbontartalmának meghatározására használják a tüzelőanyag fűtőértékének (H) és a karbon fűtőértékének (H_c) arányát. Ez különösen például nagy kéntartalmú szeneknél jelentős elhanyagolás. Egy kg karbon égésekor (fűtőérték) 34 MJ/kg (GJ/t) hő fejlődik

Az 1 PJ hőre eső karbonmennyiség:

$$C = \frac{10^6 PJ}{34 GJ/t} = 29,4 kt\ karbon/PJ$$

Egy tonna karbon elégésekor 44/12 = 3,67 t szén-dioxid keletkezik, tehát a szilárd tüzelőanyagok elégésekor a szén-dioxid-emisszió tényező:

$$e_{CO2} = 29,4 \cdot 3,67 = 107,9\ kt/PJ$$

A fűtőértékből számított karbonnal meghatározott és a szenekre vonatkozó valóságos emissziótényező kissé eltér egymástól, mert a szenek egyéb éghető anyagot is tartalmaznak. A pontosabb értékek inkább a következők:

6.3. táblázat. A különböző szenek korrigált emissziótényezői

	kt CO_2/PJ
Feketeszén	100
Barnaszén	98
Lignit	110
Tűzifa	100
Biomassza	100
Koksz	108

A 6.4. táblázat a hazai energiamérlegben szereplő energiahordozók elégetése során keletkező fajlagos CO_2-mennyiségeket foglalja össze. A feltüntetett adatok nem foglalják magukban a teljes technológiai ciklust. A kapcsolódó területek emisszióját a külön számítások tartalmazzák (pl. az uránfeldolgozás emissziója a bányászatnál, az atom- vagy szélerőmű építési emissziója az építőiparnál stb.).

A hő- és villamosenergia-fejlesztésnél a kibocsátás meghatározásakor figyelembe kell venni az előállításhoz felhasznált alap- és átalakított energiahordozókat, azok arányát és a technológiai hatásfokokat.

6.4. táblázat. Különböző tüzelőanyagok fajlagos szén-dioxid-kibocsátása

Energiahordozó	Fajlagos CO_2 kibocsátás (kg/TJ)		
	min	átlag	max
ALAP-ENERGIAHORDOZÓK			
Szén	94 600	104 800	115 000
Kőolaj		73 300	
Földgáz		56 300	
Vízerőművi villamos energia		0	
Atomerőművi villamos energia		0	
Szélerőművi termelés		0	
Tűzifa		112 000	
Kommunális hulladék		100 000	
ÁTALAKÍTOTT ENERGIAHORDOZÓK			
Brikett		97 500	
Koksz		107 000	
PB kőolaj-feldolgozásból		63 100	
Benzin		69 300	
Petróleum		73 300	
Gázolaj és tüzelőolaj		74 100	
Fűtőolaj		77 400	
Bitumen		80 700	
Egyéb kőolaj-lepárlási termék		73 300	
Kamragáz		260 000	
Kohógáz		182 000	
Hőenergia		75 800	
Villamos energia		101 442	
Import villamos energia		0	
Kőolajkoksz		97 500	

6.3. A szén-dioxid változása a Föld történelmében

Az energetika ismételten hangsúlyozva korábban és a jövőben is kb. 80–85%-ban fosszilis energiahordozókat használ a szükségletek ellátására. A Föld légköre és a földfelület közötti kapcsolat az évmilliók során kölcsönhatásban lévő folyamatos változáson megy át. A szénmegkötés és a -felszabadulás folyamata a természet része. A szárazföld és a tengerek éves szénforgalma átlagban 231 GtC/év, azaz $44 \cdot 10^4$ tC/s. Ebbe kapcsolódik be az emberi tevékenység által keletkező kb. 6–8 GtC/év, ami ~$1{,}14 \cdot 10^4$ tC/s pluszértéket képvisel. A kapcsolat a teljes forgalomra van hatással. A jövő szempontjából elsősorban a légkörben maradt rész a fontos és annak a globális hőmérsékletre való hatása.

Jelentősebb fosszilistüzelőanyag-felhasználás kb. 150 évvel ezelőtt kezdődött. A légkörre való globális hatást a fosszilistüzelőanyag-felhasználásnak szén-dioxid-termelő képessége, és a légkörben mért tényleges koncentráció ismeretében egyszerű globális számításokkal lehet meghatározni. Hangsúlyozni kell, hogy globális értékeket a legkisebb hibával, a szükséges, de legkevesebb paraméterrel lehet meghatározni. Ez a lehetőség az ismert fő paraméterekkel adva van. („Everything should be made as simple as possible, but no simpler." Csináljunk mindent a lehető legegyszerűbben, de annál egyszerűbben ne! Einstein).

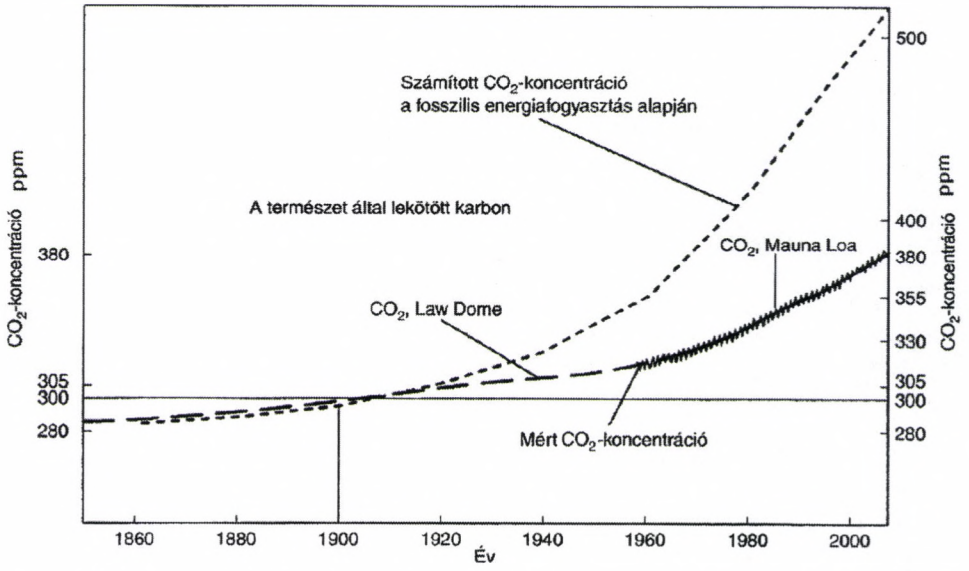
Az elmúlt 150 évben a fosszilistüzelőanyag-felhasználás változása és 20 éves periódusokkal számolva a teljes felhasználás (a 2000–2005 szakasz rövidebb) a 6.5. táblázatban található.

6.5. táblázat. Az elmúlt 150 év fosszilisenergia-fogyasztása és szén-dioxid-kibocsátása

	1860	1880	1900	1920	1940	1960	1980	2000	2005
Energiafogyasztás 10^9.Gtoe/év	0,2	0,6	1,0	1,5	2,5	6,0	9,13	11,43	14,0
20 éves szakaszokkal a teljes energiafogyasztás és a CO_2-emisszió									
		8	16	25	40	85	152	203	63,5
CO_2 Gt		24	48	75	120	255	456	609	190,5
Levegőben CO_2									
Teljes 10^3Gt	2,21	2,234	2,282	2,357	2,477	2,732	3,188	3,797	3,988
Számolt koncentr. ppm	288	291,1	297,4	307,2	322,8	356	415,5	494,8	519,7
Mért CO_2 koncentr. ppm	288	293,6		306		319		362	383
Lekötés %		–80,6		23		73,4		69	
Teljes energiafelhasználás			1860–2005			592,5 Gtoe			
Teljes emisszió CO_2			1860–2005			1777,5 Gt			
Átlagos CO_2-lekötés			1860–2005			59%			

Az adatok a jelenleg rendelkezésre álló, legmegbízhatóbb forrásokból származnak. Az elemzéseknél figyelemre méltó értékek adódtak, mivel az emberi tevékenység által kibocsátott szén-dioxid jelentős része nem jelentkezik a légköri koncentráció növekedésében, amint az általunk szerkesztett 6.2. ábra szemlélteti.

A természet alkalmazkodása a földi rendszer szénlekötésének növekedésében mutatkozik.



6.2. ábra. A földi fizikai és biológiai rendszer, és a légköri szén-dioxid-koncentráció növekedése közötti kapcsolat idő szerinti változása (Reményi 2010)

Megállapítható, hogy az iparosítás kezdeti szakaszában a fosszilis energiahordozó felhasználása nem gyakorolt kimutatható hatást a természet szénforgalmára. A légkörben az ipar által okozott széntartalom-növekedést meghaladta a természetes szén-dioxid-koncentráció növekedése. Ez arra is rámutat, hogy a természet szénforgalmában az ipari többlet a folyamatok (fizikai, kémiai, biológiai) szempontjából nem különálló rész. A származás nem játszik jelentős szerepet. Az 1930-as évek környékén megállapítható, hogy az emberi tevékenységből származó CO_2 hatással van a légkör koncentrációjára. Itt sem ismeretes azonban, hogy a többlet szén-dioxid-rész az ipari vagy a természetes szén-dioxidból származik.

A légkörben tárolt szén mennyiségének növekedése kisebb, mint amennyit az emberi hatás indokolna. Az ipar által létrehozott CO_2-mennyiséget alapul véve a légkörben a növekedés kisebb, a különbséget a lekötés mértékének növekedéseként kezelhetjük. A természet rövid időn belül megkezdte az alkalmazkodást az új helyzethez, ami feltehetően a jövőben egyre erőteljesebben érvényesül.

A CO_2-t elsődleges paraméterként felelőssé tenni a klíma alakulásáért, tudományosan nem indokolt. A tényleges szerepét a hőenergetikai viszonyok alakulásában elismerve, egyszerű fizikai számításokkal pontosabban meg lehet közelíteni, mint bonyolult, a teljes, átfogó földi rendszert modellező számításokkal.

A Föld energetikai egyensúlyának témája az energetika, hőtechnika és a tüzeléstechnika szakterületébe tartozik. Az energetikai változások és különösen a gázok hősugárzása egzakt törvényekkel leírhatók. Ez ad alapot arra, hogy a szén-dioxid szerepének értékelésébe a légkörfizikusok mellett az energetikusok is megalapozott véleményt tudnak kialakítani.

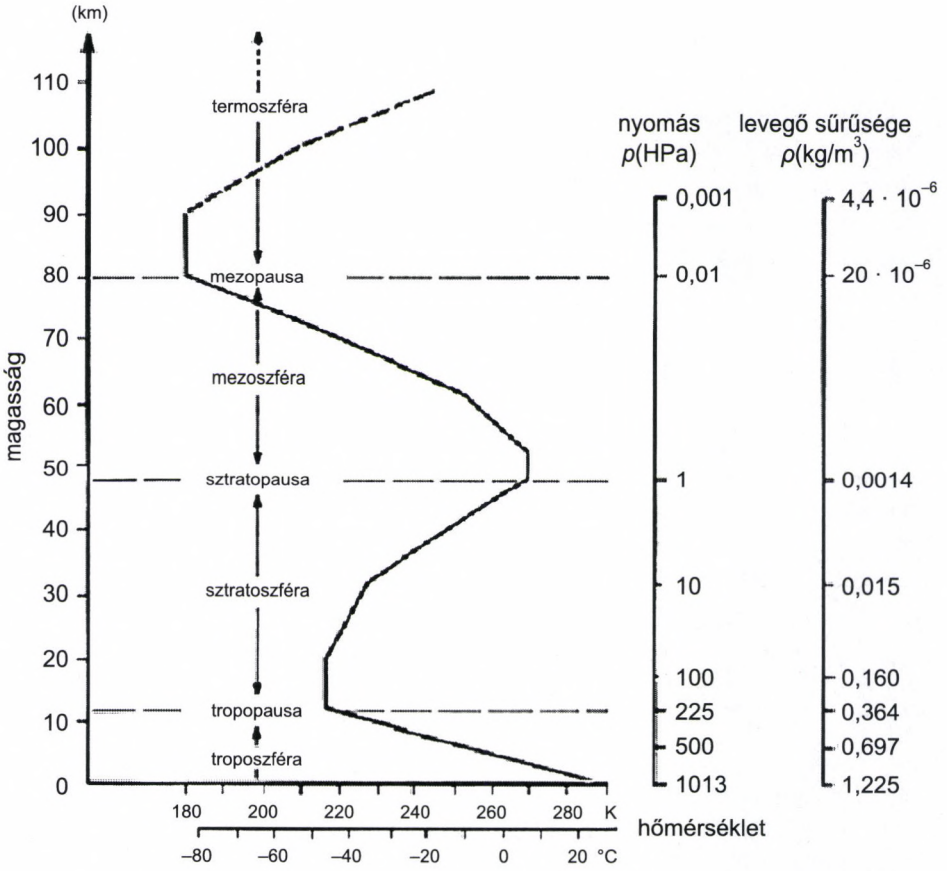
Az irodalomban még a globális felmelegedés fogalmát is nagyon pongyolán használják. A hibázási lehetőség nagyobb, mint a CO_2-vel előidézhető változás.

Az IPPC-ben végzett kutatás igen sok részeredménye értékesen felhasználható.

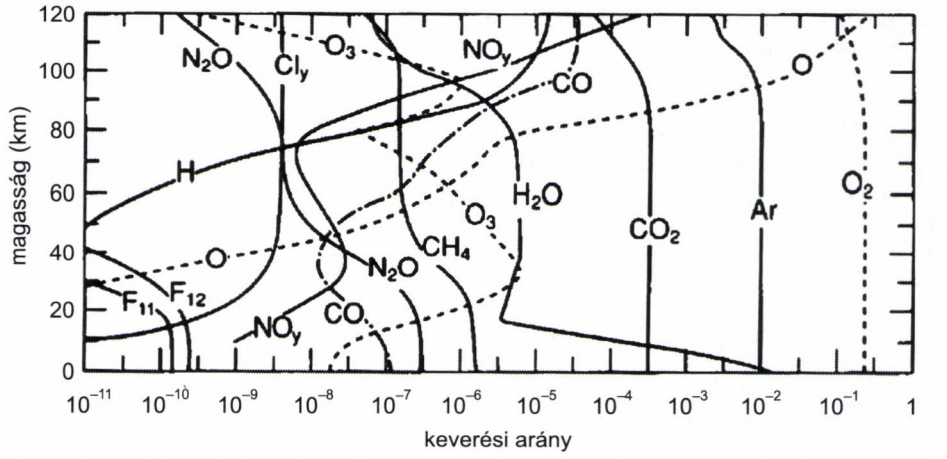
A földi élet minden területére hatással van a klíma globális változása, ezért elsőrendűen fontos, hogy a vele kapcsolatos megállapítások és intézkedések tudományosan korrektül megalapozottak legyenek. A klímakutatásban az egyes jellemzők mérési pontossága meglehetősen korlátozott, és nem mindig egyértelműen meghatározott (így a legfontosabb, a globális hőmérséklet sem, földfelületi, földközeli levegő, troposzféra közép stb.). Ezért nem meggyőző az, ha a legnagyobb felkészültségű kutatóhelyek eredményei között, azonos bemenő paraméterek esetén is, a változások prognosztizált adatai között talált változások mértéke többszöröse egyik a másikának. Valóban ez az elérhető legnagyobb pontosság, de nem ad alapot több, határozott tudományos megállapításra. Főleg nem szép, ha évtizedekre visszamenőleg még korrekciót is végeznek (pl. űrszonda-pályamódosulás stb.). Konkrétan tehát a szén-dioxid és a globális hőmérséklet-emelkedés szoros kapcsolatát (számtalanszor korrelációt említenek) és főleg a mértékét nem lehet tudományosan alátámasztani. A Föld termikus egyensúlya a napállandó által meghatározott, beeső energiamennyiségnek, a biológiai és vegyi folyamatok által le nem kötött részének a világűrbe való visszasugárzását megköveteli. A napállandóval a légkör határára egyensúlyi hőmérséklet számítható. A földi jellemzőkkel létrejött visszasugárzásból számított egyensúlyi hőmérsékletnek meg kell egyeznie a besugárzási egyensúlyi hőmérséklettel. A légkör gázösszetevőinek koncentrációváltozása a sugárzásokból abszorbeált energia mennyiségét változtatja, tehát a réteghőmérséklet-eloszlás változhat, az alsóbb rétegeknél kisebb hőmérséklet-növekedés léphet fel.

A sztratoszféra abszolút hőmérséklete mérésekkel igazoltan jelentősen csökken, bár magában a rétegben a magasság függvényében hőmérséklet-emelkedés jelentkezik.

A hőmérséklet-változások mértéke jelentős hibával határozható meg. Egyedül a szén-dioxid-koncentráció változása viszonylag pontosan mérhető a fizikai törvényeknek köszönhetően, az elméleti, a fizikai paraméterekre való globális hatása jól számítható. A légkör 100 km-es rétegére például az oxigén és a szén-dioxid keverési arányának állandó értéke, ezt a megállapítást alátámasztja a 6.4. ábra (Kämpfer 2011) .

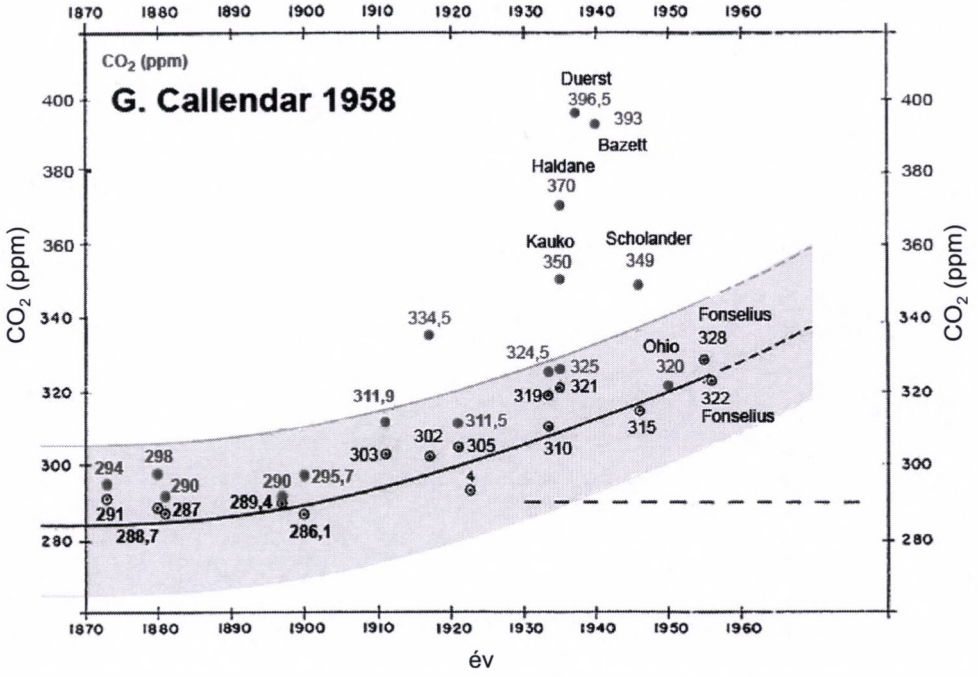


6.3. ábra. A légkör paramétereinek változása a magasság függvényében

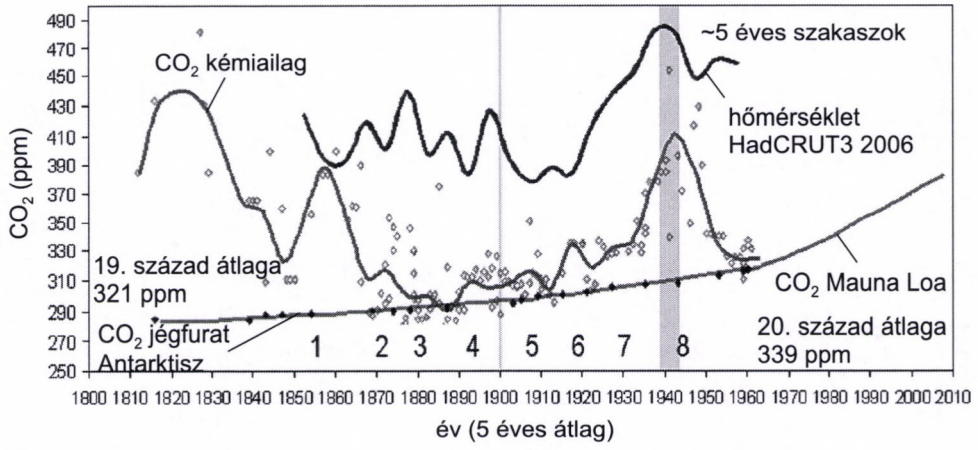


6.4. ábra. A légkör kémiai összetételének és keverési arányának változása a magasság függvényében (Kämpfer 2011)

A földi jellemzők mérési és számítási bizonytalansága igen nagy, mondhatjuk azért ezt még az említett legjobban használható szén-dioxidra is (Beck 2008).



6.5. ábra. A különböző mérőhelyek mérési eredményei

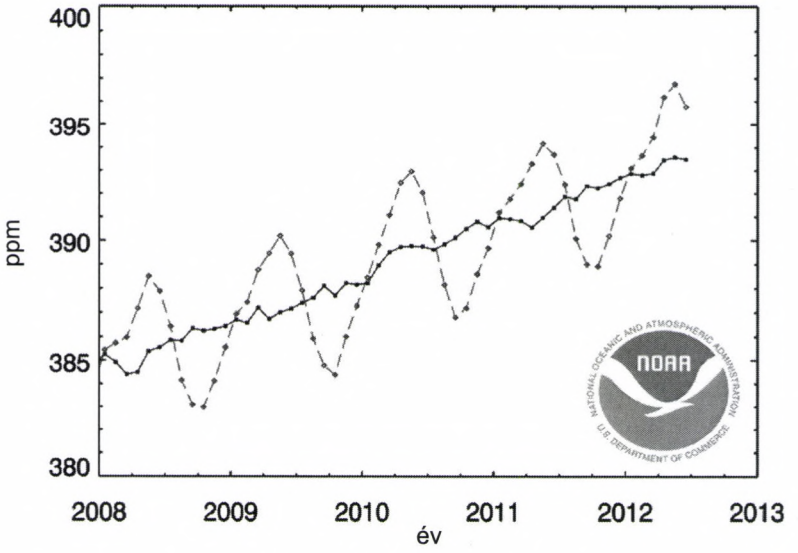


6.6. ábra. Az északi félteke CO_2-koncentráció változása 1812–1961 között, a történelmi mérések szerint, 138 éves átlagnak az éves középértékei alapján, a Keeling-féle görbe, az északi félteke hőmérséklete (CRU 2006), a CO_2-koncentráció az antarktiszi jégfuratokból Neftel 1984 alapján

Callendar 1958-ban a „Fuel Line" vonalát 30 történelmi méréssorból állapította meg (6.5. ábra). A szürke tartományban ±10% eltérés van a CO_2-értékek között. A világosabb pontok korrigáltak és figyelmen kívül hagyott CO_2-adatok.

A 6.6. ábra az IPPC-vel és a jégfuratok adataival ellentétben a CO_2-változás görbéjére jelentős ingadozásokat mutat. 1800 óta három maximum volt, 1825, 1857 és 1942 években. A XX. évszázad átlaga 321 ppm és összhangban a Mauna Loa 1958 óta adott adataival a XX. évszázad átlaga 339 ppm. Ebből számítva a 200 év alatti növekedés 5%, szemben a köztudatban más módon számított 30%-kal.

A 6.7. ábra a Mauna Loa által mért négy teljes év friss eredményeit mutatja. Az adatok, kiszárítottlevegő-mintában lévő CO_2-molekulák számának a teljes molekulaszámra (CO_2-vel) vonatkoztatott arányát jelentik (ppm-ben). A szaggatott vonal a havi átlagértéket jelenti a havi középértékre figyelemmel. A folyamatos vonal ugyanezt, a szezonális átlagos ciklus szerint korrigálva. A Mauna Loa északi szubtropikus régióban, 3400 m magasságban helyezkedik el, ezért lehetséges, hogy az értékek eltérhetnek a felszíni globális CO_2-értékektől.



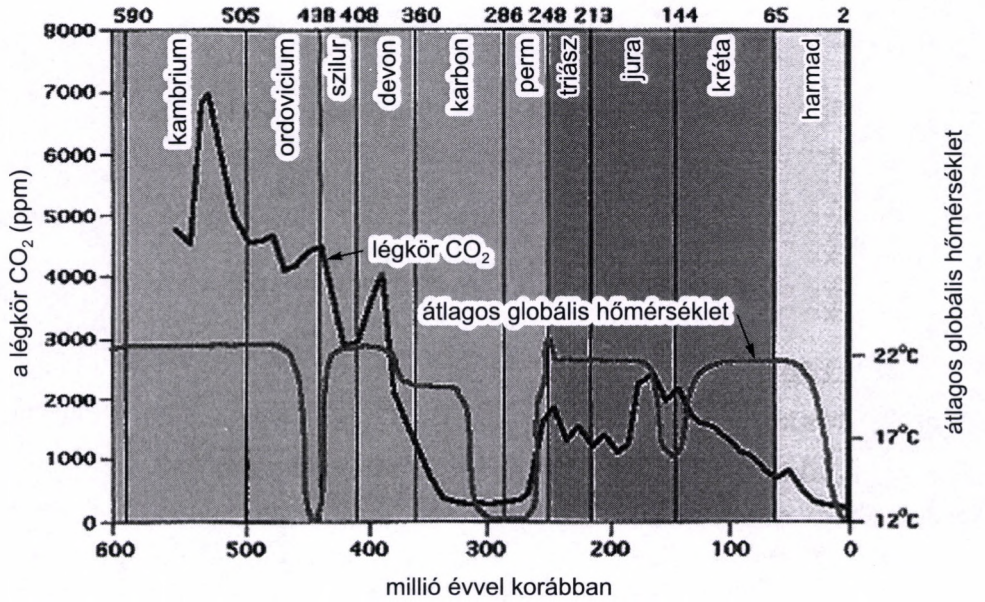
6.7. ábra. Mauna Loa mérései

A mozgalmak eddigi tevékenysége az eredménytelenségük mellett bizonyos szakmai és gazdasági torzulásokhoz vezettek.

Elsősorban az energetikánál jelentkeztek kedvezőtlen mellékhatások. Az energetikával szemben bizonyos ellenszenvet generált, de ez csak másodlagos probléma. Helytelen azonban, hogy az energiatakarékossággal összekötötték az ÜHG-csökkentést. Nemcsak a fosszilis energiahordozóból termelt energiával kell takarékoskodni, hanem mindegyik fajtával, a nukleárissal és a megújulóval is (az

utóbbi a legdrágább energia, ha sokszor azt mondják, ingyen van). Jelentős hatás, hogy a gazdasági értékelhetőséget is torzította mind az erőművek létesítése, mind a későbbi üzemeltetési költségek vonatkozásában. E tudományos véleménynyilvánítás célja, hogy a klímaváltozással kapcsolatos problémák tisztább megvilágításba kerüljenek. A tudományos megállapításokat nem konszenzussal, hanem érvekkel kell alátámasztani. A véleményemet, amennyire lehetséges, konkrét adatokkal szeretem alátámasztani. A sok adat közül néhányat kiválasztva a következő megállapítások tehetők (Scotese 2009):

A Föld igen szélsőséges éghajlati szakaszaiban a szén-dioxid és a hőmérséklet alakulása rendkívül változatos (6.8. ábra), és nehéz általános érvényű kapcsolatot találni.

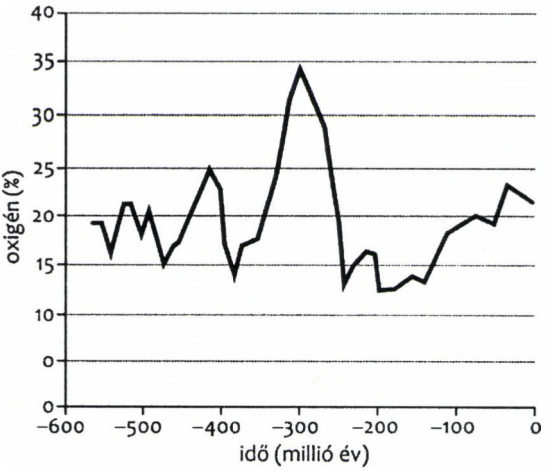


6.8. ábra. A légkör átlagos hőmérsékletének és CO_2-koncentrációjának változása az utóbbi 600 millió évben

6.4. Az oxigén és szén-dioxid kölcsönhatása a légkörben

Az oxigén a légkörben a Föld történelmében kb. 2,5 milliárd éve kezdett felszaporodni, amikor az organizmusok a klorofill segítségével a napsugárzás energiájának tárolására képessé váltak. A növények földbe süllyedésével kezdődő szénképződés és az olaj keletkezése során szintén oxigén szabadult fel. Ezzel ellentétben a hegyképződés és erózió során keletkező új kőzetek oxidációjával keletkező oxid ásványok oxigént vontak ki a légkörből.

A légköri oxigénkoncentráció az utóbbi 600 millió évben jelentősen változott (6.9. ábra). 300 millió éve (a karbon periódus végén) a légkörben az oxigénkoncentráció ~35% volt.



6.9. ábra. Az O_2-koncentráció változása az évmilliók során

255 millió évvel ezelőtt 30% volt, majd hirtelen 13%-ra esett vissza (Warwick 2009). Ezután 23%-os csúcsot elérve a jelenlegi 21% körül állandósult. A légköri oxigéntartalom kisebb változásait figyelve nem tekintik nagy, általános problémának ennek az alapvető légköri alkotónak az alakulását.

A lejátszódó kémiai folyamatokban a levegő-víz, levegő-talaj közötti kémiai és biológiai kapcsolatokban az oxigénnek alapvető szerepe van.

Az oxigénkoncentrációnak a földfelülettől mért magasság függvényében való változása a „barometrikus képlettel" számítható, amely azonban csak közelítő érték meghatározására szolgálhat.

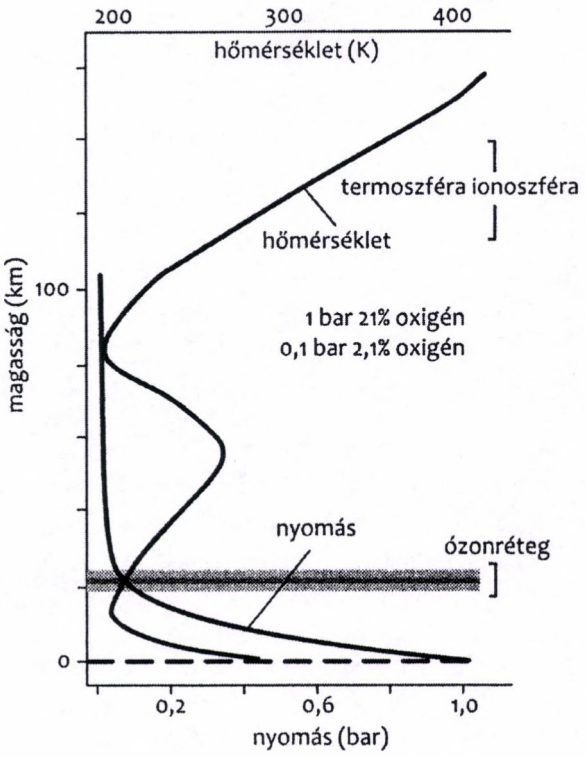
$$P = P_0 \, exp(-M \, g \, z/RT)$$

ahol

P_0 a légnyomás a tengerszinten (~ 1000 hPa)
M 1 mol levegő tömege (~0,029 kgmol^{-1})
g a gravitációs gyorsulás (9,8 ms^{-1})
z függőleges magasság (m)
R a gázállandó (8,314 JK^{-1}mol^{-1})
T – a hőmérséklet (K).

Az emberi fiziológiai folyamatban a 21% oxigénkoncentráció kb. <15%-ra csökken. Mészáros Ernő szerint „kimutatták, bár a fosszilis tüzelőanyagok fel-

használása a szén-dioxid légköri koncentrációját jelentősen növeli, az oxigén mennyiségét alig módosítja. Ez az oxigén hatalmas légköri tömegének köszönhető" (Mészáros 2010).



6.10. ábra. Az O_2-koncentráció és a hőmérséklet változása a magasság függvényében

Néhány vizsgálatban azt tapasztalták, hogy a légkör oxigénkoncentrációja jobban csökken, mint ahogy fosszilis tüzelés következtében a szén-dioxid-koncentráció növekedik. Az oxigén saját dinamikáját követi. A két gáz között a koncentrációkülönbség óriási, míg a 20,95%-os oxigén 209 460 ppm, addig a CO_2 kb. 380 ppm (az arány kb. 550-szeres). A műszeres szén-dioxid-mérések lényegesen hosszabb időszakra, több mint 50 évre néznek vissza, míg az oxigénmérések kb. két évtizedre. A fosszilis tüzelőanyagok tüzelésénél O_2:CO_2 cserearányt 1,4 mólaránnyal, míg a fotoszintézisnél 1,1 értékkel számolnak. Ezeket az értékeket gyakran hibásan (súlyos) használják, ezek csak a folyamatok alatt érvényesek, de a mérlegegyenleteknél természetesen az arány 1:1.

A légköri szén-dioxid- és oxigénkoncentráció-változás kapcsolatának vizsgálatakor a fizikai, kémiai, oldódási és biológiai folyamatokat kell számításba venni. A legfontosabb mérlegegyenletek:

A fosszilis anyagok tüzelésekor:

$$C + O_2 = CO_2$$

A fotoszintézis

$$6CO_2 + 12H_2O + E = C_6H_{12}O_6 + 6O_2 + 6H_2O$$

A tengerben egyik kémiai folyamat

$$(CH_2O) + O_2 = CO_2 + H_2O$$

A tengerben az oxigén és a szén-dioxid oldódásának jellege különböző.

A légköri koncentráció elemzésekor a ténylegesen keletkező vagy eltűnő vegyületek mennyisége a mértékadó. A folyamatok lefolyásához a ténylegesen keletkezett mennyiségek arányánál más arány, általában nagyobb érték szükséges. A kutatásoknál néha feltételezik, hogy a tüzeléshez 1,4 oxigéntöbbletet (légfelesleg-tényező), a fotoszintézisnél 1,1 oxigéntöbbletet használnak el. Ez súlyos tévedés, mert a tényleges oxigénfogyasztást a rekció-mérlegegyenletből kell számolni. A kutatásokban a mért és a felvett különbségeket értékelik, és következtetnek a természeti folyamatokra. Ezen az alapon felvett hipotézisek általában a tényezők szerepének kiválasztásában helyesek, csak a matematikai levezetések állandóinak értéke és értelmezése helytelen. Tüzeléskor például a szén égési reakciójában 1 molnyi O_2 felhasználásakor 1 molnyi CO_2 keletkezik, (azaz az O_2:CO_2=1 és nem 1,4).

Ésszerű elhanyagolásokkal példán bemutatva érthetővé válik, hogy a mérésekkel kapott légköri oxigéncsökkenés mértéke nagyobb, mint a szén-dioxid-növekedés. Az egyszerűség kedvéért a levegő három összetevője:

$$L = N_2 + O_2 + CO_2,$$

$$O_2 \text{ koncentráció} = O_2/L,$$

$$CO_2 \text{ koncentráció} = CO_2/L.$$

A közelítésnél a nitrogénmennyiséget állandónak véve (minden kutatás ezt teszi), az oxigénfogyás és a szén-dioxid-növekedés figyelembevételével a mérlegegyenletek a tüzelőanyag karbontartalmára:

$$L=N_2+(O_2-\Delta O_2)+(CO_2+\Delta CO_2),\ O_2=(O_2-\Delta O_2)/L;\ CO_2=(CO_2+\Delta CO_2)/L$$

$$|\Delta O_2| = |\Delta CO_2|$$

Ha a CO_2 mind a légkörben maradna, a CO_2 térfogati koncentrációnövekedése (ppm) megegyezne az O_2 koncentrációcsökkenésével. Az eddigi kutatások szerint a légkörbe kerülő CO_2 legalább felét ismert és nem ismert folyamatok elvonják. Mivel az oxigéncsökkenés mértéke nem változik, ellenben a CO_2-növekedésnek csak a fele jelentkezik, tehát a tényleges mérlegegyenlet:

$$L=N_2+(O_2-\Delta O_2)+(CO_2+1/2\Delta CO_2);\ O_2=(O_2-\Delta O_2)/L;\ CO_2=(CO_2+1/2\Delta CO_2)$$

A koncentrációk:

$$\left(\frac{O_2-\Delta O_2}{L}\right)_2=\left(\frac{O_2-\Delta O_2}{L}\right)_1;\ \left(\frac{CO_2+\frac{1}{2}\Delta CO_2}{L}\right)_2<\left(\frac{CO_2+\Delta CO_2}{L}\right).$$

Az oxigénmérés és a -kutatás folyamata, az O_2/N_2 mérési eljárás sok értékes eredményt szolgáltat. Az értékelésnél feltételezett tényezők, azaz tüzelés, biológiai tényezők (erdőirtás, földhasználat stb.), kőzetkémia helyesek, de az egyes tényezők szerepére vonatkozólag és az eredő meghatározásával kapcsolatos szemléletet lényegesen meg kell változtatni.

A nagy koncentrációban jelenlévő oxigén termodinamikailag reaktív közeg. Ez feltétele az élet fennmaradásának, az égésnek, az oxidációnak (rozsdásodás, korrózió), szerepe van a földfelületnek a veszélyes UV-sugárzástól való megvédésében.

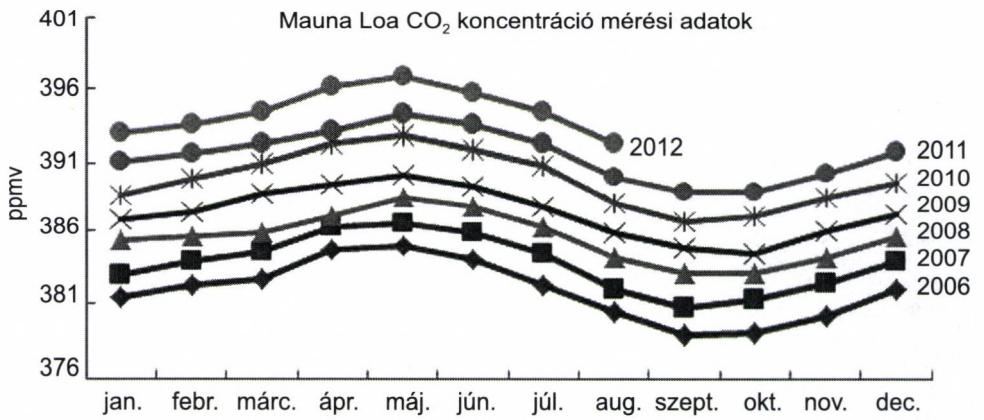
A légkörben az oxigén mérése bonyolult, mert a szén-dioxidhoz viszonyítva lényegesen nagyobb mennyiségben fordul elő. Ezért proxyt használnak a közvetlen mérés helyett. A mérési eszköz például tömegspektrométer (pl. Finnigan MAT-252, amely a korrekcióhoz 32 ($^{16}O^{16}O$) és 29 ($^{15}N^{14}N$) ionokat használ). A mérés módszere szerint a vizsgált mintában mért O_2/N_2 arányból egy referencia-összetételű gáz O_2/N_2 arányának kivonása után nyert különbséget a referenciaarányhoz viszonyítják és 10^6-nal való szorzás után „per meg" egységben kifejezve kapják az O_2/N_2 arány változását (Institute of Oceanography, La Jolla California, USA):

$$\delta(O_2/N_2)\ \text{per meg} = 10^6[(O_2/N_2)_{sam} - (O_2/N_2)_{ref}] / (O_2/N_2)]_{ref}$$

E különbség alkalmazásakor: kb. 4,77–4,8 „per meg" egyenértékü 1 ppm-mel. (1 mol O_2 per mol száraz levegő). Közelítésként a légkör nitrogénkoncentrációját állandónak veszik fel (bár a növények életfolyamatainál a nitrogén is szerepet játszik az oxigéntartalmú vegyületekben).

Egy japán kutatóintézet Sendaiban (északi szélesség 38°, keleti hosszúság 140°), a tengerszint felett 150 m-re helyezkedik el. A mintagyűjtést nyugati szélben végezték, légköri nyomáson. A nedvességet –78 °C-ra való lehűtéssel távolították el.

Referencialevegőként iparilag előkészített minta nem használható, mert a $d(O_2/N_2)$ értékek szignifikánsan alacsonyabb 2500–4500 per meg értékkel, mint a légköri értékek. Ezért például referenciaként előkészítésre a laboratórium épülete mellől természetes levegőmintát vettek, és 47 literes, nagynyomású palackban helyezték el, szárítás után $1{,}0–10^7$ Pa nyomáson, 4A molekuláris szűrőt használva. A palack mangán ötvözésű acélanyagból készült. A referencialevegő-választási módszer és a mérési módszer különlegesen körültekintő kutatással alakult ki. A mérések elsősorban szezonális váltakozást mutattak.



6.11. ábra. A szezonális CO_2-koncentrációváltozás jellegének összehasonlítása

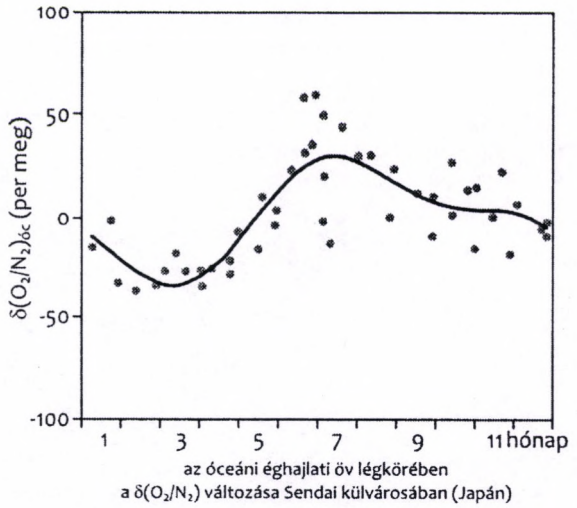
A $\delta(O_2/N_2)$ és a CO_2 változása szezonálisan és hosszabb távon is ellentétes. A tényleges okok és a mértékek meghatározásakor kell nagyon körültekintően eljárni. A változások jellege hasonló, de mértéke különböző és időeltolódások jelentkeznek.

A szén-dioxid-változás jelentősen függ a fosszilis tüzelőanyagok eltüzelt mennyiségétől és az erdőirtástól. A japán vizsgálatoknál a $\delta(O_2/N_2)$ átlagos éves változás –16,3 per meg/év, és a CO_2-koncentrációváltozás 1,9 ppmv/év. Az anyagmérleg Keeling szerint:

$$d\frac{CO_2}{dt} = 0{,}471x\left(f_{tűz} + f_{cement} + f_{föld} + f_{óceán}\right)$$

$$d\frac{\frac{O_2}{N_2}}{dt} = -4{,}8x0{,}471x\left(1{,}43f_{tűz} + 1{,}1f_{föld}\right)$$

ahol $f_{tűz}$, f_{cement}, $f_{föld}$, $f_{óceán}$, a légkörbe áramló karbonfluxus (GtC/év), a fosszilis tüzelésből, a cementgyártásból, a földi bioszférából és az óceánból. Az 1,43; 1,1; 0,471 és 4,8 együtthatók jelentik a CO_2-képződés által igényelt O_2-arányt (helytelen).



6.12. ábra. A szezonális oxigén-nitrogén arány változása

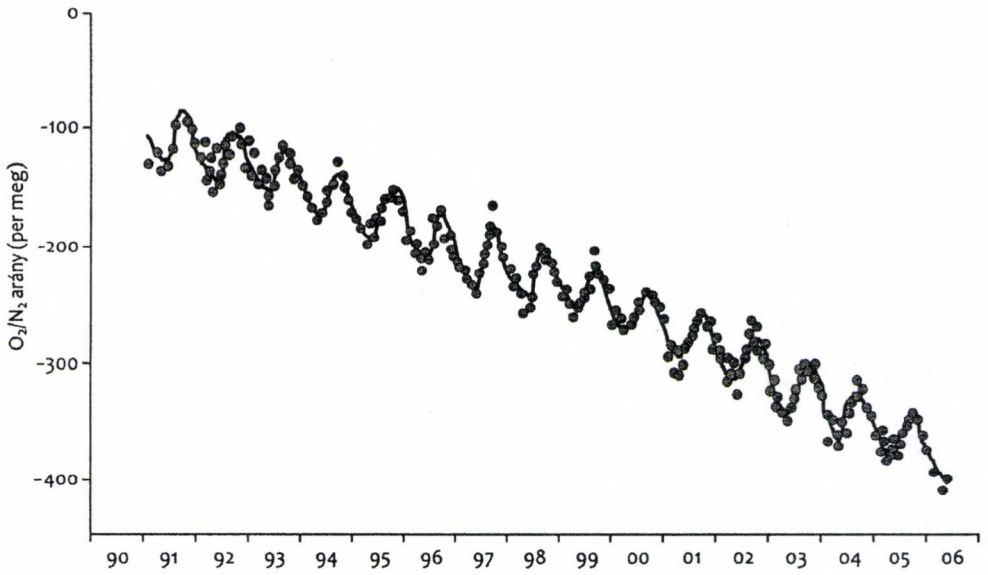
A mérések szerint szezonális ciklusok harmonikus ciklusokban követik egymást, amilyent az északi féltekén végzett mérések hasonlóan mutattak. A $\delta(O_2/N_2)$ minimumot mutat késő március–kora április táján, és maximumot késő július–kora augusztusban. A csúcsok között a $\delta(O_2/N_2)$ amplitúdó kb. 150 per meg, a CO_2-nél kb. 15 ppmv. Az északi féltekén ezt a földi bioszféra és a légköri CO_2 között lejátszódó fotoszintézissel és légzéssel magyarázzák. A $\delta(O_2/N_2)$ és a CO_2 aránya a tengerközelben –8,3, míg a déli féltekén –5,3, ezt az óceánhatás különbözőségével magyarázzák. Keeling és mtsai szerint a $\delta(O_2/N_2)$ óceán komponense:

$$\delta(O_2/N_2)oc = \delta(O_2/N_2) + (1{,}1/0{,}2095)[\,CO_2],$$

ahol 1,1 az O_2/CO_2 cserearány a földi bioszféra-folyamatban, a 0,2095 a légkörben az O_2 molarány, $[CO_2]$ a mért szén-dioxid-koncentráció.

A Cape Grim Tasmania (Ausztrália) által gyűjtött adatok szintén szezonális függést mutattak a CO_2 és O_2 koncentrációváltozásnál. Egyik tényező az óceánban a természetes szállítás az északi féltekéről dél felé (thermohaline circulation), a másik természetes tényező biológiai, a fotoszintézis során játszik szerepet. Az 1991–2001 évtizedben elhelyezkedő 7 éves periódusban az O_2/N_2 arány kb. 100 meg-gel csökkent (1 ppm O_2 = 4,77meg).

A University of California Irvine-ben végzett kutatásai szerint a légköri oxigénkoncentráció csökkenésének oka lehet, ha a földi bioszférában lévő karbon erősebben oxidálhatóvá válik a természeti ökorendszer zavarai miatt (több oxigént von el).



6.13. ábra. A légköri O_2/N_2 arány változása Mauna Loa térségében végzett mintagyűjtéssel

A légkör O_2-változása kifejezhető a légkörből az ökorendszerbe áramló nettó karbonfluxus (F_{net}) és a nettó O_2:CO_2 cserearány (R_{net}):

$$dO_2/dt = - R_{net} F_{net}$$

A pozitív jel a légkör felé, a negatív a földi bioszféra felé az áramlást jelöli.

$$dO_2/dt = - (R_{ab} F_{ab} + R_{ba} F_{ba})$$

ahol

F_{ab} a légkörből a bioszférába áramló karbonfluxus (a nettó primer termék NPP),
R_{ab} NPP oxidációhoz szükséges arány (CO_2 molekulánként szükséges O_2),
F_{ba} a bioszférából a légkörbe visszatérő fluxus (légzés, tüzek és egyéb veszteségek),
R_{ba} a visszaáramló fluxus oxidációs aránya (CO_2 molekulánként szükséges O_2 mol mennyiség).

A fluxusarány fogalmának használatakor nagyon kell figyelni arra, hogy a mol/mol vagy tömegfluxusarány kg/kg szerepel-e. A reakcióra magára vagy a teljes folyamatra vonatkoztatva jelentős lehet az eltérés (légfelesleg-tüzelésnél).

Az ökorendszer dinamikus egyensúlyban van, az F_{ab} és F_{ba} nagysága hasonló. Randerson hipotézise szerint a természeti zavarok szintjének a növekedése az utóbbi évtizedben az R_{ab} csökkenéséhez vezet. Ebbe beleértendő az erdőirtás fokozó-

dása, a legeltetés, a tüzelés, a fák pusztulása, a növényfajták váltása stb. Ez mind a növények és a föld szerves anyagaiban az oxigéntartalmú elemek növekedését jelenti és csökkenti a légkör oxigéntartalmát.

A földhasználat változása és a nitrogénoxidáció növekedése hosszú távon az atmoszféra oxigéntartalmának csökkenését okozza.

Az újabb mérőállomások között említhető az Északi-tengeren lévő F3 olaj-gáz fúrótorony, 200 km-re a holland partoktól. Folyamatosan méri CO_2 és O_2 tartalmat, a legkorszerűbb üzemanyagcellát, infravörös technológiát és egyéb precíziós műszereket használva. A méréseknél a nitrogénkoncentrációt állandónak veszik. A mérések feldolgozásával újabb eredmények ismerhetők meg, és bár a tendenciák hasonlóak, a számszerű adatok eltérőek, továbbá az összehasonlítások is jelzik, hogy további kutatások elengedhetetlenek. A légköri CO_2 és az O_2 koncentrációváltozás:

$$\Delta CO_2 = F - O - B$$

$$\Delta O_2 = \alpha_F F + \alpha_B B + Z$$

ahol

ΔCO_2 a légkör átlagos CO_2-koncentrációváltozása,

ΔO_2 az oxigén átlagos koncentrációváltozása,

F a fosszilis tüzelőanyag-égetésből és cementgyártásból származó szén-dioxid,

O az óceán CO_2 csökkenés,

B a biológiai CO_2 csökkenés (biomassza-égetés, földhasználat),

α_F *és* α_B az O_2:CO_2 cserearány a fosszilis tüzelési és biofolyamatokra,

Z az óceán és a légkör közötti nettó O_2 cserearány.

A legnagyobb O_2-csökkenést a berni egyetemen, a svájci kutatócsoport, Francesco Valentino vezetésével figyelt meg. Az adatokat Svájcban és Franciaországban gyűjtötték. A Jungfraujoch (JFJ) állomás Svájcban, a Svájci-Alpok északi oldalán, a tengerszint felett 3580 m-en, a Puy de Dôme állomás 1480 m-en, az Alpok nyugati oldalán helyezkedett el. A kutatócsoport a légkörben emelkedő CO_2-trendet és csökkenő O_2-trendet állapított meg. A JFJ mérései szerint a ΔCO_2-növekedés 1,08 ppm/év 2001–2002 között és 2,41 ppm/év 2003–2006 között. A $\Delta(O_2/N_2)$ –2,4 ppm/év és –1,5 ppm/év, illetve –9,5 ppm/év és –6,9 ppm/év között csökkent.

A Puy de Dôme esetén a ΔCO_2-növekedés 2,43 ppm/év 2001–2002 között; 1,07 ppm/év 2003–2004 között és 2,4 ppm/év 2005–2006 években. A $\Delta(O_2/N_2)$ –6,1 ppm/év és –3,7 ppm/év a 2001–2002 között; –10,4 ppm/év és –7,6 ppm/év 2002–2006 között.

Átlagosan O_2:CO_2 arányra $-1{,}9 \pm 0{,}7$ a JFJ-nél és $-1{,}8 \pm 0{,}5$ a Puy de Dôme-nál, ami lényegesen különbözik a biológiai 1,1 és a tüzelés 1,4 várt arányától. A kutatók először az óceán áramlásánál lévő hűlési viszonyokra gondoltak, de ilyen mértékű különbség nem lehet reális. Az okokat mégis az óceánoknál keresik.

Az európai partok közelében is 2000–2005 között két állomáson végeztek kutatásokat. Az írországi Mace Head, 35 m-en a tengerszint felett, mely viszonylag mentes fosszilis tüzeléstől, és Lutjewad, Hollandia északi partján, 30 km-re északnyugatra Groningen városától. Hasonló trendeket tapasztaltak. Lutjewad esetén a CO_2-növekedés 1,7± 0,2 ppm/év, az oxigéncsökkenés –4,2±0,3 ppm/év; Mace Headnél CO_2 1,7± 0,2, oxigén –4,2+ 0,3 ppm/év.

Minden mérés azt mutatja, hogy az oxigéncsökkenés gyorsabb, mint a CO_2 növekedése. A különböző időperiódusokban a változások mértéke különböző is lehet. Nem lehet az okokat magyarázni a fosszilis tüzelőanyagok használatával, vagy az oxigéncsökkenést a hideg tengervízzel. Az erdőségek és fitoplanktonok fontos szerepe a földi oxigénellátásában és a vizsgálatok elemzései azt mutatják, hogy a klímapolitikában sürgősen a valóságos hatásokat figyelembe véve kell az intézkedéseket kialakítani. A szén-dioxid csökkentése önmagában nem hoz eredményt, mert hatása kismértékű, így erre alapozni veszélyes. Az összes kutatási eredmény feldolgozásában a cserearányok gyakran hibásak, ezért az eredmények is kissé módosításra szorulnak.

A légköri oxigén- és szén-dioxid-koncentráció közvetlen kapcsolatának felvetésével adódó problémákat, Ralph Keelingnek, az O_2/CO_2 fluxusarányt felhasználó, energetikai szempontból tévedésre lehetőséget adó értékelési módszere okozta. A következőkben a valóságos helyzet tisztázását végezzük el.

Az 1990-es évek óta egyre több kutatás foglalkozik a teljes földi rendszerben oxigént és szén-dioxidot is tartalmazó folyamatoknak a légkör vegyi összetételére való hatásával. A legfontosabb folyamatok: a fotoszintézis, a talaj légzése, a fosszilis tüzelőanyagok égése, tüzelése, az óceánok CO_2-felvétele és az óceánokban folyó, fotoszintézissel járó légzés. Korábbiakban az oxigénbőség miatt nem fordítottak a témára nagy figyelmet. Az O_2/CO_2 arány mérése is problémás, mert a két gáz koncentrációja között nagyon nagy a különbség, ezért általában az O_2/N_2 és a CO_2 arány mérését alkalmazzák. A korábbi cikkek (Keeling, R. F. 2006; Ishydoya, S. et al 2003; Mae-Wan Ho 2009) a különböző folyamatoknál az O_2/CO_2 fluxusarányt vették elsősorban figyelembe, ami azonban nem ad választ a két gáz tényleges koncentrációváltozására. A tüzelőanyagok energetikai hasznosításánál, tehát az emberi tevékenységnél a cél a hőfejlesztés, amikor az adott tüzelőanyag összetételének figyelembevétele (az energiafejlesztési reakció) alapvetően fontos a ténylegesen felhasznált oxigénmennyiség megismerése szempontjából. Erre az O_2/MJ jellemző alkalmas. Oxigénfelvétel szempontjából egy nagy fluxusú folyamat energiaszempontú oxigénigénye kedvezőbb lehet egy kis fluxusúnál. A Keeling-cikk fluxustáblázata:

Folyamat	Az O_2 fluxus és a CO_2 fluxus aránya
Fotoszintézis és a talajlégzés	
$CO_2 + H_2O \leftrightarrow CH_2O + O_2$	1,05[a]
Fosszilistüzelőanyag-égés	
$CH_y + (1 + y/4) = y/2H_2O + CO_2$	1,42[b]

Az óceánok többletfelvétele

$H_2O + CO_2 + CO_3^{=} \rightarrow 2HCO_3^{-}$ 0

Az óceáni fotoszintézis és légzés

$106CO_2 + 16NO_3^{-} + H_2PO_4^{-} + 17H^{+}$

$\leftrightarrow C_{106}H_{263}O_{110}N_{16}P + 138O_2$ 2–8 [c]

a) A fluxusarány átlaga, amennyiben a földi szerves anyag némileg több szénhidrátot redukál, ha a talajban az O_2/CO_2 arány nagyobb, mint 1 (Keeling, 1988).

b) Az 1991 évre várt tüzelőanyag-felhasználás alapján várt fluxusarány átlagértéke (Merland és Boden, 1991), felhasználva a különböző tüzelőanyagokra számítható O_2/CO_2 arányokat (Keeling, 1988).

c) A tengervízben az óceáni fotoszintézis által keletkezett többlet O_2 és a tengervízből eltávolított CO_2 aránya közelítőleg 1,3 : 1. Az értéket a tenger szerves anyagának összetétele határozza meg (Redfield et al. 1963). A levegő és a tenger közötti kapcsolat relatív fluxusa függ a gázcserefolyamat hatásosságától, és erősen az időléptéktől (Keeling és Severinghaus, 1993).

A tüzelőanyagok energetikai értékeléséhez fel kell írni a mérlegegyenleteket, és meg kell határozni számszerűen a reakciófolyamatokban részt vevő komponenseket, továbbá az energetikai jellemzőket.

A számításokhoz figyelembe vett alapértékek:

C 32,808 MJ/kg

H 121,0 MJ/kg

CO 10,11 MJ/kg

Tüzelőanyagok és a reakciók	Hidrogén és karbon aránya H/C	Oxigénfluxus és szén-dioxid-fluxus aránya arány O_2/CO_2	Fejlesztett MJ/mól hő
$2H_2 + O_2 = 2H_2O$	–	–	242
$C + O_2 = CO_2$	0	1,0	394
$CH_4 + 2O_2 = 2H_2O + CO_2$	4	2,0	878
$C_3H_8 + 5O_2 = 4H_2O + 3CO_2$	2,7	1,7	2149
$C_4H_{10} + 6{,}5O_2 = 5H_2O + 4CO_2$	2,5	1,6	2785
$C_2H_4 + 3O_2 = 2H_2O + 2CO_2$	2	1,5	1271
Antracit C 86%, H 3,7%	0,25	1,25	
Lignit C 19,7% H 1,7% O 8,5%	0,26	1,0	

Biológiai anyagok			
$C_6H_{12}O_6 + 6O_2 = 6H_2O + 6CO_2$ (glükóz)	2	1,0	3814
$C_2H_6O + 3O_2 = 3H_2O + 2CO_2$ (etanol)	3	1,5	1513
$CH_4O + 1{,}5O_2 = 2H_2O + CO_2$ (metanol)	4	1,5	878
Kérges fa C 47% H 6% O 43%	0,77	1,4	

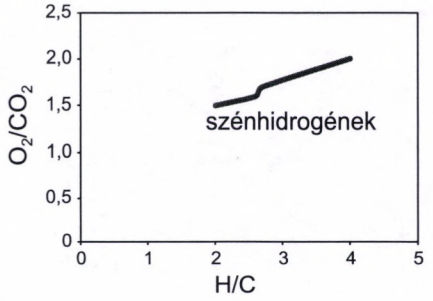
Az oxigén/szén-dioxid fluxus aránya alapján viszonylagosan a legnagyobb oxigénfogyasztónak a metán (földgáz) mutatkozik 2 aránnyal. Valószínűleg a táblázatban lévő folyamatok alapján számolta Keeling a fosszilis tüzelőanyagok égésére az 1,42 arány értéket (ez nem légfelesleg). A fosszilis tüzelőanyagok használatának, a légköri oxigénmennyiségre való hatásának értékeléséhez a folyamatfluxusok ismerete nem elégséges, még a különböző tüzelőanyagfajtákból összeállított energiamérleg összetételének ismeretében sem. Az energetika feladata a tüzeléssel hő előállítása. Az összes oxigénfelhasználás meghatározásához az adott energiahordozó egységnyi tömegének elégetéséhez szükséges, fajlagos oxigéntömeg ismerete szükséges. A reakciófolyamatok ismeretében ezek a paraméterek számíthatók.

Fosszilis tüzelőanyag	Fűtőérték MJ/kg	Fajlagos oxigénigény $10^6.O_2$ mól/MJ
H_2	121	2066
C	32,808	2538
CH_4	54,9	2279
C_3H_8	48,8	2326
C_4H_{10}	48,0	2334
C_2H_4	45,4	2360
Antracit C 86%, H 3,7%	35,3	2540
Lignit C 19,7%, H 1,7%, O 8,5	8,52	1813
Biológiai anyagok		
$C_6H_{12}O_6$ (glükóz)	21,2	1573
CH_4O (metanol)	27,4	1710
C_2H_6O (etanol)	32,9	1980
Kérges fa C 47%, H 6%, O43% (Nedvesség és hamumentes)	18,1	1492

A táblázatokban található értékek elemzése alapján fel kell hívni a figyelmet arra, hogy nagyon fontos előre rögzíteni az elemzés célját. Egyik fontos cél lehet a tüzelőanyagoknak az energetikai hasznosításuk során a légköri oxigénkoncentrációra gyakorolt hatása alapján történő rangsorolása. A következő elemzés ezen célkitűzés alapján történik.

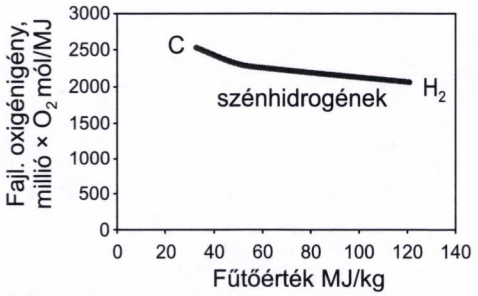
Megállapítások:

1. A tüzelőanyagok H/C arányának növekedésével az O_2/CO_2 fluxusarány is növekedik, ami természetes, mert a hidrogénégéshez is oxigén szükséges. Ezt véve figyelembe az oxigénfluxus szempontjából a metántüzelés (földgáz) kedvezőtlen, és a folyamatban az oxigén/szén-dioxid arány értéke magas. Még jobban növeli az arányt az a tény, hogy a kibocsátott szén-dioxid legalább 50%-át a természet maga is elnyeli, csökkentve a légkörben várt szén-dioxid-koncentráció növekedését.



6.14. ábra. A H/C és az O_2/CO_2 fluxusarány kapcsolata

2. A metántüzeléssel kapcsolatban, energetikai szemléletben, az előbbivel ellentétes vélemény alakult ki. A tüzelőanyagok felhasználásának energetikai célja: a hőfejlesztés. Ebből a szempontból értékelve a tüzelőanyagokat az egységnyi hőmennyiség fejlesztéséhez szükséges oxigéntömeg a mértékadó paraméter. E szempont szerint vizsgálva az adatokat az látszik, hogy a H/C érték növekedésével csökken az egységnyi hőmennyiség fejlesztéséhez felhasználásra kerülő oxigén mennyisége. A földgáz egyéb hasznossága mellett a szénhidrogének között viszont a legkedvezőbb értékkel rendelkezik.



6.15. ábra. A C, a szénhidrogének és a H_2-égés fajlagos oxigénigénye

3. A szilárd fosszilis tüzelőanyagok között a szénülés növekedésével növekszik a fajlagos oxigénszükséglet. Feltűnő a lignit alacsony értéke. A lignitet ne-

vezhetjük átmenetnek a bio-tüzelőanyagok és a szén között, mert a fajlagosan magas hidrogéntartalom mellett jelentős az oxigéntartalma is (a fásszerkezet is jelentős).

4. Külön csoportot képeznek a biológiai rendszerhez kapcsolható tüzelőanyagok. A tüzelőanyagok maguk is tartalmaznak oxigént, aminek jelentős részét az égés során felhasználják. A természet a saját rendszerének optimalizálására törekszik. A bio-tüzelőanyagok tehát mind a szén-dioxid-, mind az oxigéngazdálkodás szempontjából a legkedvezőbbek. Sajnos egyéb szempontból az energetikai hasznosításuk kedvezőtlen.
5. A hidrogéntüzelés fajlagos oxigénfelhasználásban megelőzi a szénhidrogéneket, de kedvezőtlenebb a bio-tüzelőanyagoknál.

Az oxigén egy része ózon (O_3) formában van jelen a légkörben. A földi élet fennmaradása szempontjából alapvető szerepe van. Az ózon létezése és a vele kapcsolatos folyamatok kutatása gyakorlatilag a tudomány külön területe.

A molekuláris oxigén fotodisszociációval atomos oxigénné alakul:

$$O_2 + h\nu \rightarrow O + O$$

Az atomos oxigén a molekuláris oxigénnel kölcsönhatásba lépve ózonná alakulhat:

$$O + O_2 + M \rightarrow O_3 + M$$

Az atomos oxigén és ózon rekombinációjával molekuláris oxigén keletkezik.

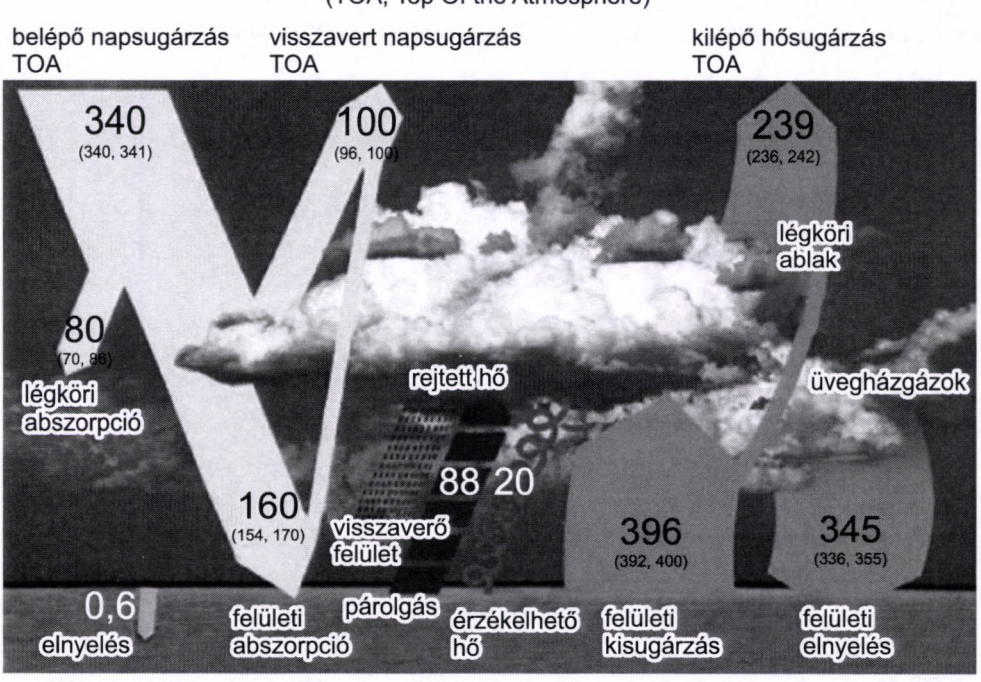
$$O + O_3 \rightarrow 2O_2$$

A Föld feletti ózonpajzsot nagyon alapos megfigyelés alatt tartják.

6.5. A CO_2 szerepe a földi energia-háztartásban

A Nap–Föld rendszerben a Nap az energiaforrás, a Föld az energianyelő, ami időnként túlcsordul, majd utána kisebb szabad hellyel rendelkezik. Az idők során a rendszer dinamikus egyensúlyba került, amelyet azonban lassú változások jellemeznek. A két fő elem külön-külön is változik. A Nap változása igen lassú folyamat, amelyet azonban időnként jelentős napkitörések tarkítanak. A vizsgált intervallumban a kitörések szerepe jelentős, de az életfolyamatának a változása nem játszik szerepet.

A Föld egyensúlyi állapotának változásai rendkívül összetettek. A víz és szárazföld arányváltozások, a légkör összetételének változása, a szárazföldi vegetáció mennyiségi és minőségi változása, az ember okozta változások stb.



6.16. ábra. IPCC előzetes globális energiamérleg az 5. kiadáshoz (Zágoni 2012). A Wm^{-2}-ben mért energiaáramok igen nagy számát a saját valószínűségi tartományán belül korrigálva határozták meg az energiamérleget. A zárójelben lévő számok a megfigyelés korlátaival összhangban lévő korrigálás alapján meghatározott értékeket jelentik.

A Föld termikus egyensúlyának vizsgálatakor energetikai, hőtani, kémiai és biológiai folyamatokat kell figyelembe venni. Vigyázni kell a különböző mérleg-egyenletek és egyensúlyi egyenletek helyes alkalmazásával, és különösen az értékelésével. Például energetikailag, ha az energetikai tagokat a sugárzásokból számítjuk, akkor az összes sugárzásnál mindegy, hogy a sugárzás visszatükröződés vagy testsugárzás, míg például hőmérsékleti viszonyokat vizsgálva koránt sincs így. Az energetikai egyensúly vizsgálatakor extenzív mennyiségek szerepelnek, míg intenzív mennyiségekkel (hőmérséklet) is lehet egyensúlyt vizsgálni, mert a Földnek a világűrrel való hőcserefolyamata csak sugárzásos hőcsere lehet.

A fajlagos extenzív mennyiségek is viselkedhetnek intenzívként (pl. energiaáram-sűrűség, napenergia-sugárzás stb.).

A légköri rendszerhez kapcsolhatóan extenzív mennyiségek a levegő tömege, összetétele, térfogata, a víztömeg, ásványtömeg, biológiai tömegek stb. Extenzív jellemzők az anyagokban lévő fizikai-kémiai energiamennyiségek, a felületi jellemzők.

Az intenzívek között a legfontosabb a hőmérséklet, továbbá a nyomásviszonyok, a fajlagos extenzív mennyiségek, vagyis az állapotjelzők, például az anyagok sűrűsége, az anyag- és a hőáramok fajlagos értékei.

Az energetikai mérlegegyenleteknél általában extenzív mennyiségek szerepelnek, míg az egyensúlyi folyamatoknál és állapotoknál intenzívek is.

A rendszerben lejátszódó folyamatok:

- periodikus folyamatok, vagy a földtörténet során nagy idősávú folyamatok (pl. Milankovich-ciklus).
- sztochasztikus a legtöbb folyamat, pl. felhőborítottság, szél, napkitörések, vulkánok stb.
- bizonyos időtávon monoton folyamatok, pl. szén-dioxid-növekedés stb.

A felhőzet alakja, mérete, minősége térben és időben is sztochasztikusan változik

A Nap–Föld rendszernél a termodinamika mind a négy főtétele szerepet játszik.

A *nulladik főtétel*nek az egyensúlyra való értelmezését a légkör határára számított egyensúlyi hőmérséklet használatakor kell alkalmazni.

Az *első főtétel*t a Napról a Földre érkező és távozó energia megmaradásánál kell figyelembe venni. Ez a különböző anyagi tömegek energiaveszteségének pótlására, biológiai és vegyi folyamatok energiaigényének fedezésére szolgál. A nulladik főtétel egyensúlyi követelménye az utóbbi folyamatok miatt nem használható a statikus egyensúly megállapítására, de az egyensúlynak a rejtett hőigények miatti megbomlása után megindul annak helyreállítása.

A *második főtétel*lel az egyensúly folyamatának leírását lehet megtenni. A rendszer a kisebb valószínűségi állapotból a nagyobb felé mozdul el. Ennek során az entrópia, az extenzív jellemző növekszik ($ds > 0$).

A *harmadik főtétel* a világűr közel abszolút 0 K hőmérsékletének szerepét veszi figyelembe.

A Föld energetikai mérlegegyenletei rendkívül összetettek. Az egyes tagok nagyon különböző jellege miatt nagyon vitatottak, és pontosságuk nem mindig kielégítő. A folyamatos változtatás miatt megbízhatóságuk megkérdőjelezhető (egyes szakértők szerint finomodnak). A valóságban sok a tapasztalati érték és a becslés. A sztochasztikus folyamatoknál mindig valamilyen hibával kell számolni, amit a használatukkor figyelembe kell venni.

Az energetikai mérlegegyenletet a Föld termikus egyensúlyának tárgyalására csak számos megjegyzéssel lehet használni. A Nap és a Föld között (a világűr) hőcserefolyamat játszódik. Magát a folyamatot egy extenzív (S) és egy intenzív (T) mennyiség jellemzi. A részfolyamatokra a két-két jellemző szorzatai adják az energiaegyenlet elemeit. A Földön azonban vegyi, biológiai és fizikai (pl. olvadás) folyamatokhoz szükséges energia is felhalmozódik, ezért időnként a kisugárzás kisebb, mint a Napból érkező energia, amit a „napállandó" jellemez. Ez önmagában hosszabb távon nem feltétlen okozza a légtömeg hőmérsékletváltozását.

A Nap és a Föld hőcserefolyamatában nem mindegy, mire használja a nyelő a kapott hőt. A rejtett hő nélküli visszatükrözött és a kisugárzott hő összege megegyezik a beesővel. Ekkor statikus egyensúlyról beszélhetünk, és a napállandóból, valamint az összes sugárzással számolt egyensúlyi hőmérsékletek megegyeznek.

Az egyensúly definiálásával akkor van probléma, amikor a teljes hőcserefolyamatban vegyi, biológiai és például olvadási hő is szerepel.

A világűrben a hőcserefolyamatok csak sugárzással történhetnek. A Nap sugárzása, amely a Föld légkörét eléri, változik (a változás mértéke jelenleg élénk vita tárgya), de az egyensúlyszámításoknál egy adott értéket (mért) fel kell venni.

A jégre érő sugárzásnál a beeső sugárzás egy része a jég olvasztására fordítódik, a másik része a hőmérsékletnek megfelelően visszasugárzódik (visszaverődik és sugárzódik) a világűrbe. A visszasugárzást a jég hőmérséklete – határesetben megegyezik az olvadási hőmérséklettel (273 K) – és a tükröződés határozza meg. Olvadás akkor jöhet létre, ha a beeső sugárzás legalábbis meghaladja az olvadáshőt, és így a helyi egyensúlyi hőmérséklet legalább 273 K. Az energiamérlegben nincsen egyensúly, mert a visszasugárzás a beeső sugárzásnál az olvadási hővel kisebb. A példából jól érzékelhető az extenzív és intenzív mennyiségnek a szerepe.

6.6. A CO_2 és a globális hőmérséklet közötti kapcsolat

A klímaváltozással kapcsolatos lavinát elsősorban a Nobel-díjas tudós (elektrolitok vezetőképességének felismeréséért kapta), Arrhenius 1896-os aktív kutatásának eredményei indították el. Természetesen elemzések már jóval korábban kezdődtek (pl. 1634-ben William Wood, New England's Prospect), de előtte igazán jelentősek Fourier munkái voltak. Fourier szemlélete szerint: „...a földi hőmérséklet Fourier-elméletének elemei, tehát a Föld mint egy hűlő test, a Nap mint periodikus hőforrás és a légkör mint átlátszó közvetítő" (Fleming, 1998) .

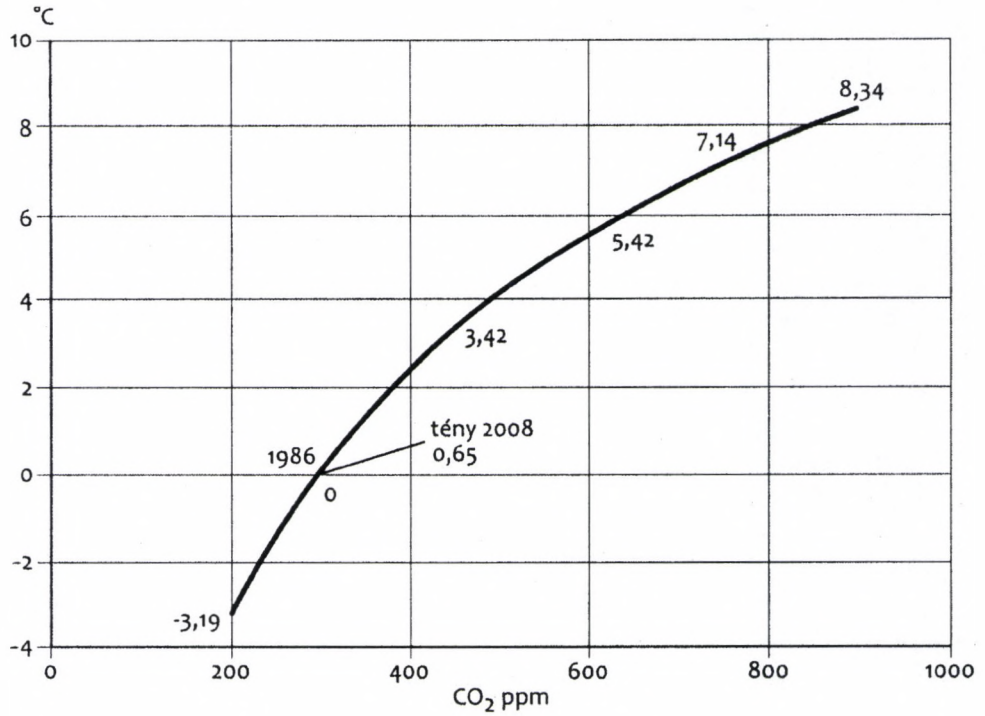
Fourier munkásságára hatással volt Newton hűléselmélete. Newton hűléselméletének értelmezése a következő: egy közepes vákuumban, szigetelt forró anyag a vákuumkamra hideg falával való hőcserében hőt veszít. A hőszállítás elektromágneses sugárzással történik.

Két, egyébként azonos, egyenlő hőmérsékletű objektum, ha egyik fekete, a másik fényes, különböző módon abszorbeálja és emittálja a sugárzást. A fekete a reá eső sugárzás többségét abszorbeálja, a fényes a sugárzás többségét visszaveri. A feketének több sugárzást kell emittálni, mint a fényesnek. Ha nem tesz így, akkor felmelegszik, míg a fényes lehűlne. A földön a fehér hó a nap folyamán a napsugárzást visszaveri, és a felmelegedéstől védi a földet. Éjszaka a hó sokkal kevésbé sugároz, mint a sötét föld, és a hűlést lassítja. Fourier-t megérintette a hőnek newtoni elmélete: „A hőáthatolás alapelve mint a gravitáció, minden tárgyra és a tér mindenségére érvényes, és egyszerű és állandó törvény" (Uo.).

Arrheniusnak a klímakutatás területén való színre lépésével azonban új korszak kezdődött. Természetesen, a téma jellegénél fogva a különböző paraméterek hatásáról komoly viták voltak, de folynak ma is. „A klímaváltozással kapcsolatos véleményekben korábban sem volt konszenzus, és sokan gondolták, az éghajlat esetleg hűvösebbé válik" (Uo.).

Arrhenius munkásságában a korábbi elméleteket és rendelkezésre álló klímaadatokat is figyelembe véve elsősorban Fourierhez fordult vissza. Arrhenius az 1924-ben publikált memoárjaiban másolatban idézte Fourier 1827-es cikkét, ahogy másokat is, akiknél az üvegházhatás említése megtalálható. A naplójában így kiáltott fel: „Mindennap kísérletezek; a téma teljes mértékben a kezemben van" (Fleming, 1998).

Arrheniust számosan az üvegházhatás és a globális fölmelegedés elméletének atyjaként dicsérik. Ugyanakkor Arrhenius munkáiról 1896 óta éles vita folyik. Munkásságának vitatott elemei: az általa használt abszorpciós tényező és a földfelület minőségének értéke.



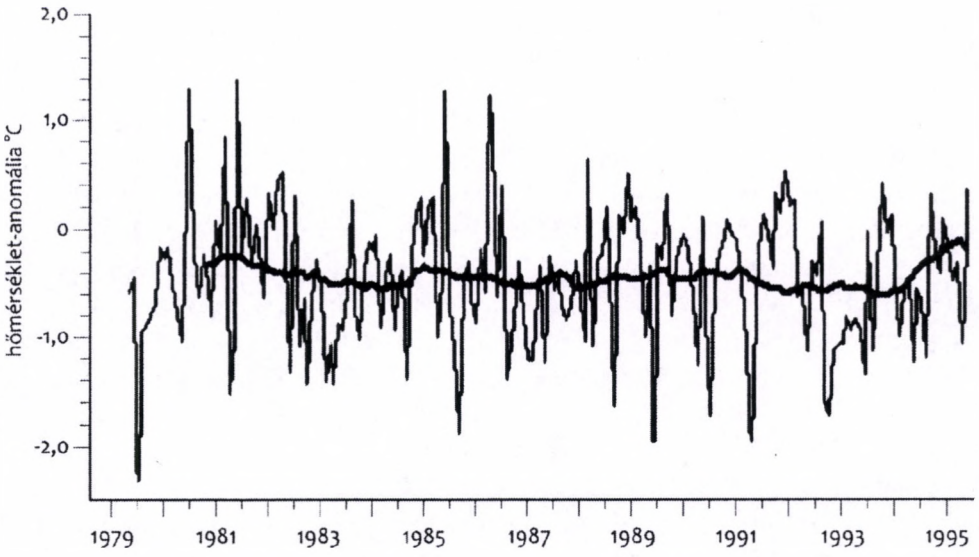
6.17. ábra. Az Arrhenius által számolt adatok és a valóság

Az Arrhenius közleményében található adatokat kritika nélkül diagramba felvíve, a várt hőmérséklet-változást a 6.17. ábrán láthatjuk. Az ábrán megtalálható a jelenlegi levegő-összetételnél az összetartozó (nem korreláció) szén-dioxid-koncentráció és az arrheniusi kiindulási állapothoz képest tényleges hőmérséklet-emelkedés.

Arrhenius az általa nyert adatokból azt a következtetést vonta le, hogy „thus if the quantity of carbonic acid increases in geometric progression, the augmentation of the temperature will increase nearly in arithmetic progression" (így, ha a szén-dioxid mennyisége a mértani sorozat szerint növekszik, a hőmérséklet-növekedés mértéke majdnem számtani sorozat szerint emelkedik – Arrhenius, 1896, 237.).

A tényleges érték kevesebb mint harmada a jósoltnak.

Az utóbbi időben már egyre inkább abban az irányban változik a klimatológusok véleménye, hogy a CO_2-növekedés miatti felmelegedés csak néhány tized fok lesz, annyi, amennyivel a légkör energiamegkötő képessége növekszik (ezt már leírtam magam korábban). Sokak szerint ez az energianövekedés elegendő lehet arra, hogy a kis légköri katasztrófák számának csökkenése mellett a nagyok száma növekedjék (Rádió 1, Mika János 2012 01. 03). A légkörről részletes, régiónkénti energetikai számítások még nem ismeretesek, amelyek alátámasztják ezt az elméletet. A még azért nem teljes mértékben igazolt jelenséget már korábban, magam is kikövetkeztettem, de nem a kis, átlagos hőmérséklet-emelkedéssel, hanem a rövid ciklusú nagy értékekkel magyarázva. Ha ez így van, akkor véleményem szerint ezt a hatást, a néhány tized fokos hosszabb távú átlagos hőmérséklet-emelkedés helyett, a rövid idejű, (pl. éves) rövid ciklusú, a globálisnál lényegesen nagyobb mértékű (több fok is lehet) hőmérséklet-emelkedések (6.18. ábra) okozhatják.



6.18. ábra. A rövid távú oszcillációk szemléltetése (UAH MSU: UAH University of Alabama in Huntsville – MSU Microwave Sounding Units, 2011)

Jelenleg az csak feltevés, hogy a légköri katasztrófák, például a gyakoribb óriásciklonok okát és gyakoriságuk növekedését ezen hőmérséklet-változások

okozta energiaváltozásokban kell keresni. A hőmérséklet-változások és az energetikai viszonyok kapcsolatának kutatása elsőrendű feladat lehet. A különböző paraméterekben a késleltetések, fáziseltolódások megismerése közelebb visz a jelenségek megmagyarázásához. A globális felmelegedésnél (hőmérséklet-változás) egy intenzív mennyiség (hőmérséklet) megváltozásáról beszélünk, ez a folyamatok legfontosabb jellemzője. Bár egyértelműen a globális hőmérséklet mérésekkel alátámasztott meghatározása is hiányzik, a kutatásokban a végeredményt a szén-dioxid (vagy üvegházgázok) és a globális hőmérséklet közötti kapcsolattal szemléltetik. A szén-dioxid a légkörnek egy komponense, súlyos hiba ennek és a globális hőmérsékletváltozás értékének ilyen függvényes ábrázolása. A rendkívül bonyolult számítógépes modellek nem átláthatók (Ban Ki Mun ENSZ-főtitkár is ezt kifogásolta), a görbék rendkívüli mértékben szórnak. A nagy szórás a rendszer bonyolultsága miatt érthető lenne, csak nem szabad ezek alapján olyan intézkedésekre javaslatot tenni, amelyek eredményei óriási erőfeszítések mellett is több mint megkérdőjelezhetőek.

A globális mértékű, a szén-dioxid szerepének elméleti számításaihoz mérésekkel is alátámaszthatóan használható adatok a következők:

1. a légkör határán a napsugárzás (napállandó),
2. a légkör tömege és összetétele,
3. a CO_2 abszorpciós tényezője,
4. a gázon áthaladó sugárzásgyengülés egyenlete.

Az adatokból a légkör felső határára a termikus egyensúly meghatározásához egy egyensúlyi hőmérsékletérték megfelelő közelítéssel számítható. A légköri gázösszetétel változása okozta sugárzásgyengülés fokozódása miatt szükséges földközeli hőmérséklet-növekedés globális hőmérséklet-változási adatként kezelhető.

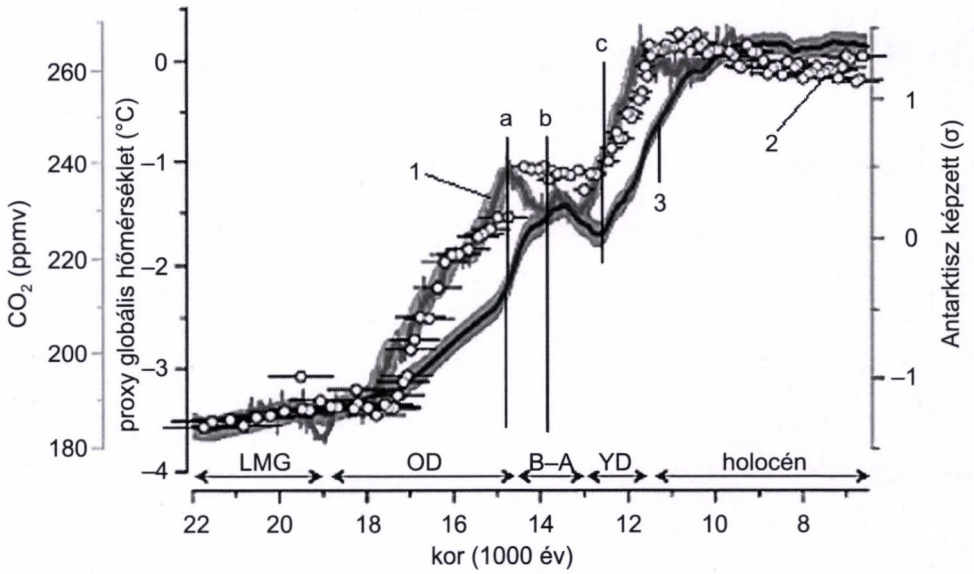
A Föld termikus egyensúlyát a világűrből szemlélve a Földnek mint egy testnek a globális hőmérséklete az űrből nézve nem változhat (természetesen van a folyamatnak bizonyos dinamizmusa). A légköri rétegek hőmérséklet-eloszlásában létrejöhetnek változások. Ugyancsak változhat a vizes és szilárd felületek mértéke és minősége stb. Az összes elem eredőjeként (extenzív és intenzív mennyiségekre vonatkozó szabályok szerint) alakul ki a Föld egyensúlyi állapota.

A szén-dioxid szerepét ebben a bonyolult rendszerben megfelelően, a helyén kell kezelni. A földi légkör összetételéből adódó 33–35 °C üvegházhatáshoz annak 20%-ával járul hozzá (igen széles, 10–20%-os tartományról is írnak az irodalomban). A 20%-nak kb. 10%-kal való változása (kb. 2%) nem hozható szoros kapcsolatba a szén-dioxid például 30–35%-os növekedésével.

A ~34 foknak néhány tizeddel való változása (elmúlt 150 év 0,74 °C) nem igazolhatja azt, hogy az emberiség lényegesen bele tudna avatkozni globálisan a földi folyamatok alakulásába.

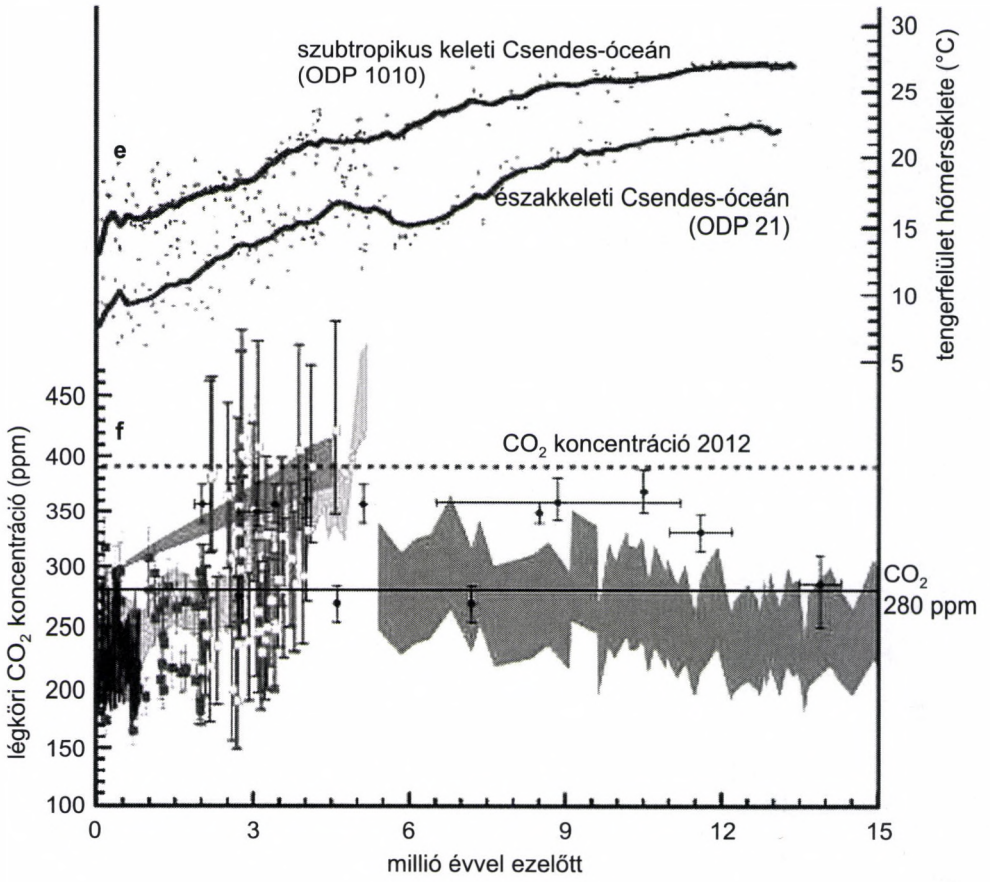
A közelmúltban két, a Nature-ben megjelent cikk foglalkozik a CO_2-nek a klímaváltozásban játszott szerepével. Az anonim lektorom által figyelmembe ajánlott, 2012 áprilisában megjelent Nature-cikk (La Riviere, et al. 2012, 97.) szerint az Antarktiszról származó jégfuratok arra utalnak, hogy szoros a kapcsolat, de jelentős a fáziskésés (több millió éves fáziskésés nagyon erőltetett, mit mond a mára?) a pleisztocén jégkorszakban a CO_2 és az ekkori klíma között, de a CO_2-nek a szerepe és fontossága a klímaváltozásban mégsem világos, mert a deutériumadatokkal helyi és nem globális hőmérsékleteket lehet (és még ez is) számítani. A 80 proxy adatait feldolgozva az látszik, hogy az északi féltekén, a jégtakaró legutolsó erőteljes csökkenési időszakán jelentkező CO_2-növekedés megelőzte a globális (megelőzően helyit említett) felmelegedést. A hőmérséklet-változás és a CO_2 koncentrációváltozása menetében tapasztalható fáziseltolódást az óceáni cirkulációban történő változással magyarázzák.

A másik, 2012 júniusában ismertetett Nature-cikk (Shakun et al., 2012, 49) „ellenpéldát" mutat be a klímának és a szén-dioxidnak a szoros kapcsolatát valló, jelenlegi nézetekkel szemben a késői miocén (12–5 millió évvel ezelőtt) időszakra.



a–c CO_2 ~ állandó ~ 2300 év
a–b jégfurat hőmérséklet csökken – proxy nő ~ 1000 év
b–c jégfurat hőmérséklet nő – proxy csökken ~ 1300 év
1 – Anktartisz hőmérséklet jégfuratokból
2 – CO_2 mérések jégfuratokban
3 – 80 proxy alapján képzett hőmérséklet (Shankun et al 2012)
LMG = Last Glacial Maximum, OD = Oldrest Dryas, B–A = Bolling–Allerod,
YD = Younger Dryas

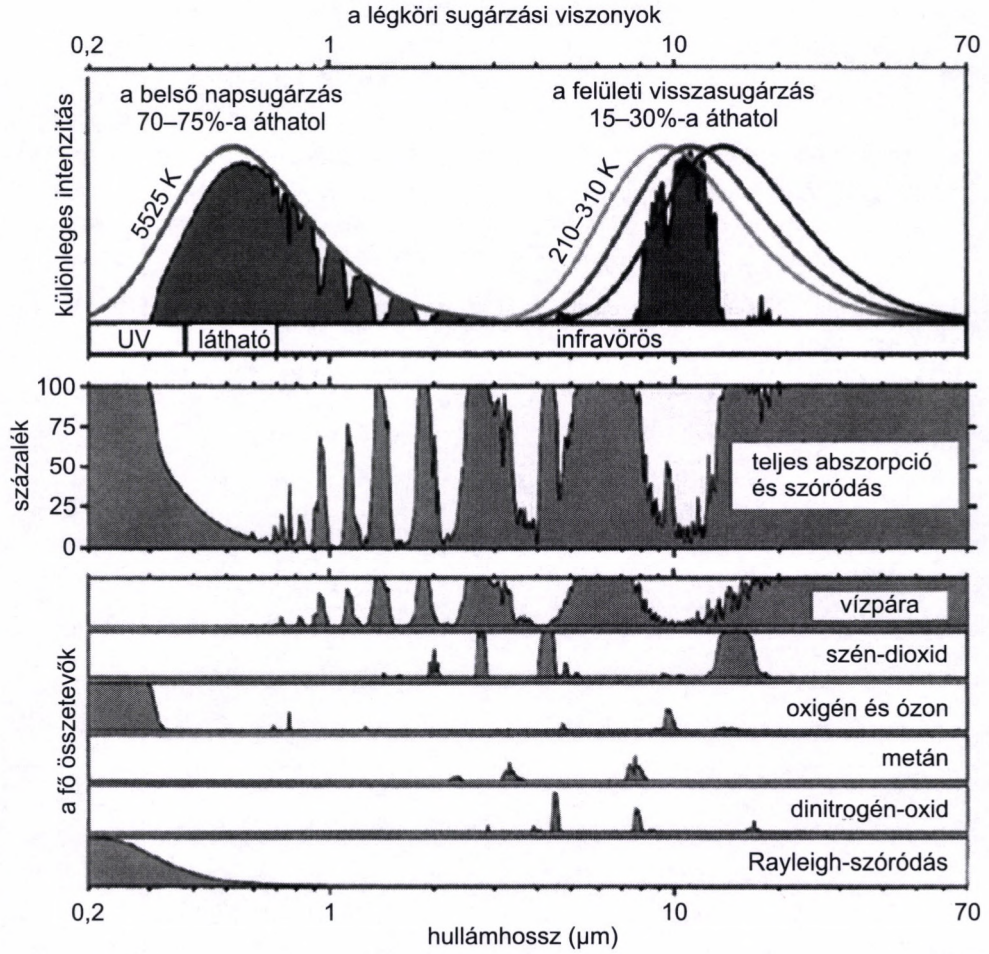
6.19. ábra



6.20. ábra.

A szerzők (University of California, Santa Cruz) állításaikat mélytengeri üledékeken végzett mérésekkel igazolják. Méréseik szerint a késői miocénben több millió évig a hőmérséklet 5–8 °C-kal magasabb volt a jelenleginél, míg a CO_2-koncentráció az ipari forradalom előtti szinten mozgott. Feltételezésük szerint 5 millió évvel ezelőtt a tengeráramlásokban lehetett valami változás, és a klíma kapcsolata a CO_2-vel érzékenyebbé vált. Természetesen ez utóbbi csak feltételezés, mint a korábbi cikkben is volt, és nem fogadható el tudományos magyarázatnak. Arrhenius óta állandóan, a számtalan klímát befolyásoló tényező közül, frontvonalba kerül a szén-dioxid szerepe. A lektorom is kifejti véleményét: „A földi változások sokfélék, ahogyan a szövegben szerepel. A kölcsönhatások összetettek is, ahogy azt az éghajlati modellek bonyolultsága is mutatja. Az egyes tényezők szerepét nem lehet a valóságnak megfelelően megmutatni: a számításokban minden más tényezőt változatlanul hagyva csak a vizsgálni kívánt tényezőt változtatva kaphatunk ugyan számszerű eredményeket, de a valóságban olyan nincs, hogy csak egyetlen hatótényező változzon."

Amióta az energetikát fő CO_2-kibocsátóként súlyosan felelősnek nyilvánítják a klímaváltozásban, és súlyos terheket rónak rá, azóta hangsúlyozom a hatásának eltúlzását (jelentősebb paraméterektől nagyvonalúan eltekintve) és a terhek indokolatlanságát. Igaz az ismeretlen lektor véleménye, amely szerint: „Az egyes tényezők szerepét nem lehet a valóságnak megfelelően megmutatni: a számításokban minden más tényezőt változatlanul hagyva,...". Én is éppen ezt próbálom hangsúlyozni, mert a napjaink realitása az, hogy elismerik a számos paraméter befolyását, végül a hőmérséklet-változásokat mégis a szén-dioxid függvényében tárgyalják (számos esetben, korrelációként). Ettől függetlenül, nem ritka a tudományos elemzéseknél, hogy a sokparaméterű függésnél egyes paraméterek szerepét a teljes jelenségből kiragadva a saját törvényei szerint elemzik. Nem közvetlenül a klímaváltozást elemzem, nem vitatom a CO_2 fontos szerepét, csupán a



6.21. ábra. A különböző légköri gázok spektrális tartományai

fizika, kémia és biológia alapegyenleteiből az energetikát, hőtant, termodinamikát leíró egyenleteket használva és a biológiai és a kémiai hatásokat figyelembe véve kísérelem meg a CO_2-t a szennyező anyagok közül kimenteni, az igaztalan vádak alól felmenteni. Ezt tudományos érvek alapján próbálom elérni, és nem a számos, átgondolatlan, kudarcot vallott, teljesíthetetlen elképzelés „eredményeivel" példálózva.

Az üvegházgázoknak a hatása bonyolult, mert különböző és változó az abszorpcióképességük, a gázok eloszlása mind vízszintesen, mind függőlegesen változik. Az összetevők az infravörös tartományban különbözőképpen abszorbeálnak és a Föld különböző részein különbözőképpen emittálnak (ami a helyi hőmérséklettől is függ), továbbá a páratartalomtól és a felhőeloszlástól is (szén-dioxid nagyon jól keveredik a Föld teljes egészét tekintve). A gázok „spektrális tartományai" erősen átfedik egymást, így a tényleges abszorpciót a többi gáz eltávolításával lehet meghatározni. A teljes abszorpciós sáv abszorpcióját nem lehet az egyes komponensek abszorpciójának összegeként számítani (Schmidt 2010).

Egy adott gáz csak a rá jellemző meghatározott hullámhossz-tartományban sugároz.

Az abszorpcióképesség a nyomás és rétegvastagság szorzatával arányos (egységnyi felületre jutó gáztömeggel)

Ha valamelyik abszorpciós sáv (amely egyszersmind emissziós sáv is!) telítődött, akkor a további rétegvastagság-növekedés hatástalan.

Az adott sávból a gáz nem sugározhat ki többet, mint az ugyanolyan hőmérsékletű fekete test.

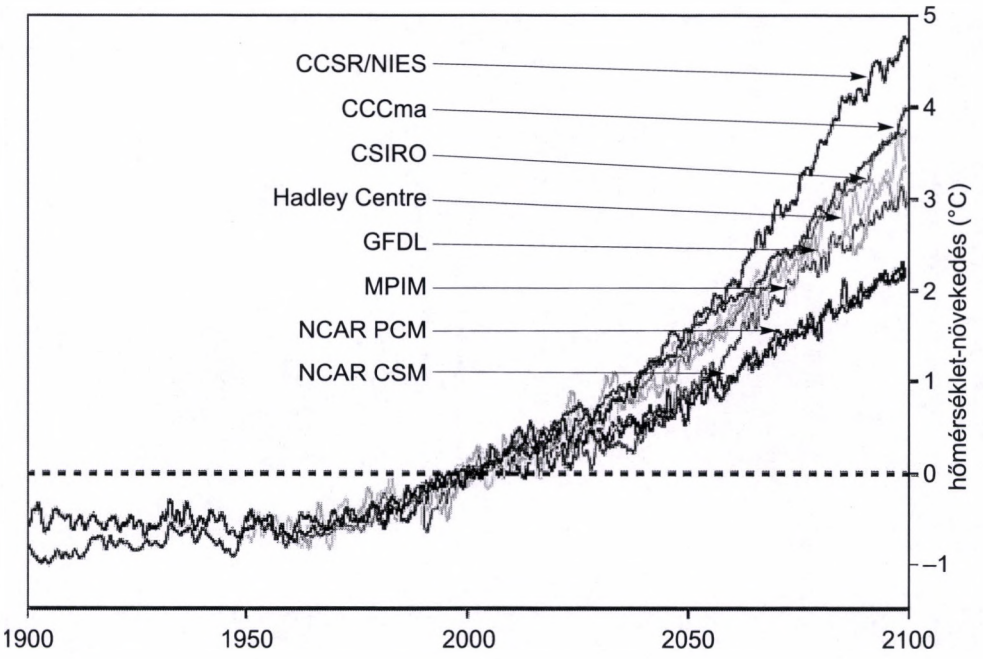
Két különböző gáz elegye ugyanazt az elnyelési spektrumot adja, mintha a két gáz külön réteget alkotna.

6.6. táblázat. A hosszúhullámú abszorpció változása (az üvegházkomponens részesedése a földfelület teljes üvegházhatás általi 33 °C-os hőmérséklet-emelésében)

Komponens	Hőmegkötő komponens	Hőt nem kötő komponens	Relatív hatás	Csak a hőt megkötő	Relatív hatás	Átlagos érték
	100	0				33 °C
Víz és felhő	34	66	82,5%	85	67,5%	75,0% 24,75
CO_2	91	9	11,3%	26	20,6%	15,9% 5,25
O_3	97	3	3,8%	7	5,6%	4,7% 1,55
Egyéb	98	2	2,5%	8	6,3%	4,4% 1,45
Teljes		80	100,0%	126	100,0%	100,0% 33,00

A ~33–34 foknak néhány tizeddel való változása (elmúlt 150 év 0,74 °C) nem igazolhatja azt, hogy az emberiség lényegesen bele tudna avatkozni globálisan a földi folyamatok alakulásába.

A szén-dioxid-kibocsátásnak a klíma felmelegedésére való hatása a korábban közölt egyszerűsített számításokkal alátámasztva kijelenthető, hogy erősen eltúlzott. Csupán egy paraméterhez (nevezetten a szén-dioxidhoz) a gyakorlat szerint alkalmazott szoros kötés, „horribile dictu" korrelációja nem helyes. Erre alapozott politikai, technikai, gazdasági intézkedések indokolatlanul túlzott terheket jelentenek a társadalom számára. A negyedik IPCC-jelentésben 1,1 és 6,4 °C a lehetséges felmelegedés. A 6.22. ábra azonos szcenárió mellett a legjelentősebb kutatóhelyek prognózisa.



6.22. ábra. A világ néhány jelentős kutatóhelyének globális hőmérséklet-emelkedési prognózisa a jelen évszázadra

Az intézmények rövidítése és teljes neve:

CCSR/NIES – Center for Climate System Research/National Institute for Environmental Studies (University of Tokyo)

CCCma – Canadian Centre for Climate modelling and analysis

CSIRO – Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation Australia

Hadley Centre – Hadley Centre for Climate Prediction and Research (Met office, UK)

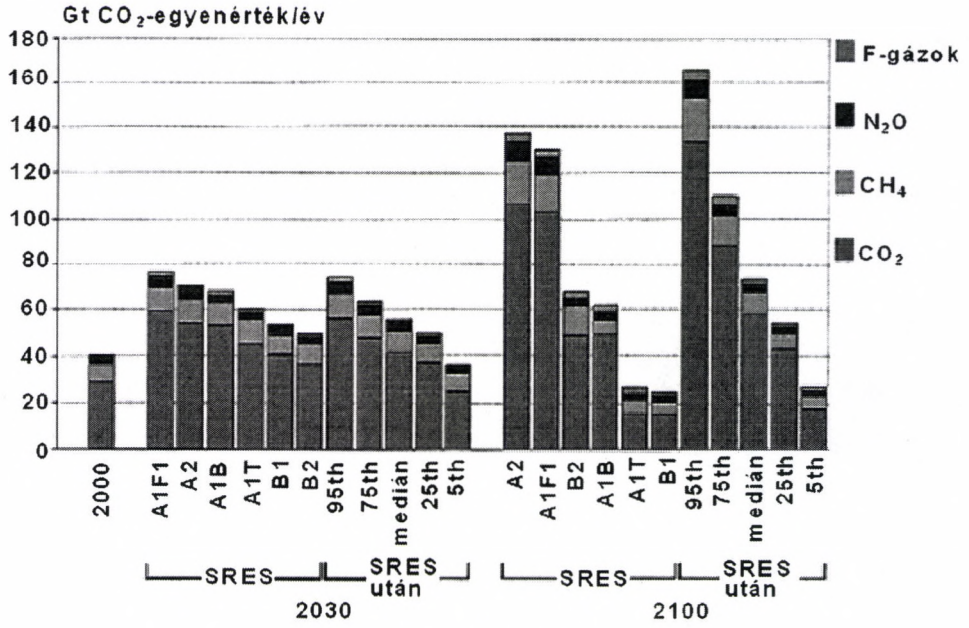
GFDL – Geographical Fluid Dynamics Laboratory, USA

MPIM – Max Planck Institute for Meteorology Germany

NCAR PCM – National Center for Atmospheric Research, Parametrizations Climate Model, USA

NCAR CSM – National Center for Atmospheric Research Climate Simulation Model, USA

A különböző programok szórása különböző szcenárióknál 1,1–7,1 °C értékek közé esik. Tájékoztatásul a 6.23. ábra bemutatja a különböző szcenárióknál várt kibocsátási értékeket.



6.23. ábra. A globális üvegházgáz-emisszió 2000-ben és a tervezett értékek 2030 és 2100 évekre az IPPC SRES szerint és a SRES szerinti irodalomban

Az energiastratégiák kidolgozásakor meg kellene szabadulni attól a gyakorlattól, amely szerint elsősorban a szén-dioxid-emisszió csökkentése dönt a különböző változatok között.

Ehhez tisztázandó legfontosabb kérdések:

1. A szén-dioxid szerepe a klímaváltozásban
2. A közelmúltban a klímaváltozás kutatásában a különböző paraméterek hatásának elemzésével kapcsolatos tudományos, elméleti és mérési, nemzetközi és hazai tevékenység jelentősen erősödött. A klímaváltozás a Föld létezésében evidencia.

3. Jelentős tudományos szervezetek, kutatóintézetek és kutatók ezrei, továbbá hazai kutatók nyilvánítják ki azon véleményüket, hogy az emberi tevékenység következtében a légkörbe kerülő „üvegházgázok" (elsősorban a CO_2) hatását eltúlozva interpretálják.
4. A „globális felmelegedés" tárgyalásakor a fogalmakat, különösen a globális hőmérséklet fogalmát nem szerepeltetik egyértelműen, ami különösen az egyébként nagyon értékes mérések felhasználásakor vezet téves vélemény kialakításához.
5. A szén-dioxid-koncentráció és a nem megfelelően definiált, továbbá a nem megfelelő pontossággal meghatározott körülmények között mért hőmérséklet-értékek közötti kapcsolat gyakran irányított értéket szolgáltat.
6. A „proxy" adatok nem segítettek egyértelművé tenni az emberi tevékenységből származó szén-dioxid és a „globális hőmérséklet-emelkedés" közötti kapcsolatot.
7. A korábbi, határozott, széles körben elterjesztett véleménnyel ellentétben, az elméleti és mérési adatok alapos elemzésével a tudományos világ meghatározóan jelentős része szigorúan a tudományos szempontok alapján nem látja lehetségesnek, hogy az emberi társadalom létéhez kapcsolódó CO_2 a klímaváltozás folyamatára befolyást tudna gyakorolni.
8. A CO_2-csökkentésre alapozott energetikai tervezés erőltetése elhibázott. Azok az érvek, amelyek szerint kedvező hatása volt az energiagazdálkodásra, nem fogadhatók el, mert helytelen energiaforrás-elosztási arányok kialakulásához vezet.
9. Az energetikai hatékonyság javítása elsődleges feladata az energetikának, és ez a környezetszennyezés lényeges csökkentését is biztosítja. Ekkor érvényesülnek a helyes gazdaságossági szempontok is.
10. A karbon a környezetben nem szennyező anyag, hanem az életfolyamatok mindegyikének szerves része.

Találunk több évtizedes időszakokat, ahol ellentétes a szénkibocsátás és a hőmérsékletváltozás. Elég nagy a szabadság az átlagolások kiválasztásában.

6.7. táblázat. A szén-dioxid-koncentrációváltozással történő ρc-változás miatti levegőtömeg hőmérséklet-változása

CO_2-koncentráció ppm	(T) ΔT °C	Lehűlés °C
350	33	0
450	32,997	–0,003
500	32,996	–0,004
600	32,994	–0,006

Egy közelítő számítás tájékoztat arról, hogy légköri CO_2-koncentrációváltozás esetén a napállandóra, a levegő tömegére, a szén-dioxid-abszorpcióra és fajhőre épülő ρc szorzat alapján milyen hőmérséklet-változásra lehet számítani. A CO_2 nagyobb sűrűsége miatt a ρ növekszik, a fajhő c_p pedig csökken. Ez a számítás a levegő átlaghőmérsékletére ad értéket és nem tájékoztat a légkörön belül a magasság függvényében létrejövő hőmérséklet-eloszlás változásáról.

A számítás alapján elhanyagolhatóan kicsiny hőmérséklet-csökkenés adódik, amiből az adatok hibáját figyelembe véve inkább változatlanságot feltételez. Ez a Föld termikus egyensúlyát tekintve valóban helyes feltételezés. A megújulóknak is van CO_2-terhe. A földgázhoz hasonlítva nem is kevés.

6.7. A különböző elméletek kritikája. A szén-dioxid szerepe a klímaváltozásban

A légkör globális felmelegedéséért a különböző kutatások és szervezetek jelentős mértékben az ipar által az energetikában felhasznált fosszilis tüzelőanyagokból származó szén-dioxidot okolják. Két alapvető folyamatot nem értékelnek jelentőségének megfelelően.

Az első az, hogy a fosszilis tüzelőanyagok széntartalma a légkörben volt, és csak egy kis rész kerül vissza az eredeti állapotába. Ezek egy része reverzibilis folyamatokból áll. Nemcsak évmilliók alatt volt jelentős változás a Föld felszínén, hanem néhány ezer év alatt is, ami rövid időintervallumnak mondható. Tízezer évvel ezelőtt a Szahara helyén dús erdőség volt, bár még az emberi beavatkozás az óriási változásnál fel sem merülhet. Ilyen időtávban a Föld felületén jó néhány nagy változás található.

A második tény a Föld termikus egyensúlyával, így a globális felmelegedéssel kapcsolatos. Az ún. üvegházhatás okozói az üvegházgázok, és elsősorban a fosszilis tüzelőanyagokból felszabadult szén-dioxid. A CO_2-abszorpció és -emisszió tulajdonsága biztosítja, hogy a Nap sugárzásából a hőenergia egy részét a Föld légkörében visszatartja, és az átlaghőmérséklet minimális változását okozza. Tény, amennyire a mérések megbízhatóságát elfogadjuk, hogy az utóbbi 150–200 évben a légkör CO_2-koncentrációja kb. 280 ppm értékről kb. 380 ppm-re növekedett. Az átlaghőmérséklet (?) kb. 0,74 °C-kal magasabb (konszenzus). Az irodalmi adatok alapján sem mondható a kapcsolat korrelációnak, de konvergenciának sem. Az átlagoláshoz kiválasztott szakaszoktól függően sokféle megállapítást lehet tenni, még hosszabb szakaszokra a szén-dioxid-koncentráció növekedése mellett hőmérséklet-csökkenést is. A klímával kapcsolatos rendkívül széles körű kutatás nagyon sok fontos ismeretet szolgáltat, de a globális hőmérséklet-változásra és annak a szén-dioxiddal való kapcsolatára nem ad megfelelő tudományos magyarázatot. A növekedés mértékére adott értékek különösen hibásak. Az is közismert, hogy a CO_2 emissziós és abszorpciós tényezője a koncentrációval (Beer-féle törvény $p \cdot x$

parciális nyomás szorozva a rétegvastagsággal) igen erősen telítődő görbével rendelkezik (Ónodi 2003).

Külön fel kell figyelni arra, hogy az emissziós együttható erősen egy telítési érték felé halad. Ez azt jelenti, hogy a légkörbe kerülő szén-dioxid növekedésével egyre kisebb mértékben abszorbeál a sugárzásból, a felmelegedés növekedésének sebessége csökken.

Részletesebben elemezve a légkör teljes emisszióképességét, a legjelentősebb hatása a szén-dioxid-koncentrációnak, a nedvességtartalomnak és az ózonnak van, bár időszakosan (pl. vulkánkitöréseknél) az aeroszolok is jelentős tényezővé lépnek fel. Az elemzés elsősorban a CO_2 szerepére összpontosul (Staley 1972).

Effektív légköri emisszióképesség, F.

$$\frac{F\downarrow}{\sigma T_o^4} \equiv \varepsilon_a,$$

ahol σ a Stefan–Boltzmann-állandó, T_o, a légkör alsó határának hőmérséklete, és ε_a az „effektív légköri emisszióképesség".

$$F\downarrow = F\downarrow(H_2O) + F\downarrow(CO_2) + F\downarrow(H_2O\text{–}CO_2\ \textit{átfedés}) + F\downarrow(O_3) + F\downarrow_d + F\downarrow_g$$

A jobb oldal első két tagja a H_2O- és CO_2-fluxus részt jelenti, a harmadik a H_2O és CO_2 átfedő hullámhosszai hatását jelenti (negatív), a negyedik az ózon szerepét, amelynek nincs átfedése más gázokkal, az ötödik az aeroszolnak és átfedésének fluxussűrűségét jelenti, a hatodik tag a nyomgázok emisszióképességének hatását veszi figyelembe.

$$\frac{F\downarrow}{\sigma T_o^4} = \varepsilon_a = \frac{\int_0^{\varepsilon_T(H_2O)} \sigma T^4 d\varepsilon}{\sigma T_0^4} + \frac{\int_0^{\varepsilon_T(CO_2)} \sigma T^4 d\varepsilon}{\sigma T_0^4} +$$

$$+ \frac{\int_0^{(\Delta\varepsilon)_T(\text{átlap.})} \sigma T^4 d\varepsilon}{\sigma T_0^4} + \frac{\int_0^{\varepsilon_T(O_3)} \sigma T^4 d\varepsilon}{\sigma T_0^4} + \frac{F_d\downarrow}{\sigma T_0^4} + \frac{F_g\downarrow}{\sigma T_0^4} =$$

$$= \int_0^{\varepsilon_T(H_2O)} \left(\frac{T}{T_0}\right)^4 d\varepsilon + \int_0^{\varepsilon_T(CO_2)} \left(\frac{T}{T_0}\right)^4 d\varepsilon +$$

$$+ \int_0^{(\Delta\varepsilon)_T(\text{átlap.})} \left(\frac{T}{T_0}\right)^4 d\varepsilon + \int_0^{\varepsilon_T(O_3)} \left(\frac{T}{T_0}\right)^4 d\varepsilon + \frac{F\downarrow_d}{\sigma T_0^4} + \frac{F\downarrow_g}{\sigma T_0^4} =$$

$$= \varepsilon_a(H_2O) + \varepsilon_a(CO_2) + \varepsilon_a(\text{átlapolás}) + \varepsilon_a(O_3) + \varepsilon_a(\text{aeroszolok}) + \varepsilon_a(\text{nyomgázok})$$

Az integrálás alsó értéke a légkör felső határán lévő emisszióképesség fluxusértékeket jelöli.

A H_2O, CO_2 és $H_2O - CO_2$ átfedés integrációjával a fluxus több réteg esetén

$$F\downarrow = \sum \overline{\sigma T_n^4} \Delta t_n$$

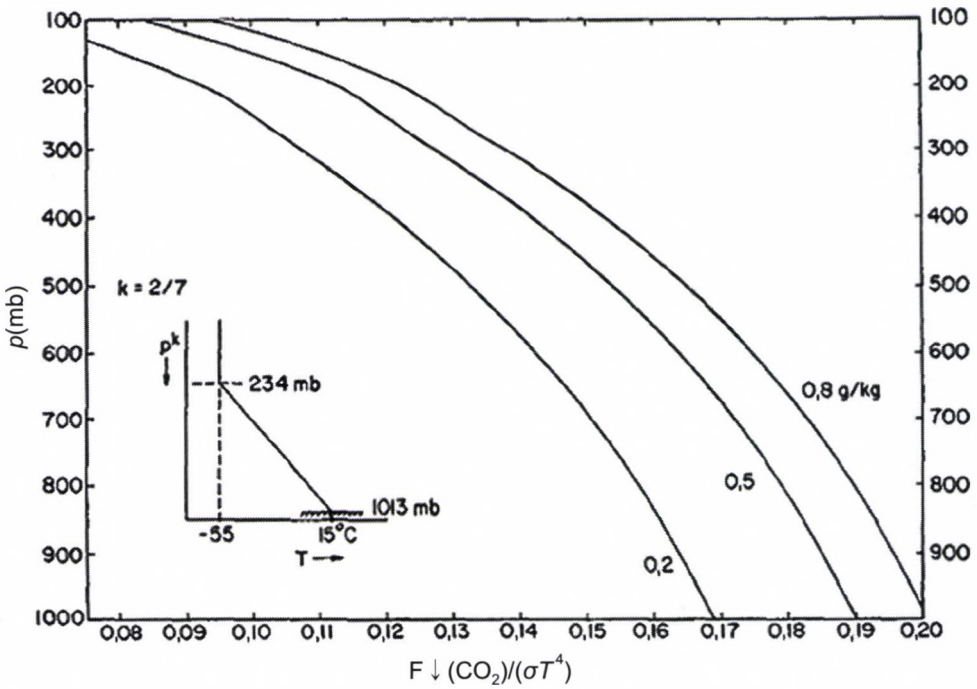
ahol N a referenciaszint felett lévő rétegek száma és a réteg átlagos nyomása (bar).

A H_2O esetében a Curtis–Godson effektív nyomást

$$p_e = \frac{1}{u_t} \int_0^{u_t} p du$$

minden u_t optikai hosszra kiszámolták, és az integráció szintjéhez tartozó p_e-nek megfelelő görbéből adott emisszióképességekkel, illetve optikai szakaszokkal megkapták az emisszióképesség pozitív lépcsőit.

Az elméleti és kísérleti adatok alapján a CO_2-nél a 15μm-es sávban az abszorpció nyomásfüggőségére azt találták, hogy az optikai szakaszt $p^{0,88}$ szerint korrigálni kell.



6.24. ábra. A szén-dioxid effektív légköri emisszióképességének $F\downarrow(CO_2)/(\sigma T^4)$, a referenciaszint nyomásának p_o és a keverési aránynak a függvényében való változása, lineáris hőmérséklet-változást véve figyelembe

A CO_2-nek a lefelé irányuló sugárzássűrűsége kifejezhető a következő egyenlettel:

$$F\downarrow(CO_2) = b\sigma T^4$$

ahol

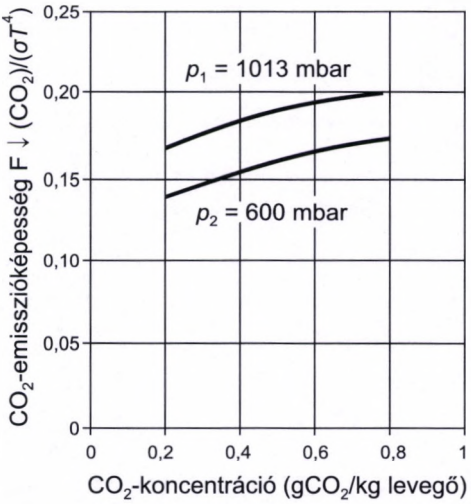
b állandó

T a referenciaszinten a hőmérséklet.

A rétegvastagság hatása függ a CO_2-koncentrációtól és a CO_2 optikai szakasztól függő hőmérséklet-változás arányától.

Valóságban a b nem állandó, az értéke és változása számításokkal és mérésekkel határozható meg.

A CO_2-re a 6.24. ábra tartalmaz különböző értékeket. A b koefficiens csökken a magassággal és növekszik a keverési aránnyal. Az alsó régiókban a keverési arányra jelentős hatása van a növényzetnek is.



6.25. ábra. A szén-dioxid emisszióképességének változása a koncentráció és a légköri nyomás függvényében (Reményi 2012)

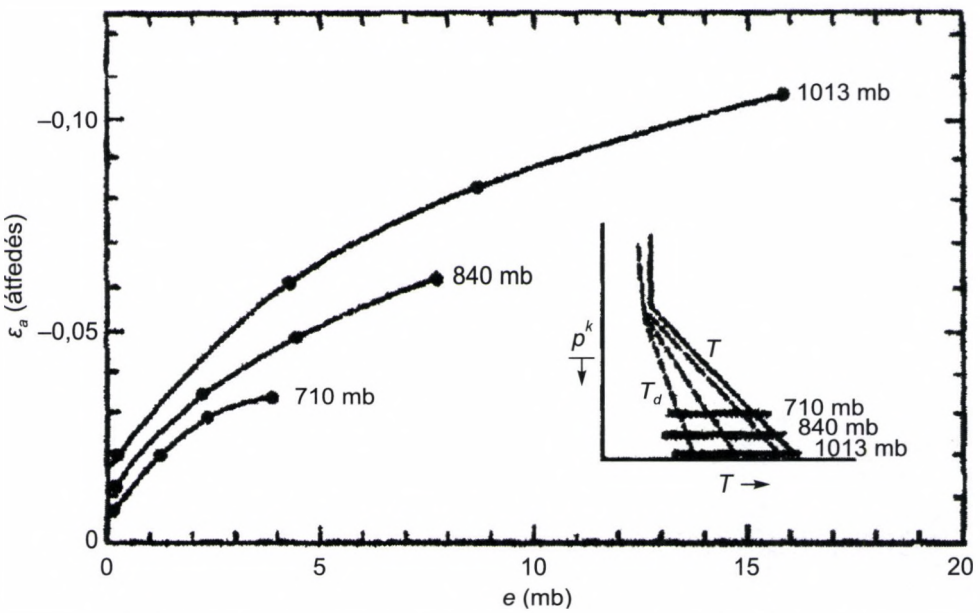
A diagramokból állandó nyomásokra megszerkeszthetők a CO_2 emisszióképességének a légköri szén-dioxid-koncentrációtól való függését szemléltető diagramok. A görbék alátámasztják azokat az ismereteket, hogy a CO_2 emisszióképessége viszonylag kis mértékben változik.

A légköri gázok sugárzási hullámhossz-átfedésének hatását jellemző diagramot, a 6.26. ábra belső diagramjának segítségével három nyomásszinten (rétegre) korrigálták. Minden nyomásszinten négy páranyomásra számolták az értékeket. A páranyomás értékének növekedésével gyorsan nőtt a korrekció kis nyomásoknál és

lassabban nagyobb nyomásoknál. Az e=15mb és p=1013 értékeknél a CO_2-átfedési korrekció több mint 50%.

6.8. táblázat. 1013 mb-nél az ε_a légköri effektív emisszióképesség a felszíni gőznyomás függvényében és lineáris hőmérséklet és harmatpontváltozás feltételezésével (J. és S,J alapján)

e (mb)	H_2O		CO_2	Átfedés	O_3	Teljes
	J	(S,J)				
0,237	0,38	(0,35)	0,19	–0,02	0,05	0,60
0,706	0,44	(0,41)	0,19	–0,03	0,05	0,65
1,83	0,51	(0,47)	0,19	–0,04	0,05	0,71
4,22	0,57	(0,53)	0,19	–0,06	0,05	0,75
6,14	0,60	(0,56)	0,19	–0,07	0,05	0,77
8,73	0,65	(0,59)	0,19	–0,09	0,05	0,80
15,8	0,71	(0,65)	0,19	–0,11	0,05	0,84
31,9	0,82		0,19	–0,14	0,05	0,92
51,7	0,89		0,19	–0,17	0,05	0,96



6.26. ábra. A H_2O-CO_2 átfedés (ε_a(átfedés)) szerepe az emisszióképesség értékében. A számításokhoz az ábra belső diagramját vették figyelembe

Nagyon nagy páranyomásoknál az átlapolási korrekció összemérhető a teljes CO_2 hozzájárulással.

A magasságnak a hatása az ε_a-ra viszonylag csekély, de gyakorlatilag állandó minden páranyomásra. Az ε_a a nyomásnak 1013 mb-ről 710 mb-re való csökkenésekor a növekedés kb. 0,05, és 1013 mb-ről 840 mb-re változáskor a csökkenés 0,02.

Az 1013 mb-re vonatkozó diagramnál a nyomásérzékenység $0{,}2 \leq e \leq 20$ tartományban:

$$\varepsilon_a = \frac{F\downarrow}{\sigma T_0^4} = Ce^m$$

ahol $C = 0{,}67$ és $m = 0{,}080$. A görbéből 710 mb-re $C = 0{,}63$ és az m megegyezik.

A nedvességinverziónak nagy a hatása az ε_a-ra, míg a hőmérséklet-inverzióé nagyon kicsi.

A légköri CO_2-koncentráció növekedésének a hőenergia-visszatartó hatása exponenciálisan csökken. A nagy felmelegedést prognosztizáló kutatások eredményei bizonyosan nem helytállóak (Staley et al. 1972).

Az egyértelmű eredményekért a Föld termikus egyensúlyát alapul vevő egyszerű (néha indokolatlanul primitívnek nevezett) egyenletet kell használni. Egy kazánhatásfok értékét is lehet a veszteségekből és lehet közvetlenül (pontosabban és egyszerűbben) a kimenő és bemenő energia hányadosaként számítani. Ugyancsak egyszerűnek (primitívnek) nevezhető lenne az energiaegyenlet ($E=hv$), de nem szükséges indoklás a megjegyzés tarthatatlanságáért (ismételve „Everything should be made as simple as possible, but no simpler." Einstein).

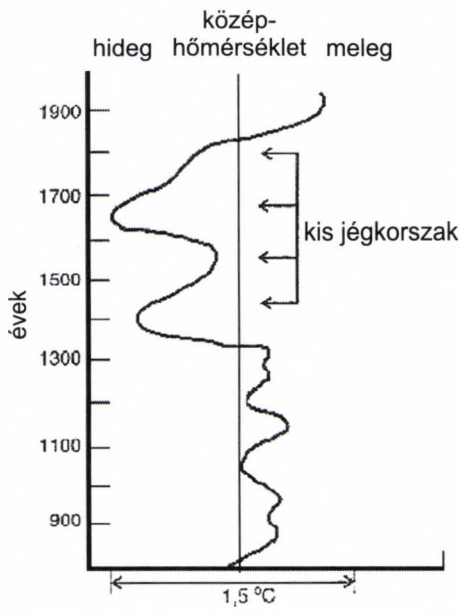
A Föld energetikai egyensúlyának a hőcsere mellett vele közel egyenértékű számos összetevője van. A modellek eredményei közötti nagy eltérés alapján arra a következtetésre lehet jutni, hogy a bonyolult modellekben a sok közelítés az összekapcsolásukat nem teszi lehetővé és jelentős hibához vezet.

Nem lehet korrelációról beszélni a légkör szén-dioxid-tartalma és a globális hőmérséklet között. Hosszabb időszakokra is, és jelen korunkban is lehet példát találni ennek ellenkezőjére. Ilyen például az 1940 és 1970 évek közötti időszak.

Ugyancsak problémás egyértelműen magyarázni a XV–XVIII. század folyamán az ipari forradalom előtti globális és a Kelet-Európában tapasztalt lehűlést, amely kb. 1,5 °C tartományban mozgott.

A XIX. század vége óta megfigyelt átlagos hőmérséklet-emelkedést valós tényként fogadhatjuk el. Ez a következtetés természetesen nem okvetlenül jelenti azt, hogy a melegedés valóban az üvegházhatású gázok növekedése miatt következett be.

A CO_2 (sajátfrekvenciája $2 \cdot 10^{13}$ 1/s, kb. 0,4%-kal nő évente) többféle forrásból kerül a levegőbe. Ezek a források a következők: a földi vulkáni tevékenység, a biomassza levegőn való bomlása, a kőzetek mállása és az emberiség hozzájárulása a növekedéshez – a fosszilis tüzelőanyagok (kőszén, kőolaj, földgáz) elégetése. A felhőtől eltekintve (nagy hiba) az üvegház-melegedés 66%-át ennek a gáznak



6.27. ábra. A kis jégkorszak. Éghajlat-ingadozások Kelet-Európában az elmúlt ezer év folyamán (Varga–Haszonits 2003 nyomán)

tulajdonítják. A szén-dioxidot azonban a fotoszintetizáló szervezetek elnyelik, jelentősek a tengerek és az ásványok vegyi folyamatai is.

Az üvegházhatású gázok szerepének mértéke a klímaváltozásban széles körben vitatott, mind a tudományban, mind a társadalomban, de rendkívül költséges téma. A viták eredményeként született kiotói protokoll, a szén-dioxid és az egyéb GHG-gázok szén-dioxid egyenértékre számolt mennyiségének korlátozását tűzte ki célul. A több mint tízéves tapasztalat után megállapítható az egyezmény teljes csődje. Az EU-teljesítést is csak a 12 új tagállam csatlakozásával lehetett menteni, de ezt is csak az ezekben összeomlott nagyipar segítette. A fejlett EU-15 nem teljesítette vállalását, a vállalt 8%-os csökkentés helyett mindössze 2%-ot, azaz kettő százalékot teljesített.

A CO_2 kitüntetett szerepét a fizika-kémia törvényeivel elég jó számíthatóságának köszönheti, mert az egyéb tényezők hatásának számítása még inkább bizonytalan. A kiváló hazai, hegyhátsáli és K-pusztai mérések nagyon jó pontossággal illeszkednek a nemzetközi adatokhoz és nagyban hozzásegítik a hazai kutatást a vélemények kialakításához és igazolásához.

Az utóbbi években elsősorban jelentős tudományos szervezetekben, de a nemzetközi tárgyalásokon is megrendült az a korábbi határozott kiállás, amely szerint a légköri szén-dioxid-koncentráció növekedése alapvetően felelős a földi klíma globális változásáért.

Alapos elemzések kellenek, hogy a szén-dioxidnak a klímaváltozással kapcsolatos szerepe tisztább megvilágításba kerüljön. A tudományos megállapításokat ne konszenzussal, hanem érvekkel támasszuk alá. A szerző kutatásai megmutatják, hogy a CO_2-t elsődleges paraméterként felelőssé tenni a klíma alakulásáért tudományosan nem indokolt. A szén-dioxidnak tényleges szerepét a hőenergetikai viszonyok alakulásában, elismerve, egyszerű fizikai számításokkal pontosabban meg lehet közelíteni, mint bonyolult, a teljes, átfogó földi rendszert modellező számításokkal.

A közelmúltban a klímaváltozás kutatásában a különböző paraméterek hatásának elemzésével kapcsolatos tudományos, elméleti és mérési, nemzetközi és

hazai tevékenység jelentősen erősödött. A klímaváltozás a Föld létezésében evidencia. A Föld a beeső napsugárzástól függően dinamikusan, de termikus egyensúlyban van.

A Föld energetikai egyensúlyát meghatározó paraméterek:
- a Föld forró belsejéből a földfelszín felé áramló hő,
- a Napból érkező sugárzás (napkitörések, földpálya stb.),
- a földfelszín által visszavert sugárzás spektruma (albedó, növényzet, vízfelület stb.),
- a Földről az űrbe visszatérő hosszúhullámú sugárzás (jelentős az üvegházgázok szerepe),
- a Földre érkező hősugárzásból a vegyileg megkötött részaránya,
- a Földre érkező hősugárzásból a biológiailag megkötött részaránya.

A klímakutatásban tevékenykedő kutatóállomások, különösen az utóbbi időben számos korszerű eszközzel gyarapodtak. Vonatkozik ez a Föld hőmérsékletmérésére is. Vannak sugárzási elven, hővezetési elven, érintős stb. működő hőmérsékletmérők. A mért értékek azonban a megismerni kívánt változások mértékét tekintve, mondhatjuk, lényegesen eltérnek egymástól. Több tized a különbség például a ballonos vagy az űrszondás mérések, nem beszélve az ugyanazon elven mérő kutatóállomások között is. Ha figyelembe vesszük, hogy a vitatott iparosítási időszak kb. 150 éve alatt 0,74 °C változás volt, néhány tized is jelentős.

Ez azonban azt is igazolja, hogy a modellek közötti nagy eltérések kétségbe vonják azok megbízhatóságát.

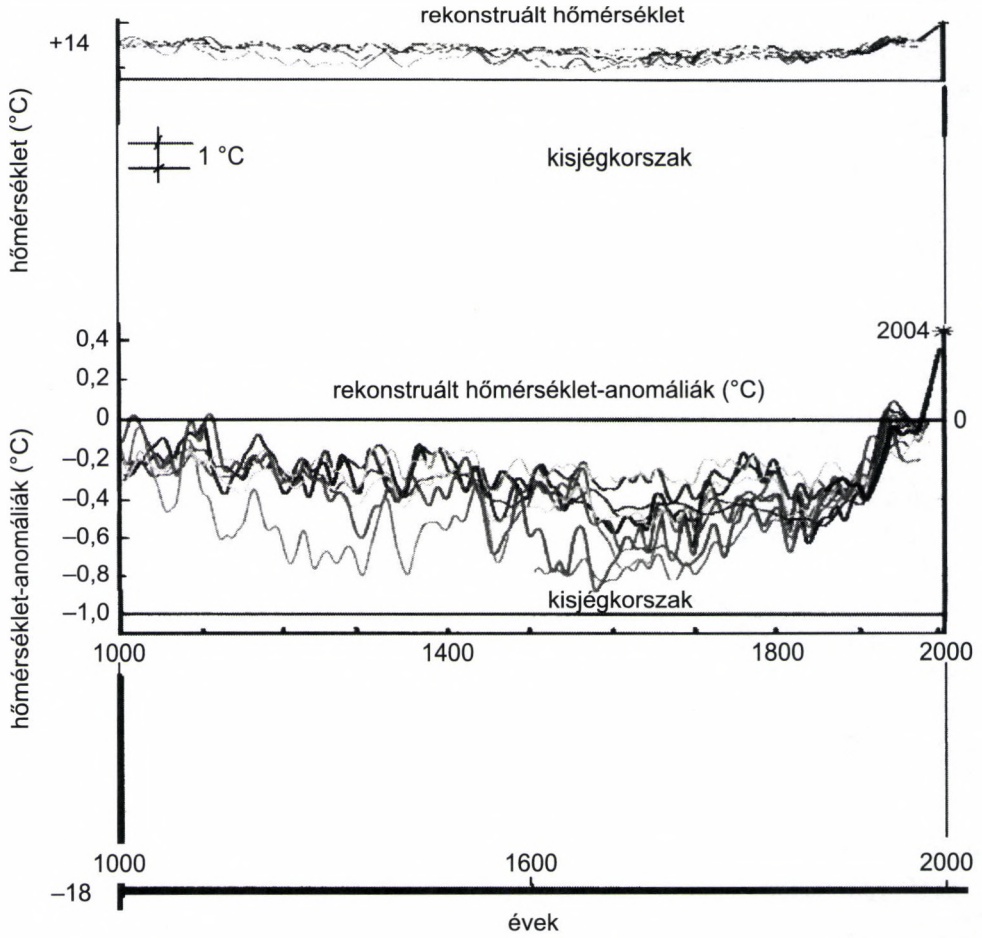
A különböző modellek szórása különböző szcenárióknál a legközelebbi száz évre várt felmelegedést 1,1 °C és 7,1 °C értékek közé teszi. A világ nyolc legtekintélyesebb klímakutató intézetének előrejelzései szerint a következő száz évben ugyanazon energetikai szcenárióra 2,1 és 4,9 °C között lehet a felmelegedés mértéke. A több száz százalékos szórás elfogadhatatlan, de az is, hogy ennek alapján egy középértékben egyeztek meg az intézetek. Ez nem tudományos hozzáállás, és a hőmérsékletek meghatározására használt műholdak adatainál is egyazon időben és helyen mért értékei között akár egy vagy több °C-os eltérések lehetnek (V. Gray Lect. Roy. Soc. New Zeland 2002. 11.; kitűnő hazai kutatás ELTE Juhász H. TERRA és NOAA, 2005 06. 25), ami az óriási feladat miatt érthető, de korlátozottá teszi a modelleknek konkrét intézkedésekre való felhasználását.

Csupán néhány példa, amely bemutatja a tudományos társadalom jelentős részének véleményét tükröző helyzetet:

„Harold *Lewis* renowned physicist, Emeritus Professor of Physics at UC Santa Barbara, sent a resignation letter to the American Physical Society last week. He had been a member of the APS for 67 years. Lewis called Global Warming the »greatest and most successful pseudoscientific fraud I have seen in my long life.«"

(Harold Lewis, az ismert fizikus, a Santa Barbara-i Kaliforniai Egyetem nyugalmazott fizikaprofesszora a múlt héten kilépett az American Physical Societyből, melynek 67 éven át tagja volt. A globális felmelegedésről így vélekedett: „a legnagyobb és legsikeresebb általudományos csalás, amivel hosszú életem során valaha is találkoztam").

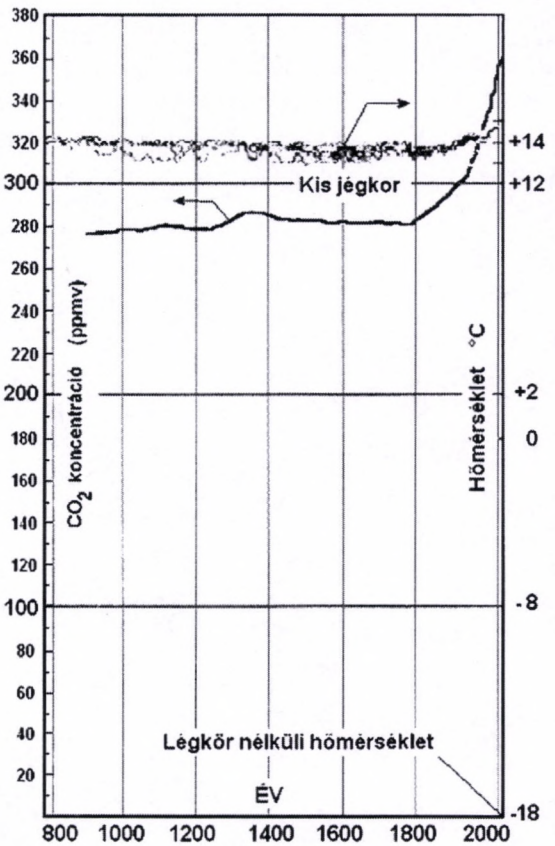
Továbbá: „Az eddigiek szerint az is világos, hogy klimatikus jövőnk előrejelzését nem nagyon építhetjük a CO_2 légköri koncentrációjára, függetlenül attól, hogy »természetes« vagy antropogén eredetű. Nem ismerjük ugyanis a számszerű összefüggést a légkör CO_2-tartalma és a hőmérséklet-emelkedés mértéke között (Leggett 2008; Reményi 2010). Kutschera egyenesen odáig megy, hogy a szén-dioxid-koncentráció növekedésének hatása a klímára nem világos (Kutschera 2010)." (Berényi 2011).



6.28. ábra. A hőmérsékletarányok érzékelésére szolgáló ábra, a teljes üvegházhatás-tartományban és a legfelső tartományban való együttes ábrázolással

Mindenképpen elgondolásra kell hogy késztessen mindenkit, hogy nemrég harmincegyezer tudós írt alá egy petíciót, „amely kétségbe vonja, hogy a globális felmelegedés emberi tényezők következménye": Az együttesen közel kétszázezer tagot tömörítő Európai és az Amerikai Fizikai Társaság pedig 2009. november 30-án nyilatkozatot tett közzé: „... a klímával kapcsolatos kérdés komplexitása ... nehézzé teszi a pontos előrejelzéseket ..." (News and Informations ..., 2009). Továbbá a Föld évének legfontosabb üzenete: „A Föld környezeti gondjai nem egyszerűsíthetők le egyetlen problémára, a globális felmelegedésre ..." (MTA Hírlevél, 2010. január 28.).

Az Amerikai Geofizikai Unió 2009. évi tizenhatezer résztvevős konferenciáján az emberi tevékenységekből eredő CO_2-okozta globális felmelegedéssel kapcsolatban nemcsak erősen kétkedő álláspontok jutottak kifejezésre, de volt, aki az ügy erőltetését egyenesen a liszenkoizmushoz hasonlította (Szarka 2010).



6.29. ábra. A hőmérséklet és a szén-dioxid változásának arányait érzékeltető diagramok. Teljes skálán ábrázolva a CO_2-koncentráció és a hőmérséklet alakulása az utóbbi 1000 évben, jégzárványok vizsgálatából rekonstruálva, illetve a Hawaiin (Mauna Loa) 1958 óta végzett mérések alapján

A számtalan értékes mérés és nem túl értékelhető modell az „üvegházhatás" (helyesen takaróhatás) bemutatására a CO_2 és a globális hőmérsékletértékek változását nem a teljes értéktartományban, csak a változás legfelső tartományában elemzik, ami szubjektív befolyásolásnak is mondható. A legfontosabb paraméternek, a hőmérsékletnek, és kinagyítva a hőmérséklet-anomáliáknak a bemutatásával érzékelhető, hogy az üvegházgázhatás teljes tartományában az anomáliák mértéke viszonylag kis mértékű. A Föld és a világűr közötti hőcsere szempontból a Kelvin-skála a mértékadó, így ebben a koordináta-rendszerben az arányok még inkább érzékeltetnék a hőmérséklet-változások mértékét.

A könyv szerzőjének állásfoglalása egyértelmű és világos, mert a helyes energetikai döntésekhez alapvető kritérium az e kérdésben való állásfoglalás, újra megismételve:

Elsősorban az energetikánál jelentkeztek kedvezőtlen mellékhatások. Az energetikával szemben bizonyos ellenszenvet generált, de ez csak másodlagos probléma. Helytelen azonban, hogy az energiatakarékossággal összekötötték az ÜHG-csökkentést. Nemcsak a fosszilis energiahordozóból termelt energiával kell takarékoskodni, hanem mindegyik fajtával, a nukleárissal és a megújulóval is (az utóbbi a legdrágább energia, ha sokszor azt mondják is, ingyen van). Jelentős hatás, hogy a gazdasági értékelhetőséget is torzította mind az erőművek létesítése, mind a későbbi üzemeltetési költségek vonatkozásában.

7. Különböző mozgalmak a CO_2-kibocsátás csökkentésére

7.1. Nemzetközi konferenciák és megállapodások

A Föld éghajlata folyamatosan változik. Valamilyen mértékben az emberi tevékenység a globális klímát is befolyásolhatja. Nemzetközi rendezvények, állásfoglalások, ajánlások érzékeltetik a témakör súlyát, komolyságát, valamint széles körű összefüggéseit (Faragó 2011 és 2012).

Konferenciák

1972 – ENSZ-konferencia az emberi környezetről (Stockholm, 1972). A javaslatok szerint mérőállomásokat kell létrehozni az olyan légköri összetevők, tulajdonságok hosszú távú globális trendjeinek megfigyelésére, melyek éghajlatváltozást okozhatnak.

1975 – Helsinki záróokmány 5. fejezete „Környezet: fejleszteni kell az együttműködést a környezetvédelem területén figyelembe véve a Stockholmi nyilatkozatot az emberi környezetről".

1979 – Éghajlati világkonferencia – Nyilatkozat: „a CO_2 légköri mennyiségnövekedése ... feltehetően ... folytatódni fog a jövőben. ... a nagyobb légköri CO_2-mennyiség hozzájárulhat egy globális melegedéshez ... a változások részleteit még alig értjük." (Éghajlati világprogram – WMO, UNEP. UNESCO/IOC, ICSU.)

1979 – Egyezmény a nagy távolságra jutó, országhatárokon átterjedő levegőszennyezésről.

1985 – Egyezmény az ózonréteg védelméről.

1987 – Környezet és Fejlődés Világbizottság jelentése (Brundtland-jelentés, Brundtland Bizottság, 1984–1987). Az éghajlatváltozás kezelésére: megfelelő politikák

kidolgozása és elfogadása az összes környezetileg reaktív vegyi anyagra, melyek emberi tevékenységek által jutnak a légkörbe, s különösen azokra, melyek hatással lehetnek a földfelszíni sugárzási mérlegre; a kormányoknak kezdeményezniük kell olyan egyeztetéseket, amelyek elvezetnek e témában egy egyezmény elfogadásához. Az ENSZ közgyűlési határozata alapján létrehozott Brundtland Bizottság a klímaváltozást a fenntartható fejlődést akadályozó, lassító tényezők közé sorolta. A CO_2-kibocsátás csökkentése nemcsak a légkör védelmét, hanem a véges mennyiségű fosszilis energiahordozók lassított ütemű felhasználását, ezzel a jövő nemzedékek érdekét is szolgálná. A Brundtland Bizottság az alábbi stratégia kialakítását sürgette:

- a kibontakozó jelenségek intenzitásának megfigyelése és értékelése,
- a jelenségek eredetének, működésének és hatásainak alaposabb vizsgálata,
- az üvegházhatást előidéző gázok csökkentését szolgáló, nemzetközileg egyeztetett irányelvek kialakítása.

1987 – Bellagio, Villach, konferenciák: a 0,3 °C/évtized (BAU) helyett 0,1 °C lenne elfogadható/elviselhető; ehhez a fosszilis tüzelőanyagok miatti CO_2-emissziók 40–60%-os csökkentése kellene.

1988 – Torontó, éghajlati világkonferenciák (Torontó, 1988 és Genf, 1990) (politikus–tudós találkozó): Torontói cél: a fejlett államok 20%-os CO_2-kibocsátáscsökkentése 2005-ig. (1989 Nordwijk: mielőbbi kibocsátáskorlátozás). Az itt született állásfoglalások olyan energiapolitikák kidolgozását és megvalósítását szorgalmazták, amelyek csökkentik a légkörbe jutó CO_2 mennyiségét.

1988 – Éghajlatváltozási Kormányközi Testület (Intergovernment Panel for Climate Change, IPCC, 1988) megalakulása, nemzetközi együttműködési intézmény a tudományos eredmények szintézisére a politikaalkotás elősegítése érdekében. Az ENSZ Környezeti Programja és a Meteorológiai Világszervezet 1988-ban közösen hozta létre. Az IPCC keretében tevékenykednek az egész világ éghajlatváltozással foglalkozó szakemberei, több ezer kutató, valamint egyéb szakértő számos tudományterületről. A testület kormányközi jellegű, amelynek dokumentumait a kormányok felhatalmazott képviselői fogadják el konszenzussal (ez nem tudományos módszer) – a tudósok ajánlásainak figyelembevételével. Az IPCC legfontosabb kiadványai az öt-hat évente kiadott értékelő jelentések, amelyek széles körűen szintetizálják a globális felmelegedéssel, illetve az éghajlatváltozással kapcsolatos tudományos ismereteket. Az első ilyen jelentés 1990-ben, a második 1996-ban, a harmadik 2001-ben készült el, a negyedik, az utolsó 2007-ben, és előzetesek már készültek az ötödikből. Mandátum: „... (b) Az éghajlatváltozás és a válaszstratégiák szakpolitikai következményeinek értékeléséhez szükséges információk meghatározása; (d) Az üvegházhatású gáz

probléma minden aspektusának tudományos, illetve környezeti értékelése és ezen értékelések eljuttatása a kormányokhoz annak érdekében, hogy számításba vegyék a társadalmi-gazdasági, fejlesztési és a környezeti programokkal kapcsolatos politikákban." Az 1990-es első értékelő jelentés szerint „az emberi tevékenységekből eredő kibocsátások lényegesen növelik az üvegházhatású gázok légköri koncentrációit. E növekedés erősíteni fogja az üvegházhatást, ami pedig a földfelszín további átlagos melegedését fogja eredményezni."

1988 – ENSZ-közgyűlés: „A globális éghajlat megvédése a jelen és jövő nemzedékek számára": (d) A létező nemzetközi jogi eszközök azonosítása és lehetséges megerősítése, amelyek érintik az éghajlat kérdését; (e) azon elemek meghatározása, amelyeknek be kell kerülniük egy lehetséges jövőbeli nemzetközi klímaegyezménybe."

1990 – A második Éghajlati Világkonferencia (magas szintű politikus–tudós találkozó). Nyilatkozat: kutatások támogatása, az elővigyázatosság szellemében késedelem nélkül kibocsátáskorlátozási intézkedések stb.

1990 – ENSZ-határozat az egyezmény kidolgozásáról.

1991–1992 – Kormányközi Tárgyaló Bizottság: az egyezmény előkészítése (fejlettek, „átmenetiek", fejlődők).

1992 – ENSZ Éghajlat-változási keretegyezmény, ENSZ-konferencia a Környezetről és a fejlődésről (Rio de Janeiro, 1992). Aláírásra került az ENSZ Éghajlatváltozási keretegyezménye, amely 1994-ben lépett érvénybe, és amelyhez valamennyi ENSZ-tagállam csatlakozott. A keretegyezmény kinyilvánította, hogy cselekedni kell az éghajlatváltozás növekvő kockázata miatt, azonban nem adott jogilag kötelező érvényű irányadó számokat és határidőket az egyes országoknak. 1994 hatálybalépés: „univerzális", 192 állam vesz részt.

Jegyzőkönyvek

1995 – Részes felek első ülésszaka: szigorítani kell a kötelezettségeket 2000 utánra (berlini mandátum).

1995–1997 tárgyalások: a jegyzőkönyv előkészítése.

1997 – kiotói jegyzőkönyv. Az iparosodott országok – ezúttal már jogilag kötelezően – átlagosan –5%-os CO_2-kibocsátáscsökkentést vállalnak 2012-ig (2008–2012/1990), nagyon eltérő hozzájárulásokkal.

1997–2001, 2004 egyezkedés a „részletekről" és például az orosz csatlakozásról.

2005 – hatálybalépés; majdnem „univerzális" (191 állam részes a jegyzőkönyvben; az USA nem).

Európai Unió

1991 – rendkívül aktív szerepvállalás mind az egyezmény, mind a jegyzőkönyv kidolgozásában

2000 – külön részletes éghajlatváltozási program (ECCP) elfogadása

2002 – ezzel is összhangban a 6. kutatási keretprogramban az éghajlatváltozás fontos fejezet.

2005 – tárgyalások megkezdése a kiotói jegyzőkönyv kiterjesztéséről, szigorításáról: a fejlett országok nagyobb mértékű kibocsátáscsökkentési kötelezettségei 2012 utánra (AWG-KP).

2006 – Stern-jelentés: közgazdasági érvek.

2007 – IPCC 4. jelentés: még egyértelműbb megfogalmazások az antropogén éghajlatváltozás veszélyéről.

2007 – tárgyalások megkezdése új jogi eszköz (2. jegyzőkönyv) kidolgozásáról 2009-re (Bali Mandátum): erősödő érdekellentétek (és tudományos viták).

2007–2011: a 2012-t követő időszakra vonatkozóan elvi megállapodás abban, hogy a globális hőmérséklet-növekedés ne haladja meg a 2 °C-t. Többek igénye a kiotói jegyzőkönyv kibocsátáscsökkentési időszakának kiterjesztése 2012 utánra („Kiotó-2"), de minden részlet nélkül, és nem készült el a kiotói jegyzőkönyv kiterjesztése, nincs megállapodás a kibocsátáskorlátozásról. A kiotói jegyzőkönyv folytatásában viszont nem vesz részt: Japán, Kanada, Oroszország, USA. 2014-re várható a következő klímatudományi értékelő (IPCC AR5) az újabb megfigyelési és modellezési információkkal; más nemzetközi szervezetek is foglalkoznak az érintett folyamatok jobb megértésével.

ENSZ-konferencia a környezetről és a fejlődésről (Rio de Janeiro, 1992)
A konferencián került aláírásra az ENSZ Éghajlatváltozási keretegyezménye, amely 1994-ben lépett érvénybe, és amelyhez valamennyi ENSZ-tagállam (az Amerikai Egyesült Államok is) csatlakozott. A keretegyezmény kinyilvánította, hogy cselekedni kell az éghajlatváltozás növekvő kockázata miatt, azonban nem

adott jogilag kötelező érvényű irányadó számokat és határidőket az egyes országoknak. Ezen hiányosságok miatt sok bírálat érte a tagállamokat, közöttük is az iparilag legfejlettebbeket. Ezek hatására öt évvel később, 1997-ben Kiotóban találkoztak a szakértők, ahol részleges megállapodás született.

Kiotói jegyzőkönyv (1997)

A jegyzőkönyv a kibocsátások szabályozását érintő kötelezettségeket rögzített, de ezek a fejlett országokra, illetve a piacgazdaságra áttérő, ún. „átmeneti gazdaságú" közép- és kelet-európai országokra vonatkoztak. A fejlődő országok semmilyen jogilag kötelező korlátozást nem fogadtak el, a saját életük kialakításának veszélyeztetése miatt. Az aláírók vállalták, hogy az 1990-es szinthez képest kibocsátásukat átlagosan 5,2%-kal csökkentik a 2008–2012 közötti időszak alatt. A kelet-közép-európai országok eltérhettek a viszonyítási szinttől, így Magyarország esetében ez az 1985–1987 közötti időszak.

Az USA aláírta a jegyzőkönyvet, de az amerikai szenátus nem ratifikálta. Oroszország csak 2004 második felében döntött, hogy csatlakozik a jegyzőkönyvhöz. Ennek következtében a jogilag érvényes kötelezettségvállalást 2005. február 16-tól lehet számítani.

Bali konferencia (2007)

A küldöttek az üvegházhatást okozó gázok hatékony korlátozásáról és a környezetbarát technológiákról tárgyaltak, valamint arról, hogy a legaktívabban szennyező, ám fejlődő országokat milyen módon lehet rábírni a kvóták betartására. A küldöttek igyekeztek felmérni, hogy milyen további lépések szükségesek a 2012-ben lejáró kiotói egyezményt követően. A résztvevőkre jelentős nyomás nehezedett, hogy újabb globális egyezményt hozzanak tető alá az üvegházhatást okozó gázok kibocsátásának mérsékléséről.

A koppenhágai klímakonferencia (2009)

A 2009 decemberében megrendezett konferencia célja volt, hogy egy új, világszintű éghajlat-változási megállapodás szülessen, amely a 2012-ben lejáró kiotói jegyzőkönyv helyébe léphet. Ez nem teljesült. A késedelem sokak szerint hátráltatni fogja a globális fellépést és súlyosbítani az éghajlatváltozás hatásait.

Az Európai Unió éghajlatváltozással összefüggő lépései

Az Európai Éghajlatváltozási Program (ECCP) intézkedései például a következők: az autók üzemanyag-hatékonyságának és az épületek energiafelhasználási hatékonyságának javítása (a jobb hőszigetelés a fűtési költségeket akár 90%-kal is csökkentheti); a megújuló energiaforrások fokozottabb felhasználása, mint például a szél, a napenergia, az árapály energiája, a biomassza (olyan szerves

anyagok, mint a fa, a malomipari hulladék, a növények, az állati ürülék stb.) és a geotermikus energia (a meleg vizű források vagy a vulkánok hője); valamint a szemétlerakóhelyek metánkibocsátásának csökkentése.

Az európai vezetők 2008-ban elfogadtak egy csomagot az éghajlatra és az energiára vonatkozóan, és 2020-ig egy sor célkitűzést határoztak meg. Az EU legalább 20%-kal az 1990-es szintek alá csökkenti az üvegházhatást okozó gázok összesített kibocsátását, és ezt a vállalást 30%-ra növeli, ha más iparosodott országok is vállalják ugyanezt magukra nézve 2020-ra:

- 20%-kal növelik az energiahatékonyságot az EU egész területén,
- 20%-kal növelik a megújuló energia részesedését az energiafelhasználásból,
- a közlekedés területén 10%-ra emelik a bioüzemanyagok arányát.

7.2. Kiotó, Koppenhága, Cancun és Durban

Kiotótól Koppenhágáig

A szén-dioxid eloszlása a légkörben viszonylag egyenletes, ezt a kiváló hazai, hegyhátsáli és K-pusztai mérések igazolják, amelyek nagyon jó pontossággal illeszkednek a nemzetközi adatokhoz.

A kiotói egyezményt az Egyesült Nemzetek Alapokmányának a klímaváltozásról szóló konvenciójaként (UNFCCC) formálisan a partnerek konferenciájának hármas szekciója (COP-3) 1997. december 11-én hagyta jóvá.

A protokollt az I. mellékletben szereplő államok kötelezettségvállalása alapozta meg, amelyek vállalták az üvegházhatású gázoknak (GHG) az 1990-es szinthez képest átlagosan 5,2%-kal történő csökkentését a 2008–2012 évekre. A fejlődő országokra nem kötelező a vállalás. Az egyezmény különböző alternatívákat tesz lehetővé. A hozzájárulás különböző lehet az egyes gázok, ipari szektorok és források tekintetében.

Az alapelemek a következők:

- Az I. melléklet szerint a cél az 1990. évhez képest az 5,2%-os emissziócsökkenés elérése a 2008–2012 évekre.
- Az I. melléklet résztvevői különböző mértékű vállalásokat tettek. (Magyarország a bázisnak 1985–1987-es évek átlagát tekinti.)
- Hat gázra vonatkozik a szerződés (CO_2, CH_4, N_2O, HFC-k, PFC-k, SF_6).
- A források és a csökkentés széles körű feltárása.
- Az I. melléklet szerinti emissziókereskedelem megengedett.
- A „Tiszta Fejlesztés Mechanizmusa" (CDM) megengedi a nem I. melléklet partnereinek a projekttevékenység előnyeinek hasznosítását.
- Nincs a fejlődő országokra kötelezettség, nincs jövő kötelezettségre való fejlesztési fejezet, nincs erőszakolt vállalás.

Az EU tagállamai 1990 évhez képest átlagos 8%-os csökkentést vállaltak a 2008–2012 közötti időszakig. A fejlődő országok közül négy, köztünk hazánk is, az 1990-es bázisszintet megelőző, azaz az 1985–1987 közötti időszak átlagát választotta bázisszintnek (7.1. táblázat).

7.1. táblázat. Az EU 15 szén-dioxid-kibocsátásváltozás vállalása a kiotói jegyzőkönyv mellékletében

Luxemburg	–28%
Dánia	–21%
Németország	–21%
Ausztria	–13%
Nagy-Britannia	–12,5%
Belgium	–7,5%
Olaszország	–6,5%
Hollandia	–6%
Franciaország	0%
Finnország	0%
Svédország	+4%
Írország	+13%
Spanyolország	+15%
Görögország	+25%
Portugália	+27%
EU összesen	–8%

A Magyarország által vállalt 6%-os kibocsátáscsökkentés úgy, ahogyan más államokra is, a hat üvegházhatású gázra vonatkozik (CO_2, CH_4, N_2O, HFC-k, PFC-k, $SF_{6)}$. Az energiaipart elsősorban a CO_2, CH_4, N_2O és részben az SF_6 érinti. A kiotói jegyzőkönyv a partnerek számára széles körű rugalmasságot biztosít a cél elérése érdekében. A mérési lehetőségek bővülése mind újabb és újabb értelmezési problémákat vet fel. A műholdakkal mért hőmérsékletadatok az évek során jelentős oszcillációt mutatnak. A CO_2-emisszió a világon monoton nő.

Ugyanakkor a mérésekkel közvetlen kapcsolatot kimutatni a hőmérsékleti és a CO_2-oszcilláció között nem lehet. A mérések alapján fontos, alapvető megállapítás az is, hogy a légköri szén-dioxid és hőmérsékletértékek között korreláció nincs.

Koppenhága és előzményei

A világméretűvé duzzadt klímaváltozási hisztéria szükségessé tette a helyzet áttekintését. Szükségessé azért, mert a pánik egyre nagyobb, a tudósok megosztottak, a zöld mozgalmak egyre agresszívabbak, a politikusok között vannak hullámlova-

sok, a gazdasági érdekeltségek érdekérvényesítése megerősödött. A kiotói egyezmény kudarca jelen van, nemcsak az árnyékát vetíti előre, ez bebizonyosodott Koppenhágában, óriási médiaintenzitással, gyors lecsengéssel. Nagy a tanácstalanság, mert egy szétesett mozgalom helyi érdekektől vezérelve számtalan gócként él tovább. A valóban fontos, tudományos problémának az utóbbi évtized többet ártott, mint minden korábbi eset. Elsősorban az energetikát érintette kedvezőtlenül a dilettantizmus. Sajnos a tudomány felelőssége az, hogy részben asszisztált ahhoz a felfogáshoz, hogy a szén-dioxid az elsőrendű felelős a klímaváltozásért. Ez az energetika fejlesztésére volt rossz befolyással. A politika felelőssége pedig az, hogy a kapott fegyvert egyesek különleges érzékkel használták kizárólag saját érdekeik érvényesítésére. Gyakorlatilag a helyes döntések lehetetlenné váltak, mert minden energetikai létesítmény valamilyen támadás kereszttüzébe került. Óriási várakozás, általános kiábrándulás, csalódás, ha senki nem is vallja be.

Koppenhágában a COP15 „UN Climate Change Conference in Copenhagen" világkonferenciára 2009. december 7–19. között került sor. Hivatalosan 192 állam vett részt, és helyben több mint 20 000 ember érdeklődése kísérte. A szenvedélyes vitákban vélemények és érdekek ütköztek, tudományos, szakmai vitákra nem került sor. Volt, hogy a viták során a fejlődő országok kivonultak, egyet nem értésüket fejezve ki. Jegyzőkönyv, egyezmény nem született. Végül az USA, Kína, India, Brazília és Dél-Afrika által készített tervezetet, „Copenhagen Accord" (kiegyezés) néven fogadták el záróanyagként. Furcsa konferencia.

Megegyezésre semmilyen hajlandóság nem mutatkozott. A javaslatok szórására jellemző a következő összeállítás (7.2. táblázat). Meg kell jegyezni, hogy a számok összevetésére a részletek ismerete nélkül nem szabad vállalkozni, mert azokhoz alapvető kikötések is tartoznak (pl. Kínánál a GDP-re vonatkoztatott kibocsátás! stb.).

7.2. táblázat. A „Copenhagen Accord"-ban az abszolút emisszióra javasolt változás

Csoport	1990 à 2020 Referenciaalap			
Japán			–25%	
EU	–20	–	–30	
Oroszország	–20	–	–25	
Dél-Afrika			–18	
Új-Zéland	–10	–	–20	
Ausztrália	–4	–	–24	CO_2 LULUCF (Land Use, Land Use Change and Forestry)_
Kanada			–2	
USA			–1,3	
Brazília	+5	–	–1,8	
India	–20	–	–25%	
Kína	–40	–	–45	

A kiegyezés (Accord) összefoglalása

Vajúdtak a hegyek, végül megszületett az „Accord" nevű kisegér: Copenhagen Accord 2009 december 18 (kopenhágai kiegyezés).

Egyetértés az azonnal hatályba lépő „koppenhágai kiegyezésben" (összefoglalás)

1. Megerősítik, hogy a klímaváltozás a jelen legnagyobb kihívásainak egyike. A konvenció teljesíteni kívánja azt a célt, hogy az atmoszférában lévő üvegházgázok koncentrációját olyan szinten kell stabilizálni, hogy megelőzzük a klímarendszerrel való veszélyes antropogén interferenciát, elismerjük azt a tudományos szemléletet, hogy a globális hőmérséklet-növekedésnek 2 °C alatt kell lennie, a méltányosság és a fenntartható fejlődés alapján, kiemelve a hosszú távú közös akciókat a klímaváltozási harcban. Elismerik a kritikákat a klímaváltozásra való hatás és a különösen sebezhető országokra háruló felelősség mértékének vonatkozásában.
2. Mélyen egyetértenek a globális emisszionak a tudomány és az IPCC negyedik jelentésében meghatározott korlátozásában. Úgy kell korlátozni a globális emissziót, hogy a globális hőmérséklet-növekedés 2 °C alatt maradjon.
3. A klímaváltozással kapcsolatos ellentétes hatásoknak és a felelősség mértékére való potenciális befolyásnak a feldolgozása minden államnak jelentős kihívást jelent.
4. Az I. függelék résztvevői egyénileg vagy együttesen, a gazdasági lehetőségeknek megfelelő, 2020-ra kitűzött emissziós célt és az I. melléklet szerint az I. függelék résztvevőjeként 2010. január 31-ig a titkárságnak megküldik INF dokumentumban való összegzésre.
5. Az I. nem függelék résztvevők mérsékelt akcióit a II. mellékletben küldik meg a titkárságnak 2010. január 31-ig.
6. Elismerik, hogy az emissziócsökkentéssel kapcsolatban vívott harcban döntő szerepe van az erdőirtásnak és az erdőlepusztulásnak, továbbá fokozni kell az üvegházgázok emissziójának az erdők általi lekötését.
7. Döntöttek a különböző megközelítésekről, úgymint a piaci, a költséghatásos és támogatási akciók alkalmazásáról.
8. További új lehetőségek kerültek felvázolásra, úgymint a fejlett országok a konvenciónak megfelelően lehetőséget és támogatást biztosítanak az erdőirtás és az erdőlepusztulás általi emissziócsökkentésre való hatás kezelésére, a technológiai fejlesztés, a transzfer és a kapacitásbővítés növelésére.
9. Végül, alakul egy Magas szintű Panel, amely a résztvevők konferenciáját vezeti és felelős a tanulmányokért.
10. Döntöttek egy Koppenhágai Zöld Klíma Alap létrehozásáról, amely a finanszírozás operatív szerve lesz.

11. A fejlesztések és a technológiai transzfer felgyorsítására Technológiai Mechanizmus néven alapítottak egy intézményt. A kiegyezést a teljesítés lehetőségének a felmérése céljából teljessé kell tenni 2015-re a konvenció végső céljainak figyelembevételével.
12. Figyelembe kell venni a tudomány által bemutatott különböző tanulmányokkal alátámasztott, hosszú távú célok megerősítését, beleértve az 1,5 °C-os hőmérsékletnövekedés lehetőségét is.

Koppenhágában több mint 120 államfő, köztük Barack Obama amerikai elnök és Gordon Brown brit miniszterelnök is megjelent. A koppenhágai egyezményt egyetlen ország sem írta alá, csupán „tudomásul vette".

Cancun

A mexikói Cancunban 2010. november 29. és december 10. között a munkacsoportok kéthetes tárgyalássorozata, majd a kétnapos, magas szintű megbeszélések után döntöttek arról, hogy csökkentik az üvegházhatást növelő gázok kibocsátását, és az ipari forradalom előtti szinthez (!) képest legfeljebb 2 °C-kal lehet magasabb a Föld átlaghőmérséklete. Ezen túlmenően vizsgálják azt is, miként lehet az értéket 1,5 fok alá szorítani később. A megállapodás szerint a fejlett országok 2020-ig 25–40 százalékkal csökkentik a gázok kibocsátását 1990-hez képest. Ez utóbbi vállalás már a kiotói egyezményben is szerepelt, de az Egyesült Államok nem csatlakozott a szerződéshez. A mexikói Cancunban egyeztettek az ENSZ éghajlatváltozási keretegyezménye (UNFCCC, United Nations Framework Convention on Climate Change) részes feleinek 16. konferenciáján (COP16) arról, hogy miként folytatódjék a klímaváltozás elleni küzdelem 2012 után, amikor lejár a kérdést szabályozó egyetlen nemzetközi szerződés, a kiotói jegyzőkönyv. A megállapodást sikerült tető alá hozni, döntöttek a kiotói jegyzőkönyv meghosszabbításáról, de a részletekről nem. Az EU már a cancuni tárgyalásokat megelőzően, a koppenhágai klímacsúcson is azt hangsúlyozta: az üvegházhatású gázok kibocsátását 20 százalék helyett 30 százalékkal is mérsékelné 2020-ig – 1990-es bázison – akkor, ha a többi ország is ezzel összemérhető, szigorúbb vállalásokat tesz az éghajlatváltozás elleni harcban.

Jelentős előrelépés az elemzők szerint, hogy Cancunban megegyeztek a tagországok: segítik a fejlődő államokat klímavédelmi erőfeszítéseikben. Felállítják a Zöld Klíma Alap nevű testületet, amely a gazdag országok pénzét kezeli majd. Az Európai Unió, az Egyesült Államok és Japán 100 milliárd dollárt áldoz a célra évente, egy 30 milliárdos gyorssegély mellett. Az összeget három évig a Világbank kezeli. Az alap 24 fős vezető testületében a fejlődő és fejlett országok mellett a kisebb szigetországok képviselői is helyet kapnak, amelyeket a leginkább érint a kímaváltozás. Létrejön továbbá a Klímatechnológiai Központ és Hálózat, amely tanácsokkal, tudással segíti a fejlődő országokat.

A klímavédelmi csúcs résztvevői által aláírt dokumentum szerint a tagállamok többet tesznek az erdőirtás ellen, illetve felszólít az őslakosok jogainak tiszteletben tartására is. A szén-dioxid-piacok kiterjesztése ugyanis nem segít az éghajlatvédelemben. Az EU kibocsátáskereskedelmi rendszere (EU ETS) nem csökkentette a kibocsátásokat, és akadályozza más, hatékony eszközök bevezetését. Az Európai Uniónak kivásárlás (offsetting) nélkül kellene 40%-kal csökkentenie kibocsátásait 2020-ra – 1990-hez képest.

Az EU a klímacsúcson másfél napnyi plusztárgyalással elérte legfőbb célját: a részt vevő felek megállapodtak egy új, jogilag kötelező erejű szerződés létrehozatalában, amelynek részleteit 2015-ig dolgozzák ki, elsősorban a következő évek klímacsúcsain, és amelynek rendszere 2020-tól lépne hatályba. A három legnagyobb kibocsátó, az USA, India és Kína pedig továbbra is ellenállást tanúsított.

Többek emlékeztettek arra is, hogy már létezik egy kiotói jegyzőkönyv, amely eddig sem váltotta be a hozzá fűzött nagy reményeket, és éppen ezért kérdéses, szükség van-e egyáltalán a folytatásra. Kína nem lát előrelépést, hiszen a leginkább érintett és egyben felelős államoknak húsz év alatt sem sikerült a kibocsátásokat a megfelelő szintre hozniuk. Az USA nem hajlandó globális, kötelező erejű szerződést aláírni a kibocsátások csökkentésével kapcsolatban, míg a fejlődő országokban sem mutatkozik jelentős csökkenés. Mexikóban arra számítottak, hogy előkészítik az utat ahhoz, hogy a dél-afrikai klímacsúcson végre megszülethessen egy valódi egyezmény.

Általános vélemény szerint az egységes ENSZ-keretegyezmény elavult. „Minden állam azon igyekszik, hogy a kibocsátásait csökkentse, viszont ezt mindenki a maga módján teszi – az USA-nak saját programja van, akárcsak az EU-nak vagy Kínának. Meg kell határozni néhány méltányossági és átláthatósági alapelvet".

A mexikói klímacsúcs magas szintű megbeszélésein összesen mintegy 25 000 kormányzati képviselő, üzletember, szakértő, lobbista és kutató vett részt több mint 190 országból.

Durban

Mexikó után 2011-ben az ENSZ 17. globális klímacsúcsát a dél-afrikai Durban városában tartották november 28. és december 9. között (Váczi 2011). A tagországok közül csaknem 190 állam képviseltette magát, és a tanácskozás fókuszában a 2012-ben lejáró kiotói jegyzőkönyv jövője, egy jogi alapokon nyugvó új megállapodás és egy világméretű klímaalap felállítása állt.

A kiotói jegyzőkönyv folytatása mindenképpen a négy fejlett állam (Japán, Kanada, Oroszország, USA) nélkül készülhet el. Kínának van klímavédelmi programja, de a mind több szenes erőmű és az ott is rohamosan terjedő motorizáció mellett legfeljebb a kibocsátások növekedésének mérséklése lehetséges. A fejlett országok számára teljesíthetetlen és elfogadhatatlan feltételekkel tette meg javaslatát. A legtöbb fejlődő állam kibocsátási része pedig az összes kibocsátásban nem jelentős.

A klímacsúcsra kitűzött fő, bár nem túl erőteljes célok teljesültek. Az ENSZ tagállamai megállapodtak abban, hogy 1. 2015-ig aláírnak egy, a fejlett és fejletlen országokra egyaránt vonatkozó, kötelező érvényű egyezményt a globális kibocsátások csökkentésére vonatkozóan, amely 2020-tól lép életbe; 2. lesz folytatása a kiotói jegyzőkönyvnek és a hozzá kapcsolódó CO_2-kvótakereskedelmi rendszernek; 3. létre fogják hozni a zöld klímaalapot a fejlődő országok megsegítésére.

Kiotó meghosszabbítása komoly ellenállásba ütközött a már említett országok miatt. A világ két legnagyobb kibocsátója, az Egyesült Államok és Kína még az eredeti megállapodást sem ratifikálta, továbbá több állam, így Oroszország, Japán és Kanada már a tanácskozás előtt bejelentette: csak akkor hajlandó megújítani kötelezettségvállalásait, ha Kína és Amerika hajlandó csökkenteni kibocsátását. A feltörekvő államok pedig követelik, hogy a jelentős kibocsátónak számító fejlett országok vállaljanak nagyobb áldozatot.

A tengervízszint emelkedése miatt legveszélyeztetettebb szigetországok már a konferencia megnyitója előtt egy közös közleményben követelték, hogy sürgősen szülessen egy klímavédelmi megállapodás. Szerintük a legkiszolgáltatottabb országok elárulásával ér fel, hogy a legnagyobb kibocsátók megpróbálják halogatni a megállapodást.

7.3. Eredmények és kudarcok

Az utóbbi évtizedek és a kiotói egyezmény tapasztalatainak elemzésével a jövőbeni teendők meghatározására Koppenhágában 192 ország részvételével és a Cancunban megtartott konferenciák eredményeit értékelve, a következőkben részletezett megállapításokra lehet jutni.

A földi élet minden területére hatással van a klíma változása, ezért elsőrendűen fontos, hogy a vele kapcsolatos megállapítások és intézkedések tudományosan korrektül megalapozottak legyenek. A lehetséges változások feltárásához és a kedvezőtlen hatások elkerüléséhez szükséges intézkedések megtalálása minden szakterületen elsőrendű kutatási feladat.

Megállapítható, hogy a mozgalom az utóbbi évtizedekben elért számos jelentős részeredménye mellett, a helyes iránytól lényeges eltéréseket és torzulásokat is produkált. Több helyütt a tudományos csőlátás, politikai és gazdasági érdekek befolyásának érvényesülésével az intézkedéseket nem megfelelően választották meg. Ezt sajnálatos módon a nagy elismerést nyert (Nobel-díj) IPCC segítette. Az IPCC eljárási rendjének előnye, de hátránya is van. Elnökének, Rajendra K. Pachaurinak megfogalmazásában: „Az IPCC erőssége az általa követett eljárásrendszerben rejlik. A legfontosabb képessége, hogy szigorú, alapos tudományos felismerésre képes, hogy a jelentéseket – miután azok átmentek a kormányok képviselőinek nagyon alapos ellenőrzésén – kormányok fogadják el. Nincs más olyan szervezet

a világon, amely képes volna ezt a kettős követelményrendszert egyidejűleg kielégíteni".

Ez a módszer vezetett a kiotói egyezmény eddigi sikertelenségétől a koppenhágai Accordig és a jelenlegi bizonytalanságig. Két alapvető problémát hozott felszínre:

1. Az IPCC-ben a tudományos elemzés a tudósok zárt körét jelentette, amely kinevezte magát a világ tudós többségének. Ennek megfelelően érvek helyett csak a tudománytól idegen konszenzusos többséggel értek el konkrét paraméterekben is (hőmérséklet) megállapodásokat.
2. A világ jelenlegi társadalmi és gazdasági helyzetét és a fejlődési lehetőségeket nem megfelelően vették figyelembe.

A két megállapítást kissé részletesebben megvilágítva, elmondhatjuk, hogy az IPCC-elemzésben részt vevő 2500 személy csak egy részének tevékenysége kapcsolódik a klímakutatáshoz, és jelentős számban újságírók, politikusok, jogászok és számos más szakma képviselői is, akiknek a szerepe fontos, de nem a téma tudományos vizsgálataiban. A széles nyilvánosság előtt nem szereplő, de a megállapításokat vitató tudósok száma esetleg meg is haladja a magukat többségnek deklarált IPCC-tagok létszámát (Nature: A kutatóintézetektől és egyetemektől ezerszámra érkeztek Koppenhágába a konferenciához a vitatkozó e-mailek).

A klímakutatásban az egyes jellemzők mérési pontossága meglehetősen korlátozott, és nem mindig egyértelműen meghatározott (így a legfontosabb, a globális hőmérséklet sem, földfelületi, földközeli levegő, troposzféraközép stb.), ezért nem meggyőző, ha a legnagyobb felkészültségű kutatóhelyek eredményei között azonos bemenő paraméterek esetén is a változások prognosztizált adatai között az arány többszörös érték. Valóban ez az elérhető legnagyobb pontosság, de nem ad alapot határozott tudományos megállapításokra. Főleg nem szép, ha évtizedekre visszamenőleg még korrekciót is végeznek (pl. űrszonda-pályamódosulás). Konkrétan tehát a szén-dioxid és a globális hőmérséklet-emelkedés szoros kapcsolatát (számtalanszor korrelációt említenek) és főleg a mértékét nem lehet tudományosan alátámasztani. A Föld termikus egyensúlya megköveteli a napállandó által meghatározott beeső energiamennyiség biológiai és vegyi folyamatok által le nem kötött részének a világűrbe való visszasugárzását.

A napállandóval a légkör határára egyensúlyi hőmérséklet számítható. A földi jellemzőkkel létrejött visszasugárzásból számított egyensúlyi hőmérsékletnek meg kell egyeznie a besugárzási egyensúlyi hőmérséklettel. A légkör gázösszetevőinek koncentrációváltozása a sugárzásokból abszorbeált energia mennyiségét változtatja, tehát a réteghőmérséklet-eloszlás változhat, az alsóbb rétegeknél kisebb hőmérséklet-növekedés léphet fel. A sztratoszféra hőmérséklete mérésekkel igazoltan jelentősen csökken. A hőmérséklet-változások mértéke jelentős hibával határozható meg. Egyedül a szén-dioxid-koncentrációváltozás mérhető viszonylag pontosan,

és a fizikai törvényeknek köszönhetően az elméleti, a fizikai paraméterekre való globális hatása jól számítható. Egyéb földi jellemzők hatásának mérési és számítási bizonytalansága igen nagy.

A másik fő probléma a kiotói egyezmény tízéves tapasztalata alapján vált világossá. Az egyezményben aláírt vállalásokat éppen a fejlett országok nem teljesítették. Az EU 15 fejlett országa a vállalt 8%-os csökkentés helyett 2%-ot teljesített, Kanada semmit. Az érdekellentétek a jövőben még nagyobbak lesznek, mert minden különösebb magyarázat nélkül megállapítható, és ki is kell mondani, hogy az ázsiai fejlődés (elsősorban Kína és India) az újabb ÜHG-csökkentési terveket lehetetlenné teszi. A koppenhágai konferencián bizonyos látszatvállalásokra születtek javaslatok, de még azok sem kerültek elfogadásra. Különösen fontos tehát a szén-dioxid hatásának reális megítélése a jelenlegi jelentősen eltúlzott mérték helyett.

A mozgalmak eddigi tevékenysége eredménytelensége mellett bizonyos szakmai és gazdasági torzulásokhoz is vezetett.

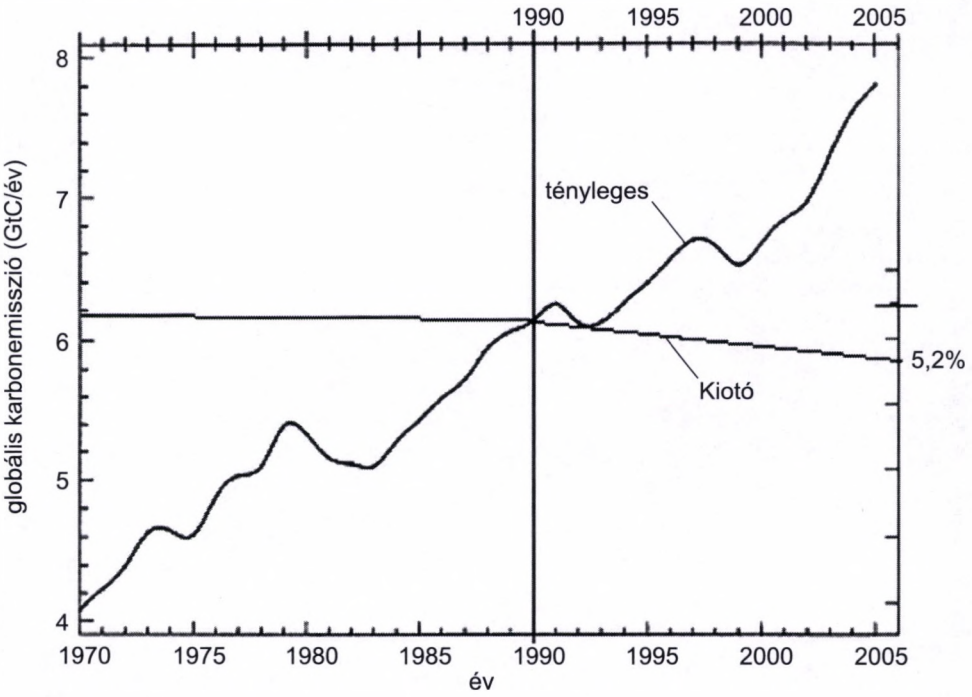
Jelentős hatás, hogy a gazdasági értékelhetőséget is torzította, mind az erőművek létesítése, mind a későbbi üzemeltetési költségek vonatkozásában. A szén-dioxid-adó bizonyos körök vagyonszerzéséhez jó jövedelemforrássá vált, de az alapproblémán nem változtat, mert a kibocsátók kvótát vásárolnak és tovább bocsátanak ki, a fogyasztó meg fizet. A villamosenergia-iparban a kvótavásárlás többletköltséget okoz, ami a villamos energia árában megjelenik. Az ingyen kvóták megszüntetésével, de a szén-dioxid-adó megmaradásával még lényegesebb árnövekedés várható.

Az energetikát letudva még kényesebb területen kezdeményeznek félreértelmezett korlátozási tevékenységet az „ember okozta klímaváltozás" ellen küzdő mozgalmak. Már nemzetközi szinten is elég hangos javaslat az étkezési szokások szabályozására való törekvés. Az IPCC elnöke a második fontos szennyező, a metánkibocsátás korlátozását az eddigieken túl a húsfogyasztás korlátozására terjesztené ki. Ez elsősorban a kérődzők tartására vonatkozik, a szarvasmarha-állomány csökkentésére.

E tudományos véleménynyilvánítás célja, hogy a klímaváltozással kapcsolatos problémák tisztább megvilágításba kerüljenek. A tudományos megállapításokat ne konszenzussal, hanem érvekkel támasszuk alá. A döntéseket tudatosan lehessen meghozni. A helyes célokat ne megtévesztő érvekkel, hanem korrekt felvilágosítással és érdekeltség létrehozásával érjük el. A lehetséges nemzeti előnyöket a valóság ismeretében és ne hamis elméletek gyártásával használjuk ki.

Kiotótól egyenes út vezetett Koppenhágáig. A kiotói egyezmény ismert, az „eredmény" a következő: A jegyzőkönyv aláírása óta történtek egy tájékoztató számítással jól bemutathatók. 1990-ben a légkörben a CO_2-részarány kb. 355 ppm, és a CO_2 összes tömege $2{,}71 \cdot 10^{12}$ tCO_2 volt. Az 1990 és 2005 évek között az összes kibocsátott mennyiség $367 \cdot 10^9$ tCO_2 volt. A kiotói vállalásnak megfelelően az éves kibocsátás értékét 5,2%-kal kellene csökkenteni 2010–2012-ig, így 2005-ben $343{,}5 \cdot 10^9$ tCO_2 mennyiséggel növekedhetett volna a kibocsátott összes tömeg a

$367 \cdot 10^9$ tCO_2 értékkel szemben. A mért adatok 383 ppm értéket mutattak. A világ egészére szemlélteti a 7.1. ábra a Kiotó „eredményét".

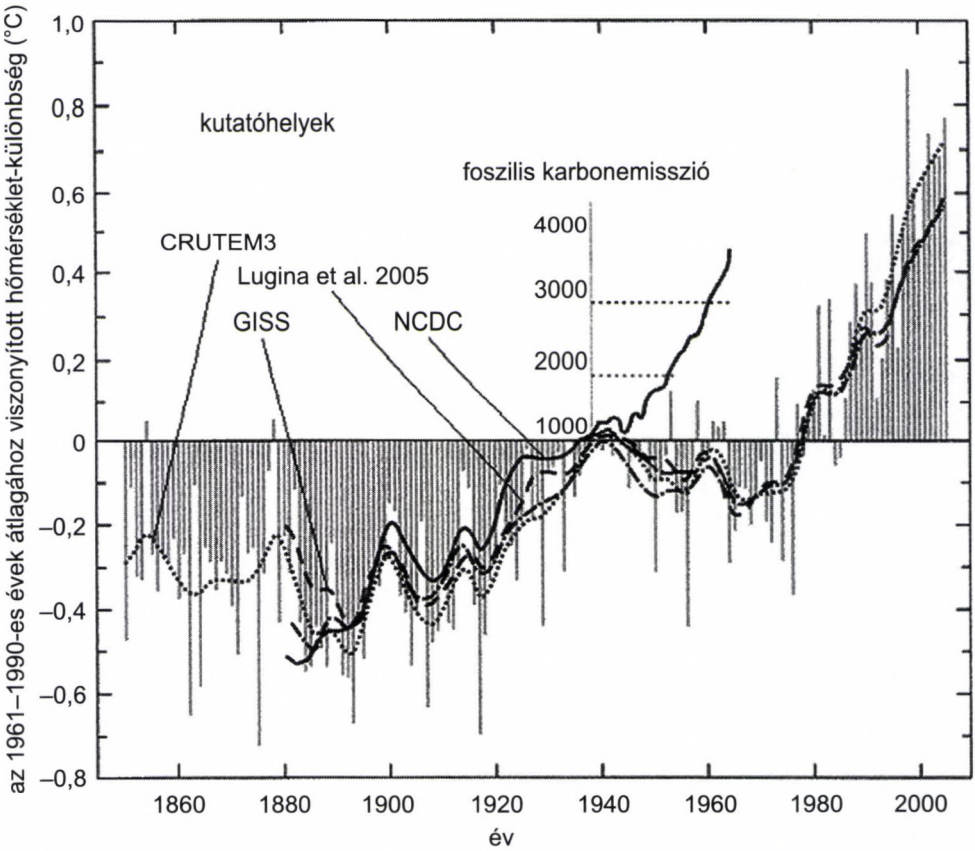


7.1. ábra. A kiotói vállalás és a „teljesítés", figyelembe véve a világ teljes karbonkibocsátását

A legnagyobb probléma a megegyezések feltételeinek megalapozatlanságában van. A fosszilis energiahordozók jövőbeni szerepe, Kína és India fejlődése, a természeti közvetlen (megújulók) drágasága és korlátai stb. eleve átgondolatlanságot tükröznek.

Még súlyosabb probléma a reális, tudományos megalapozottsága annak, hogy a szén-dioxid (üvegházgázok) korlátozásával elérhető érdemi beavatkozás az éghajlatváltozásban. A CO_2 hatása a gáztörvények, Planck- és a Beer-törvénnyel a reálisan várható pontossággal számítható. Számításaink szerint az évszázad végéig a felmelegedés 1°C alatt marad. Természetesen az IPCC 4. jelentés hatalmas kutatási anyaga rendkívül értékes. A mérési adatokat azonban többször korrigálják, a különböző prognózisokban több száz százalékos az eltérés (1,4–5,8 °C). Ezeket az adatokat nem szabadna a földi élet minden területére kiható döntésekre felhasználni. Elsősorban hiú remény a szén-dioxid-emisszió csökkentésére alapozni az időjárás-változás elkerülését.

Nem szabad korrelációról beszélni a légkör szén-dioxid-tartalma és a globális hőmérséklet között. Hosszabb időszakokra is lehet példát találni ennek ellenkezőjére. Ilyen például az 1940-es és 1970-es évek közötti időszak (7.2. ábra).



7.2. ábra. A globális hőmérséklet és a karbonkibocsátás, különös tekintettel az 1940 és 1965 közötti időszakra

A 7.2. ábra a Föld felületének hőmérsékleti anomáliaértékeit mutatja az 1850-es évektől az 1990-es évekig. A viszonyítási alap az 1961–1990-es évek átlaga. Látható, hogy 1940 és 1965 között a légköri szén-dioxid mennyisége növekszik, ennek ellenére a globális hőmérséklet csökken.

7.3. táblázat. A globális karbonmérleg (GtC/év) (negatív érték a légkörből kiválik)

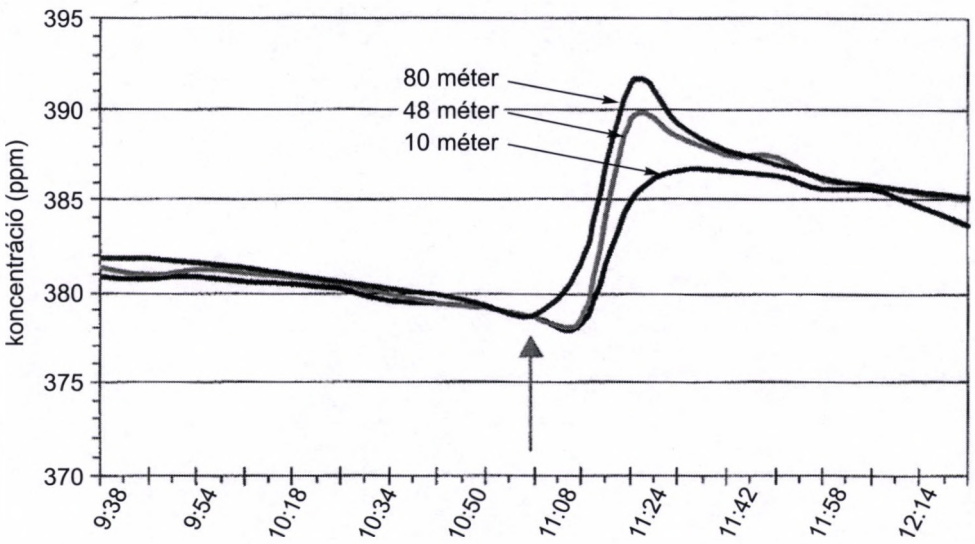
	1980-as évek	1990-es évek	2000–2005
A légköri növekedés	3,3 ± 0,1	3,2 ± 0,1	4,1± 0,1
Fosszilis karbonemisszió	5,4 ± 0,3	6,4 ± 0,4	7,2 ± 0,3
Óceán és légkör között	–1,8 ± 0,8	–2,2 ± 0,4	–2,2 ± 0,5
Talaj és légkör között	–0,3 ± 0,9	–1,0 ± 0,6	–0,9 ± 0,6

1 GtC megfelel 3,67 CO_2-nek

A teljes földi rendszer nagy elemei között az együttműködés nagyon intenzív. A 7.3. táblázat adatokat tartalmaz néhány olyan évtizedre, amikor már az egyes értékek eléggé megbízhatónak mondhatók.

A valóságban a a Föld légkörére használt globális hőmérsékletérték egy nagyon keveset mondó, átlagos jellemző. A légkörre vonatkozó részletes ismeretek azért az utóbbi évtizedekben jelentősen bővültek. Vonatkozik ez az egyik ténylegesen legfontosabb paraméterre, a rétegekben a hőmérséklet-eloszlásra és a rétegek kémiai összetételére is.

A szén-dioxid és a légköri hőmérséklet közötti kapcsolatot leginkább a fizikai-kémiai törvényekkel lehet meghatározni, és az egyszerűsített „globális hőmérséklet" számítása kevesebb hibát rejt magában, mint a bonyolult, számtalan bizonytalan részletből összeállított modellek. A modellekben figyelembe vett számos paraméter közül a CO_2-értéket kezelik kitüntetett helyen, azért, mert ez a leginkább „törvényt követő" paraméter. Ezt igazolja az, hogy a légköri CO_2-tartalom a teljes Földön a körülményekhez és a mérési pontosságot tekintetbe véve viszonylag közeli értékeket mutat. Ezt, a 7.3. ábrával, csupán példaként bemutatva, a néhány évtizede K-Pusztán és Hegyhátsálon végzett folyamatos kitűnő mérések is igazolják (Tarczay, Lengyel 2002).



7.3. ábra. A CO_2 alakulása egy hidegfront áthaladása során 10, 48 és 80 méter magasan. A nyíl jelöli az ábrán a front megérkezését.

A modellek fontos szerepe a részletek megismerésében van, amit számos példával lehet alátámasztani. Rossz diagnózis felállításával azonban a kívánt cél elérése nem lehetséges.

A kiotói vállalásnak megfelelően az éves kibocsátást 5,2%-kal kellene csökkenteni 2010–2012-ig, így 2005-ben $343{,}5 \cdot 10^9$ tCO_2 mennyiséggel növekedhetett volna a kibocsátott összes tömeg. A számítások szerint a részarány 45 ppm-mel és ezzel 400 ppm-re növekedne. A természeti elnyelést hasonló 50%-ra véve fel, a légkörben $127{,}1 \cdot 10^9$ tCO_2 a többletfölhalmozódás $216{,}4 \cdot 10^9$ tCO_2 lenne. A részarány 28 ppm-mel növekedett volna, vagyis 383 ppm érték lenne, azaz annyi, mint a jelenlegi érték.

A kiotói vállalás szerinti csökkentés menetét 1990–2090 időtartamra kiterjesztve a 6,4 GtC/év (23,5 $GtCO_2$/év) kibocsátás érték 100 év múlva 3,75 GtC/év-re csökkenne. A 100 év alatti összes (507,6 GtC), azaz 1908,6 $GtCO_2$ kibocsátásból 1202,4 $GtCO_2$ halmozódik fel a légkörben. Ezzel a mennyiséggel a légkörben a CO_2 részaránya 355 ppm-ről 512,2 ppm-re növekedne.

A kiotói vállalás nélkül, ha csupán a jelenlegi szinten tartanánk a kibocsátást, azaz 23,5 $GtCO_2$/év állandósulna, úgy 100 év alatt 2348,8 $GtCO_2$ kibocsátott tömegből 1480 $GtCO_2$ maradna a légkörben. A légkörben a CO_2 részaránya 549 ppm lenne. Kiotó hatása mindössze 549 – 512 = 37 ppm-csökkenést jelentene.

A CO_2-koncentrációnövekedés miatti hőmérséklet-emelkedést a Föld felületére felírt a mérlegegyenlettel is lehet vizsgálni. A gázréteg közbeiktatása miatt magasabb hőmérsékletnek kell lennie a földfelületen, hogy a beeső sugárzásnak megfelelő energiamennyiségnek a világűrbe való visszasugárzása megtörténjék. A CO_2 sugárzásgyengítési hatásával számolt légköri hőmérséklet-változás adja a körülményekhez képest leghasználhatóbb adatokat. Egy közelítő számítás elvégezhető a Planck- és a Beer-törvény alkalmazásával (7.4. táblázat).

7.4. táblázat. A légköri szén-dioxid mennyiségének a hőmérsékletre gyakorolt hatása, $S = 1385$ W/m^2; $T_e = 279{,}5$ K alapértékek figyelembevételével

CO_2		pl	a_g	ε_g	T_e
ppm	tömeg%	m.bar	Beer-koefficiens		K
280	0,0425	2,17	0,65	0,114	287,8
350	0,053	2,7	0,69	0,122	288,6
450	0,068	3,5	0,736	0,13	289,4
500	0,076	3,9	0,755	0,133	289,6
600	0,091	4,64	0,785	0,138	290,1

Az alapelgondolás:

$$a_g = 1 - e^{-kpl}$$

$$k_{CO_2} \approx \frac{0,8}{\sqrt{pl}}\left(1-0,38\frac{T}{1000}\right)=\frac{0,712}{\sqrt{pl}} \text{ ------ > } Mitor$$

$$a_g = 1-e^{-0,712\sqrt{pl}}$$

$$a_g = \varepsilon_g \sigma$$

$$\varepsilon_g = \frac{a_g}{\sigma}$$

ahol

S a napállandó W/m^2

pl a Föld felületére redukált CO_2-rétegvastagság és a nyomás szorzata m.bar

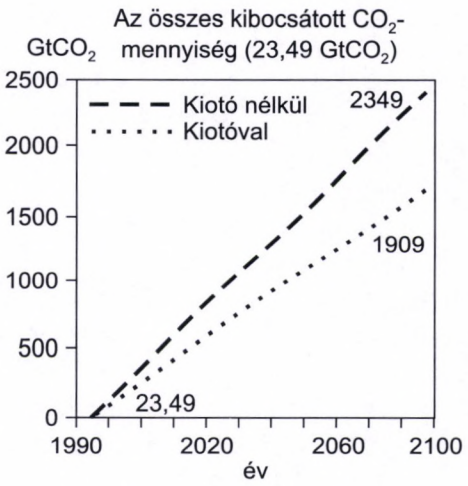
a_g a CO_2 rétegen áthaladó sugárzás intenzitásának gyengülése

ε_g a CO_2 relatív emissziós tényezője (a sugárzásgyengülésből és a fekete test sugárzási tényezőjéből számítva)

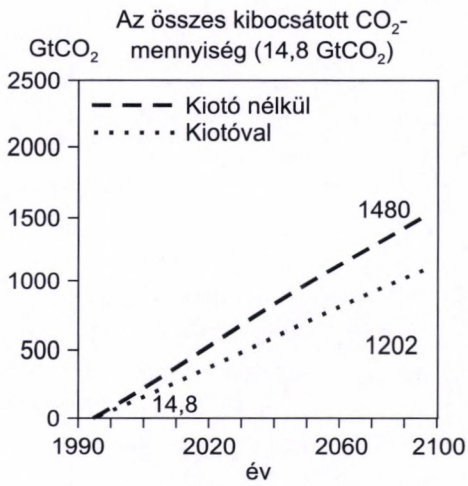
T_e a Föld felületén a hőmérséklet.

A számítások alapján, tehát Kiotóval és Kiotó nélkül is körülbelül 1 °C hőmérséklet-emelkedés írható a szén-dioxid rovására. Ez, ha nem is elhanyagolható, de nem okozhatja a jelzett katasztrofális éghajlatváltozásokat. A szén-dioxidra alapozva tehát nem érhető el az éghajlat változásában prognózisként (inkább jóslatként) jelzett rendkívüli események bekövetkezésének elkerülése.

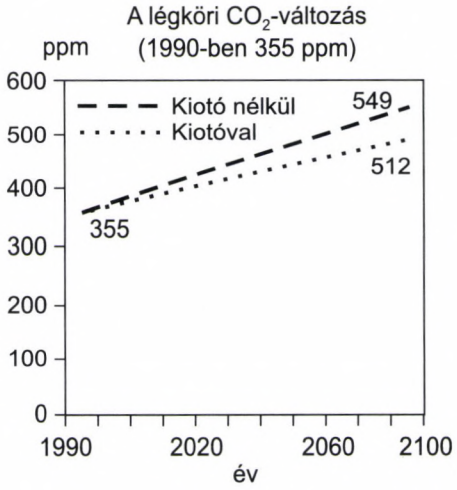
Kiotó hatását a 7.4., 7.5., és 7.6. számított ábra érzékelteti.



7.4. ábra. Kiotó értékelése I.



7.5. ábra. Kiotó értékelése II.



7.6. ábra. Kiotó értékelése III.

Az EU tagállamokat különbözőképpen csoportosítva, a 7.5. táblázat összefoglalja 1990-es és 2005-ös időszakra, az egyes csoportokra vonatkozó tényleges kibocsátási adatokat.

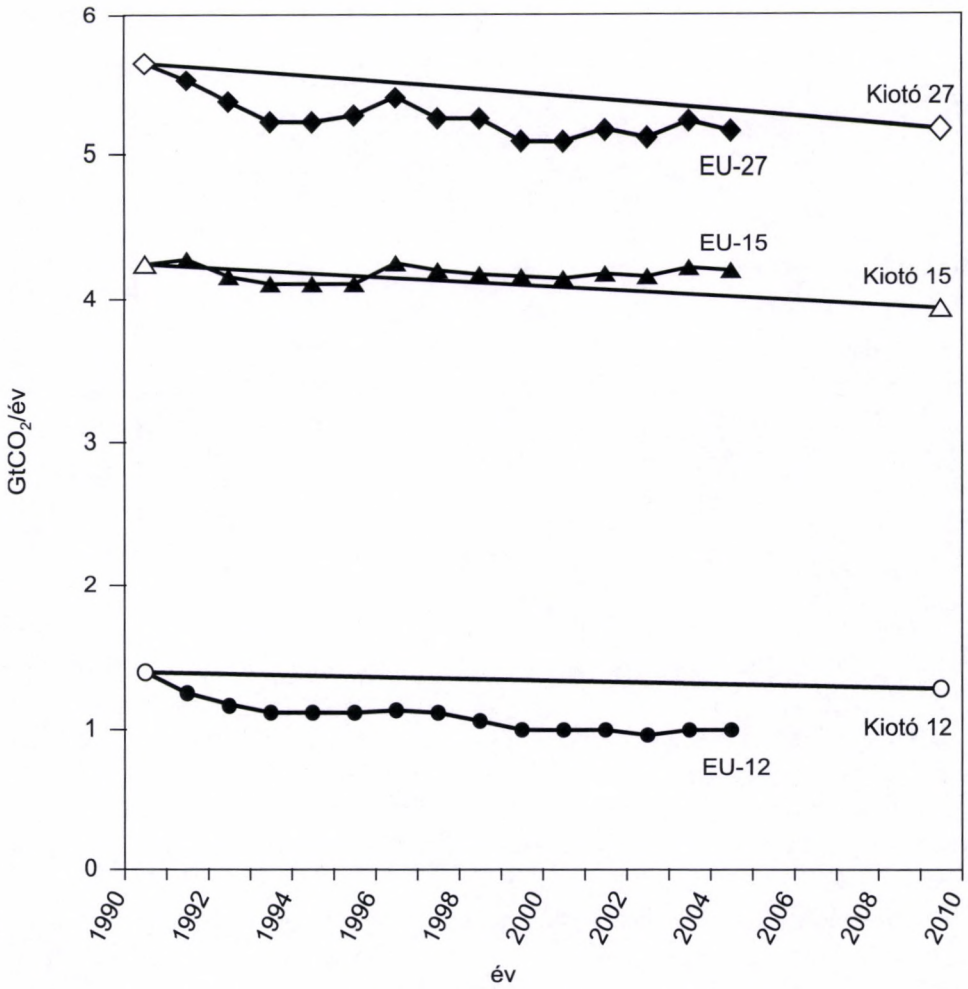
7.5. táblázat. Az EU tagállamainak CO_2-kibocsátási adatai

Tag-államok	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
EU-27	5,621	5,509	5,324	5,210	5,199	5,249	5,371	5,262	5,213	5,098	5,100	5,155	5,111	5,215	5,21	5,177
EU-15	4,257	4,269	4,180	4,111	4,108	4,148	4,232	4,169	4,184	4,122	4,134	4,180	4,155	4,222	4,227	4,192
EU+12	1,364	1,240	1,144	1,099	1,091	1,101	1,139	1,093	1,029	0,976	0,966	0,975	0,956	0,993	0,988	0,985

Valóságban éppen az EU fejlett államai közel sem teljesítették vállalásaikat (a vállalt 8% csökkentés helyett 2%), és csak a felvett új tagállamok iparának leállításai miatt egyszeri nagy csökkentésével közelítették az EU-felajánlást.

A 7.8. ábra mennyiségi adatokat tartalmaz, kiemelve külön az EU-15 értékelésére.

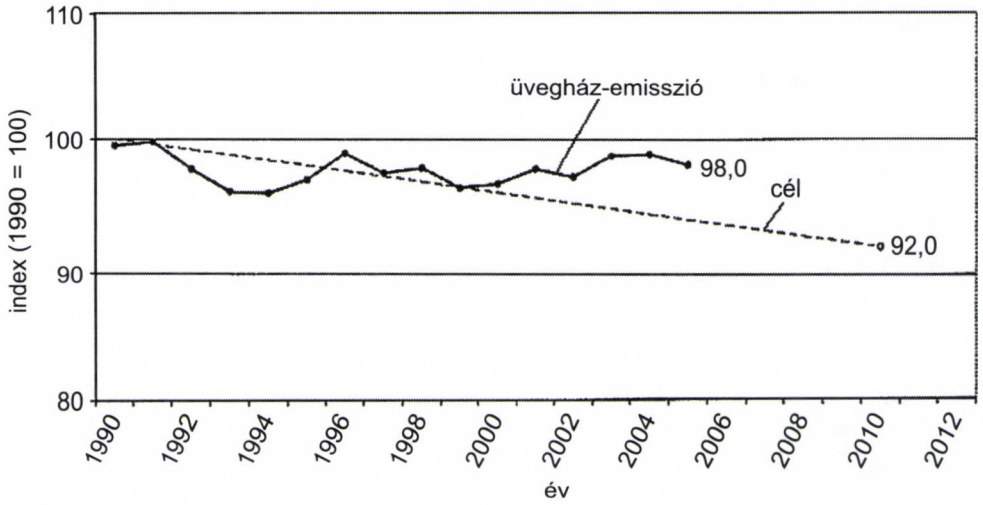
Az EU-országok az eddigi legjelentősebb nemzetközi szerződést nem tudták teljesíteni. Ezen belül is minimálisan teljesítettek a fejlett országok. Világviszonylatban még kedvezőtlenebb a helyzet. Az ázsiai államokban, Kínában, Indiában és a Föld számos fejlődő országában az előttünk lévő évszázadban a fosszilis energiahordozók maradnak az uralkodó energiaforrások. A fejlődésüket nem is lehet, de erkölcstelen lenne megállítani. Ezért van jelentősége annak, hogy kíséreljük meg reálisan értékelni, a szerző javaslata szerint elfogadni az emberi tevékenység által



7.7. ábra. Kiotó összefoglaló értékelése. Az EU-országok CO_2-kibocsátása

okozott légköri hatásokat, nevezetten a szén-dioxid okozta mérsékelt felmelegedést és a természet rendje szerinti klímaváltozásra felkészülni.

A közvélemény formálásában erőteljesebben fellépők a klímaváltozással kapcsolatos jóslásokkal a társadalomban már-már pánikhangulatot hoztak létre. Széles körben elterjedt, hogy gyakorlatilag egy paraméter, (az üvegházhatású gázok) a szén-dioxid-koncentráció növekedése felelős döntően a klímaváltozásért. A modellek túl nagy hőmérséklet-tartományban engednek mozogni. Egyszerű modellel nagyobb pontosság és reális célkitűzés érhető el. Az eddigi nemzetközi egyezmények kudarcot vallottak, és a jövőben még kevésbé várható az eddigi eljárások sikere. A feladat: reális értékek meghatározása és az alkalmazkodásra felkészülés.



7.8. ábra. Az EU-15 „teljesítésének" részletes bemutatása. Az EU-15 üvegházemisszió-változása 1990 és 2005 között, összehasonlítva a 2008–2012-re kitűzött céllal

A cancuni klímacsúcson meg kellett volna határozni az elfogadhatónak tekintett globális hőmérséklet-emelkedés értékét. Meg kellett volna állapodni a csökkentéshez szükséges eszközök köréről. Egyezségre kellett volna jutni a szükséges eszközök pénzügyi terhei megosztásának alapjairól is. Ebből semmi nem teljesült. Nincs széles körű egyetértés a maximum 2 °C „elfogadható" hőmérséklet-emelkedésről. Az eszközök között elsősorban a technokrata megoldások, köztük a legkevésbé kívánatos föld alatti szén-dioxid-tárolás (az ún. CCS) került a középpontba, különösen a fejlődő országok esetében.

A klímatárgyalások eredménytelensége arra utal, hogy nem eléggé meggyőzőek az érvelések, az egyes országok rövid távú részérdekeinek felülkerekedése a teljes nemzetközi klímavédelmi folyamat kudarcával fenyeget.

8. A fosszilis tüzelőanyagoknak tüzeléssel való hasznosítása

A tüzelőberendezések kialakításánál és üzemeltetésénél ellentétes hatásokkal (tüzeléstechnikai paradoxonokkal) kell szembenézni. Ezen paradoxonok nem elméleti jellegűek, hanem az energiafejlesztéssel szemben támasztott igények kielégítésekor felmerülő ellentétes jellegű hatások. A fosszilis energiahordozók energetikai hasznosításában különösen markáns változást a környezetszennyezés-csökkentés igényének igen erőteljes megjelenése hozott. A kén-dioxid- (SO_2), a nitrogén-oxidok (N_xO_x), a szén-monoxid- (CO) és a a szén-dioxid- (CO_2) kibocsátás csökkentése került leginkább előtérbe.

A tüzelés rendkívül bonyolult fizikai-kémiai folyamatában nem lehet különválasztani az egyes paramétereknek az égési folyamatra és az égéstermékek egyes alkotóinak mennyiségére gyakorolt hatását. Ennek ellenére a paradoxonok néhány részeleme külön elemezhető.

Az egész tüzelési folyamatot paradoxonok jellemzik.

A szénportüzeléskor biztosítanunk kell a stabil gyulladást, majd az égést, úgy, hogy minél kevesebb környezetszennyező anyag keletkezzék. A gyulladási és az égési folyamat szempontjából kedvező, ha minél magasabb hőmérsékleti szinten történik. A tüzelési folyamat legkritikusabb szakasza a tűztérbe belépő tüzelőanyag gyulladása. A gyulladási feltételek kialakulásában a tüzelőanyag fizikai-kémiai tulajdonságainak és a környezeti viszonyoknak lényeges szerepük van. A tüzelőanyagok gyulladása adott körülmények között az általuk meghatározott hőmérsékleten megy végbe.

A tüzelőanyag a gyulladáshoz szükségesnél általában alacsonyabb hőmérsékleten jut a tűztérbe, így felmelegítéséhez hőközlés szükséges. A hőközlés módjai:

– sugárzás,
– forró égéstermékek visszaáramlása.

A különböző hőközlési módok szerepe még nem egyértelműen tisztázott, de alapvetően szükséges, hogy a tüzelőberendezésben a forró égéstermékek visszaáramolhassanak. A visszaáramlás történhet a láng külső felületén is, de a korszerű égőknél – különösen szénhidrogén-tüzelés esetén – a lángban a belső recirkulációs mag létrehozásához ún. lángstabilizátor szükséges.

A recirkuláció által kialakított áramlás több ellentétes hatáson keresztül változtatja a tűztérbe áramló tüzelőanyag gyulladási és égési viszonyait. Ezek közül a legfontosabbak:

– a turbulens gyulladás sebességváltozása,
– a visszaáramló égéstermékek.

N_2, CO_2, H_2 stb. befolyása, a hőközlés és a gyulladás szempontjából:

– a recirkulációs zóna méretének változása,
– az égési gázok visszaáramlása.

A recirkuláció mértékének növekedésével a még gyulladás előtti éghető gáz és égési levegő keverékéhez magas hőmérsékletű égéstermékek keverednek. A gyulladási hő biztosítására kedvező, ha egyrészt a visszaáramló égéstermékek mennyisége nagyobb, másrészt azok hőmérséklete is minél magasabb. Ezek szerint a viszonyok a recirkulációs zóna hosszának a gyulladás szempontjából kedvezően változnak, mivel az égés előrehaladottabb állapotában (egy maximális értékig) a láng hőmérséklete magasabb.

A recirkulációs zóna hosszának növekedésével azonban a visszaáramló gázok inert gáztartalma (N_2, CO_2, H_2O) is növekszik, ami viszont a gyulladási viszonyokat rontja, és egy határértéken túl esetleg a gyulladás teljes megszűnéséhez vezet.

A recirkulációval az égési folyamat kezdeti szakaszából származó, már égő alkotóknak a tűztérbe belépő tüzelőanyagokhoz való visszaáramlása és keveredése is bekövetkezik. Ezek az égő lángelemek a gyulladás előtt álló keverékben gyulladási gócokat képezve a láng tovaterjedése szempontjából kiindulási pontokat jelentenek.

Szénportüzeléskor a gyulladási stabilitás döntően függ a szénfajtától. A legnagyobb hatása a szén illótartalmának van. Általános tapasztalat, hogy azonos egyéb körülmények mellett, az illótartalom növekedése kedvezően befolyásolja a gyulladási sebességet. Azonos illótartalom mellett is a szénfajtától függően különbségek lehetnek. A levegőoxigénnel bejuttatott nagy mennyiségű nitrogén miatt a szén teljes elégéséhez szükséges levegőmennyiségnél kisebb értékkel lehet elérni a legkedvezőbb viszonyokat. A tiszta oxigénben való tüzeléssel összehasonlítva, az illótartalomtól függően az elméleti levegőmennyiségnél kisebb értéken lép fel maximális hőmérséklet.

Régebbi szakkönyvekben található olyan megállapítás, hogy a szénportüzeléskor bevezetett primer levegő mennyisége az illó égéséhez szükséges levegőmennyiséggel egyezzék meg. Más könyvekben az általában ennél nagyobb értéket adó, az illószázalékkal azonos százalékos arányban jelölik meg a primer levegőmennyiséget

A teljes égésfolyamatot tekintve a korábbi javaslatok mindenképpen felülvizsgálatra szorulnak. A tüzelőanyag teljes elégési folyamatában ismerni kell a szénpor gyulladási feltételeit, a lángterjedési sebességet, és ennek alapján kell meghatározni a primer levegőre vonatkozó előírásokat is.

A teljes égésfolyamatot vizsgálva a primer levegőadagolást a korábbiakhoz képest alapvetően más szemléletben kell meghatározni. Az NO_x csökkentéséhez az égési levegőt az égés során több fokozatban kell bevezetni. Olaj és gáz együttes tüzelése esetén megállapítható, hogy a gáz az oxigént a jobb keveredési viszonyok miatt nagy intenzitással felhasználja, majd az olajcseppek égésekor már lényegesen kisebb koncentráció áll oxigénből rendelkezésre, esetleg oxigénhiány lép fel. Ugyanez fokozottabb mértékben vonatkoztatható a szénpor égésére is. Az égési levegővel jól keveredő illó alkatrészek nagy sebességű égése játszódik le, az oxigént elfogyasztják, és nem kielégítő mennyiségű levegő esetén a visszamaradt szilárd alkotók nem gyulladnak meg. Ez elkerülhető a megfelelően elosztott levegőadagolással. A szénpor égésének kezdeti fázisában tehát a szerző által bevezetett, ún. kettős gyulladás elmélete vezet helyesebb eredményre. Ennek bevezetésével tehát a szénporsugár égésében alapvetően legalább két indulási folyamat is fellép, a feladat a folyamatnak a folytonossá tétele. Ha a primer levegő mennyiségét úgy állítják be, hogy az az illó égéséhez legyen elegendő, úgy a kedvező keveredési viszonyok miatt a gyorsan elégő illó azt gyakorlatilag teljes egészében el is fogyasztja, és az egyébként nehezebben gyulladó és égő szilárd maradék kedvezőtlen körülmények közé kerül. A láng viszonylagos folyamatossága ezen a szakaszon oxigén hiányában megszakadhat, és esetleg csak az égéstermékekben a szén gázosodási folyamatai léteznek. Ezek szerepe természetesen szintén jelentős az égésfolyamat további szakaszában. Az új tüzeléstechnikával a szénkomponensek külön elégését kell elkerülni, amit a levegőadagolással lehet elérni. A szilárd maradék újragyulladásának a folyamat megszakadása nélkül kell bekövetkeznie. Itt jut szerephez a levegő több fokozatban történő bejuttatásának hatásossága. Ismeretesek azok a nehézségek, amelyek a már magas hőmérsékletet elért égéstermékek és hidegebb közegek keverésekor fellépnek a nagymértékű viszkozitáskülönbségek miatt. Erre tekintettel kell az áramlási viszonyokat kialakítani.

A bevezetett kettős vagy többszörös gyulladás új szemlélete tehát elsősorban a levegő adagolásának oldaláról jelent változást. A teljes égésfolyamaton belül szemlélve a gyulladást, a levegőmennyiség elosztásánál a szénfajtától függően kell a primer keverék összetételét megválasztani. A javasolt megvalósításánál azonban

lényegesen nagyobb a szerepe a levegő-előmelegítés véghőmérsékletének. Alacsony levegő-előmelegítési hőmérsékleteken az illóégés szakaszainak jelentősége elsősorban a keverék felmelegítése szempontjából jelentős. Ekkor természetesen a teljes égéshez szükséges mennyiségnél kevesebb primer levegő adagolása indokolt lehet, mert az illóégéskor felszabadult hőmennyiség tudja csak a tűztérben a keverék kellő hőmérsékletét biztosítani.

A tűztér méretének szempontjából kedvező lenne a magas tűztérhőmérséklet, de NO_x keletkezése miatt inkább az azonos hőleadást biztosító, hosszabb égési tartományban az átlaghőmérséklettel kell operálni. A tüzelőanyagból felszabadított hő átadása a tűztérben a körfolyamat munkaközegének nagyrészt sugárzással történik, amely folyamat az abszolút hőmérséklet negyedik hatványával arányos. Nehezen uralható ellentmondás az, hogy magasabb tűztérhőmérsékletnél a tűztér és a nagy hamutartalmú szenek tüzelésekor a tűztér elpiszkolódása lényeges, mert a hőátadást rontja, továbbá azonos teljesítmény eléréséhez nagyobb méretű tűzteret kell biztosítani.

Az utóbbi évtizedek környezetvédelmi szempontjainak előtérbe kerülése, a minél magasabb hőmérsékleten jó tüzelőanyag-levegő keveredést biztosító tüzelés képletét gyökeresen megváltoztatta, a tüzeléstechnikát komoly ellentmondások elé állította. A hatékony tüzelőanyag-hasznosítás mellett a környezetet szennyező anyagok kibocsátásának minimalizálása is feltétel lett. Ez értendő a szilárd és gáznemű szennyezőkre egyaránt. A szilárd szennyezők leválasztása alapvetően megoldott, tüzeléssel csak néhány különleges technológiával lehet a szennyezés csökkentését befolyásolni. Alapvetően módosítja azonban a tüzelés korábbi szempontjait a gáznemű szennyezők (nevezetten a kén-oxidok és nitrogén-oxidok) csökkentésének, illetve behatárolásának igénye. A tüzelőanyag kéntartalma régi problémája az energetikának. A tüzelőanyagból a füstgázba kerülő kén-oxidok leválasztására igen nagyszámú eljárást dolgoztak ki. Széles körben általában a mészkő-adalékanyaggal történő leválasztás nyert alkalmazást. Az adalékanyagokkal történő kéntelenítési módszerek lényege az, hogy porított, bázikus hatású anyagokat fúvatnak az égéstérbe, amelyek az égés során képződő, savanyú kén-oxidokat többé-kevésbé megkötik.

Kezdetben, miután a mészkőadalékok nagyobb mértékben kötik meg az SO_3-ot, mint a SO_2-ot, és az SO_2–SO_3 konverzió aránya az olajtüzeléseknél lényegesen nagyobb, mint a széntüzeléseknél, ezeket a módszereket elsősorban olajtüzelésű kazánoknál alkalmazták.

A későbbiekben kiderült, hogy ezek a megoldások más tüzelőanyagoknál is alkalmazhatók, és az eljárás elve igen egyszerű. A természetes mészkő alkalmazása esetén két fő reakció zajlik le. A befúvott kalcium-karbonát kb. 700–900°C hőmérsékleten gyorsan kalcium-oxidra és szén-dioxidra bomlik:

$$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$$

Ez az ún. kalcinálás a legfontosabb alapfeltétel mészkőadagolás esetén, mert a kéntelenítés gyakorlatilag csak ebben az aktivált állapotban lehetséges.

A kéntelenítési reakció, amely 800–1000 °C hőmérsékleti tartományban igen gyorsan zajlik le, az alábbi egyenlettel fejezhető ki:

$$SO_2 + CaO + 1/2\,O_2 \rightarrow CaSO_4$$

Magas hőmérsékleten, redukáló környezetben

$$CaSO_4 + CO = CaO + CO_2 + SO_2.$$

Az egyenletből kitűnik, hogy ha a sztöchiometrikus arány 1, akkor 1 kg kén lekötéséhez 1,75 kg CaO szükséges.

A nedves eljárásoknál a mészkövet vagy „oltott" meszet a kazán második huzamában elhelyezett reaktorba vezetik. Az aktiváló reaktor a villamos pernyeleválasztó előtt van elhelyezve, a füstgázhőmérséklet ezen a helyen 200 °C alatt van. A végtermék kalcium-szulfit, kalcium-szulfát és egy kevés kalcium-hidroxid száraz keveréke.

A kénleválasztást a relatív nedvességtartalom és a Ca/S mólarány befolyásolja.

A teljes folyamatot befolyásoló legfontosabb tényezők:
- a mészkő fajtája,
- a mészkőőrlemény finomsága,
- a befúvásnál lévő hőmérséklet,
- a tűztéri hőmérséklet-eloszlás,
- a tüzelőanyag kéntartalma.

Az adalékanyagos kéntelenítés szempontjából korszerű módszernek tekinthető a fluidizációs tüzelés. Ennek alapja az, hogy a megfelelő szemnagyságra aprított szén fluidizált állapotba hozható, ha alája egyenletes elosztásban megfelelő nyomású levegőt vezetünk.

A fluidizáció fenntartása érdekében a fluidréteg hőmérsékletét nem szabad 700–850 °C fölé emelni, mert ekkor a szén hamuja összesülhet. A fluidréteg hűtését elpárologtató csőrendszerekkel, a füstgáz további lehűtését pedig konvektív fűtőfelületekkel lehet elérni.

A fluidizációnak előnye a kénmegkötési lehetőség. A megfelelő fluidágymagasság tartása érdekében esetleg inert, nem éghető anyagokat is adagolnak. Ez az inert anyag lehet homok, de jobb például a mészkő vagy a dolomit, amikor is a szén éghetőkén-tartalma felszabadulva mindjárt meg is kötődik az adalékanyagban.

A fluidizációs tüzelésnél tehát a tüzelőanyagból felszabaduló SO_2, illetve SO_3 szulfátok formájában kötődik meg (túlnyomó részben $CaSO_4$ továbbá $MgSO_4$,

Na_2SO_4 stb.). Primeren keletkeznek szulfitok is (pl. $CaSO_3$, $MgSO_3$ stb.), ezek azonban az izzítási hőmérsékletek során szintén szulfátokká alakulnak.

A fluidizációs tüzelésnél a kén lekötésére közvetlenül a tűztérben nyílik lehetőség. E technológiánál különösen jól hasznosítható a szénhamu kénlekötő képessége és az adalékanyag.

A kénlekötéshez elsősorban a szénhamu mészkőtartalma járul hozzá, és adalékanyagként is leggyakrabban mészkövet használnak. A mészkő adagolási módjára többféle megoldás létezik. A legegyszerűbb a tüzelőanyaggal történő előzetes összekeverés, de létezik külön mészkőbevitel is.

A kémiai reakciók és a fizikai folyamatok itt is viszonylag egyszerűen leírhatók:

hevítés

$$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2 + 169 \text{ kJ / mol},$$

$$CaO + SO_2 + 1/2\,O_2 = CaSO_4 - 474 \text{ kJ/mol}.$$

A fluidágyban a kéntelenítéshez ideális hőmérséklet 800–900 °C között van.

A fluidizációs tüzelésnél a kéntelenítés magában a fluidágyban történik, de jelentős szerepe van különösen a finom szemcsék által történő kénlekötésben a „freeboard"-nak (tűztér).

A fluidizációs rendszerben a kénmegkötést számos paraméter, de a konstrukció is befolyásolja. A legfontosabbak:

- a tüzelőanyag típusa és szemcsézete,
- a mészkő reaktivitása és szemcsézete,
- az ágyhőmérséklet,
- a tüzelőanyag-adagolás kialakítása,
- a leválasztóciklon hatékonysága,
- a pernye-visszavezetés,
- a légfelesleg,
- a primer és szekunder levegő megoszlása,
- a gáz tartózkodási ideje.

Az adalékanyaggal, nevezetesen a mészkővel történő kénlekötés azonban a kedvező hatás mellett ellentmondásokat is tartalmaz. Az adalékolás paradoxona:

- rontja a tüzelőanyag gyulladását,
- az égési reakciót hátráltatja (több meddő),
- növekszik a szilárd szennyező mennyisége,
- magas tűztérhőmérsékleten a kalcinálódási folyamat eredményeként túlégetett mész keletkezik,

– magas tűztérhőmérsékleten a $CaSO_4$ visszaalakulása lép fel,
– a keletkezett CO_2 rontja az égést,
– a hőveszteség nő,
– a salakosodási veszély nő,
– nedves eljárásnál a távozó füstgázveszteség növekedése, hatásfokcsökkenés.

A megfelelő mértékű kénlekötés eléréséhez a kénmennyiségnek megfelelő sztöchiometrikus aránynál nagyobb mértékben kell adalékanyagot betáplálni A füstgáz-kéntelenítés nedves eljárásainál a Ca/S arány közel esik az 1-hez, míg fluidizációs tüzelésnél 1,5– 2.

A szükséges adalékanyag-mennyiség függvényében az adalékolási paradoxon egyes elemei különböző súllyal esnek latba.

Az adalékanyag a tüzelőanyag hamutartalmához hasonlóan fejti ki kedvezőtlen hatását, mind a gyulladásra, mind pedig az égésre. A nagyobb kéntartalmú szeneknél a mészkőigény jelentős, a hamu mennyiségével összemérhető értékű lehet. Példaként egy 230 t/h teljesítményű kazánnál (az Oroszlányi Erőműben) eltüzelt szén paramétereit figyelembe véve:

A szén fűtőértéke	10,4 MJ/kg
A szén kéntartalma	3,5%
A szén hamutartalma	43,0%
A hamu CaO-tartalma	14,0%
A Ca/S arány	3,0
A mészkő $CaCO_3$-tartalma	95,0%
Adagolandó $CaCO_3$	0,23 kg/szén

A hamutartalom növekedése meghaladja az eredeti 50%-át. A kénlekötés kémiai reakciója endoterm és exoterm reakciókból áll. A felmelegítés és hőbomlás hőigénye

$$20 \rightarrow 950\ ^\circ C$$

$$1\ kg\ CaCO_3 \rightarrow 0{,}5603\ kg\ CaO + CO_2 - 2774\ kJ$$

$$0{,}5603\ kg\ CaO + SO_2 + \tfrac{1}{2}\ O_2 \rightarrow CaSO_4 \frac{+\ 5862\ kJ}{+\ 3088\ kJ}$$

Egységnyi súlyú mészkő a felmelegedés, kalcinálódás és kénmegkötés során tehát 3088 kJ hőt fejleszt. A valóságban azonban a kalcinálással működő kénlekötéseknél a mészkőfelesleg miatt, míg a nedves eljárásoknál a füstgázveszteség növekedése miatt általában hőveszteség lép fel.

Mind a tüzeléssel összekapcsolt kéntelenítési eljárások, mind a fluidizációs tüzelés kedvező abból a szempontból, hogy a kazán konventív huzamába kerülő füstgáz

már nem tartalmazza a kén-oxidokat. Ezzel a füstgáz harmatpontja csökken, közel a vízharmatponthoz, így lényegesen csökkenthető a távozó füstgázhőmérséklet és ezzel a füstgázveszteség is. Ez különleges, korrózióálló fűtőfelületek beépítése nélkül érhető el.

Problémát jelent azonban, hogy a hatásos kénleválasztáshoz a kalcináló hőmérsékletet nagyon gondosan kell megválasztani. A 700–850 °C közötti hőmérséklet a legkedvezőbb a folyamat hatékonysága szempontjából. Ezt a fizika-kémiai hőbomlási függvények igazolják. Ugyancsak káros a magas tűztéri hőmérséklet a $CaSO_4$ stabilitására. A lekötött kén-dioxid a gipszből Ca keletkezése mellett ismét felszabadulhat.

$$CaSO_4 + CO = CaO + CO_2 + SO_2$$

Az adalékanyag növeli a gyulladás hőmérsékletét. Érdekes új eleme az adalékolási paradoxonnak a szénből, illetve a mészkőkalcinálásból keletkezett CO_2 kölcsönhatása. A szénből keletkezett CO_2 rontja a kalcinálódási folyamatot, míg a kalcinálódás során keletkezett CO_2 rontja az égési folyamatot. E kölcsönhatás tüzeléstechnikai hátránya a tüzelés során végzett kénlekötésnek.

A kalcinálódásból keletkezett CO_2 többlet CO_2-t jelent.

A szennyezések csökkentése növeli a villamosenergia-költségeket.

A keveredési folyamat paradoxona az, hogy az égésnél a tüzelőanyag oxidációjához az oxigén és a tüzelőanyag minél jobb keveredését lenne jó biztosítani. A gyakorlati tüzeléstechnikában azonban ezt nem lehet egyetlen szempontként kezelni, mert ez esetben a káros szennyező anyagok keletkezésére is tekintettel kell lenni. Az oxigén intenzív keveredése a tüzelőanyaggal a különböző paramétereken keresztül (hőmérséklet-, gáz- és szilárdanyag-koncentrációk stb.) leginkább a nitrogén-oxidok mennyiségét befolyásolja. E hatás is azonban több ellentmondást tartalmaz.

A konvencionális szénportüzelésnél megfigyelték, hogy a szénporőrlemény finomodásával a keletkezett nitrogén-oxidok mennyisége csökken.

A tüzelésnél keletkező nitrogén-oxidok mennyiségét a füstgázban és a tüzelőanyagban lévő alkotók között létrejövő reakciók befolyásolják. A hőmérséklet a termikus NO_x, a füstgázösszetétel a tüzelőanyagban lévő nitrogénből keletkező NO_x-mennyiségét befolyásolja.

A finomabb szénporőrleménynél magasabb tűztérhőmérséklet keletkezik, de mégis alacsonyabb az NO_x mennyisége. Ezen ellentmondás magyarázatát a heterogén reakció folytán a tüzelőanyag-szemcse környezetében kialakult viszonyokban kell keresni. A léghiányos tüzelés a tüzelőanyag nitrogénből keletkező NO_x mennyiségét csökkenti. A szemcse és az égési levegő keveredése feltehetően a finomabb szénszemcse relatív nagy felülete következtében fellépő gyors reakció elfogyasztja az oxigént, és léghiányos környezet alakul ki. Ez a hatás, bár érdeklődésre tart

számot, nem elegendő az NO_x-kibocsátás csökkentéséhez. Az NO_x csökkentését a teljes tüzelőtérre kiterjedő égési levegő- és tüzelőanyag-adagolás több fokozatra osztásával biztosíthatjuk. A tüzelés egyes szakaszaiban léghiányos tüzelést valósítunk meg, amely eljárással elsősorban a tüzelőanyag NO_x-keletkezését tudjuk megakadályozni. E keveredésirányítás azonban több ellentmondást is okoz, eltekintve a hőmérséklet-csökkenés miatti reakciósebesség-csökkenéstől és a tűztéri hőleadás fajlagos csökkenésétől.

A sztöchiometrikus oxigén-tüzelőanyag arány alatti érték mellett tökéletlen égés megy végbe, és jelentős CO keletkezik, amelynek későbbi eltüzeléséről gondoskodni kell. Ez egyrészt hőveszteséget, másrészt egy másik kellemetlen környezetszennyezést okozna. Ezért mind a szénpor-, szénhidrogén-, mind pedig a fluidizációs tüzelésnél további levegőadagolási fokozatokat iktatnak be. A léghiányos tüzelés visszahat még a kénleválasztásra is. A CO jelenléte a $CaSO_4$-ből SO_2-visszaalakulást is okozhat.

Az NO_x csökkentesével tehát a tüzelés más paramétereinek romlása léphet fel.

Globális paradoxonként jelentkezik, hogy a tüzeléstechnika fejlesztése bizonyos mértékben okozhat problémát a környezetnek globális mértékben is, mert a légkör vegyi összetételét a szén-dioxid-koncentráció növekedése módosítja.

A légkör összetételének alakulásában szerepe van az emberi tevékenységnek, így az energetikának is. Az energetika szempontjából különösen néhány gázzal kell számolni, amelyek növelve az üvegházgázok mennyiségét, kihatnak a teljes környezetre. Az üvegházhatású gázok közül a legfontosabbak:

– a szén-dioxid (CO_2),
– a metán (CH_4),
– a nitrogén-oxidok közül elsősorban a N_2O,
– az ózon (O_3)
– a freonok (CFC-k).

Ha a hatásukat egymással összevetjük, akkor a 8.1. táblázatban látható értékeket kapjuk.

8.1. táblázat. A különböző üvegházgázok sugárzásgyengítő hatásának összehasonlítása

Üvegházhatású gáz	Tényező
Szén-dioxid	1
Metán	27
Dinitrogén-oxid(N_2O)	165
Freon-12	17 700

A CO_2 az energetikával legszorosabb kapcsolatban lévő gáztermék, de az N_2O szerepe is növekszik.

Az új technológia önmagában is hozhat ellentmondást. Míg a szénportüzesnél N_2O-képződéssel nem kellett számolni, az új szennyező anyag a cirkulációs fluidizációs tüzelésnél a tüzelőanyag nitrogénjéből a viszonylag alacsony hőmérsékleten és redukáló körülmények között képződni képes. E gáz üvegházhatását jellemző indexe a CO_2-nek kb. 165-szöröse. E fejlesztési ellentmondást a technológia megválasztásával (másodlagos hőfelszabadítás) részben fel lehet oldani.

A keletkezett CO_2 mennyiségének csökkentésére a következő legfontosabb lehetőségek állnak rendelkezésre

- energiahordozó megválasztása,
- az energiatermelés és -fogyasztás hatékonyságának növelése,
- a CO_2 lekötése,
- a CO_2 letárolása.

Az energiahordozó megválasztása technikailag és gazdaságilag jelentősen korlátozott lehetőség. E korlátok mellett egyéb szempontok is jelentős szerepet játszanak, mint például a vízenergiánál az ökológiai hatás, nukleáris energiánál a biztonság stb.

A további lehetőségek a jelenlegi technikai szinten a következők:

a) Az energiafejlesztés folyamatában:
- szénportüzelés +füstgáz-kéntelenítés,
- IGCC + CO integrált elgázosító kombinált ciklus,
- O_2/CO_2-tüzelés (szénpor, cirkulációs fluid, nyomás alatti fluid)
- „topping ciklus",
- tüzelőanyag-cella (fuel cells)
- magneto-hidrodinamikus folyamat.

b) A CO_2-leválasztásban:
- kémiai eljárás,
- fizikai eljárás,
- nyomásos adszorpció,
- membrános eljárás,
- kriogéntechnika.

c) A CO_2-tárolásban:
- geológiai: felhagyott bányák, víztároló,
- mélyóceáni elhelyezés,
- biokémiai konverzió.

A szénnek gazdaságosabb és környezetbarát hasznosítása szükségessé tette, hogy keressék a lehetőséget a jó hatásfokú körfolyamatokban történő felhasználására. A gázturbinák fejlődésével ilyen lehetőséget a gáz-gőz körfolyamatok nyújtanak, így igen lényegessé vált az elgázosítási eljárások fejlesztése is.

A kombinált gáz-gőz ciklussal a következő előnyök érhetők el:
- magas hatásfok és a tüzelőanyag lehető legjobb kihasználása,
- széles tartományban változó szénminőséget lehet hasznosítani,
- a környezetszennyezés mértékét lényegesen csökkenteni lehet,
- a vízigény és vízveszteség csökken,
- a hőszolgáltatás kedvezően megoldható,
- a költségek csökkennek.

A szénfelhasználással létesített kombinált ciklusok szénelgázosítással és enélkül is megoldhatók. A szénelgázosítás nélküli kombinált ciklusnál a tüzelőanyagot olyan nyomáson és hőmérsékleten tüzelik el, hogy az a tisztítás után közvetlen a gázturbinára vezethető. A tisztaszén-technológiákkal elérhető hatást

A szénelgázosítás legfontosabb reakciói:

Reakció:	Reakcióhő/DH (kJ/mol)
$C + H_2O = CO+H_2$ (vízgáz)	+135,1
$C + 2H_2O = CO_2+2H_2$	+96,2
$C + CO_2 = 2CO$ (Boudouard)	+173,2
Égési reakciók:	5
$C + 1/2O_2 = CO$	–110,
$C + O_2 = CO_2$	–393,7
CO-konverzió:	
$CO + H_2O = CO_2 + H_2$	–38,5
Metánképződés:	
$CO + 3H_2 = CH_4 + H_2O$	–217,6
$C + 2H = CH_4$	–87,4

Az elgázosításkor keletkező gáz főbb éghető elemei a CO, H_2 és C_xH_y. A mennyiségük a felhasznált tüzelőanyagon kívül erősen függ az elgázosítási eljárástól és a fizikai-kémiai paraméterektől. Jelentős szerepe van a beadagolt oxigén és gőz mennyiségének. A szén illótartalmának növekedése általában növeli a gáz fűtőértékét.

Bár a szénelgázosítással megvalósított kombinált ciklus az energetikai hatékonyság növelésével összességében csökkenti a környezetszennyezést, de az NO_x- és a CO_2-kibocsátásnövekedés csökkentése csak különleges intézkedésekkel valósítható meg. A gázturbina belépőhőmérséklet-növekedése a jelenlegi anyagtechnológia mellett 1400–1500 °C értékre a termikus NO_x-képződés veszélyét rejti magában.

A szénelgázosítás során, különösen fluidizációs technika esetén a kémiai kéntisztítás előtt adalékanyagos, leginkább mészkőadalékos kénlekötést alkalmaznak. Ez a CO_2-fejlődéssel hozzájárul a légköri CO_2 növekedéséhez.

8.2. táblázat. Az ismertetett paradoxonok fontosabb részelemeinek összefoglalása

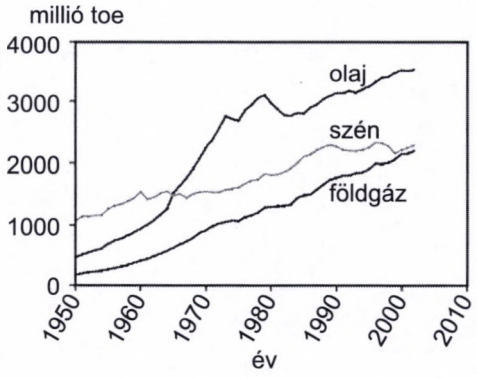
hőmérséklet-paradoxon	
előnyös	hőátadás
	gyulladás
	reakciósebesség
	N_2O-bomlás
	hatásfok-növekedés
hátrányos	salakosodás
	kalcinálódás
	termikus NO_x
	kéntelenítés csökkenése
adalékolásparadoxon {$CaCO_3$}	
előnyös	SO_2-csökkentés
hátrányos	gyulladás
	reakciósebesség (mészkő CO_2)
	veszteség
	többlet CO_2
	hatásfokcsökkenés
	kalcinálódásromlás (szénégés CO_2)
keveredési paradoxon	
előnyös	gyulladás
	reakciósebesség
	alacsony CO
hátrányos	tüzelőanyag NO_x-képződés
globális hatás paradoxona	
előnyös	SO_2-csökkenés
	NO_x-csökkentés
hátrányos	CO_2-növekedés
	NO_2-növekedés

8.1. Szénportüzelés, tüzelőanyag-előkészítés, modern kazánok

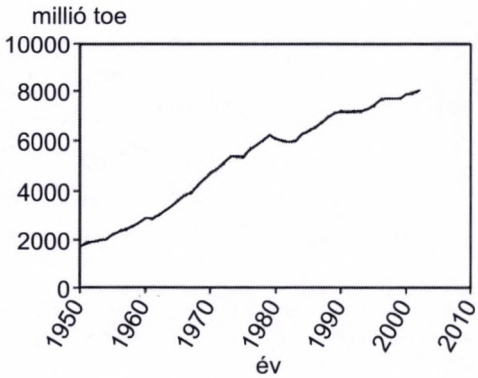
A szénalapú energiatermelés hosszú távon is igen fontos szerepet fog játszani a világon, hiszen a fosszilis energiahordozók közül ebből áll rendelkezésre a legnagyobb tartalék, ára pedig jóval kiegyenlítettebb és alacsonyabb versenytársaiénál. Az energiahordozó vagyonmennyiséget csak pillanatnyi és tájékoztató értékként lehet használni minden időben. Az utóbbi időben például a földgázvagyon teljes átértékelésének szükségességéről beszélnek, az óriási palagáz- (shale-gáz) feltárások eredményeként (Sawin 2003).

8.3. táblázat. A világ műre való fosszilisenergiaforrás-megoszlása (ZJ-ben és százalékban)

Olaj	Szén	Földgáz
7, 400	19, 300	6, 100
23%	58%	19%



8.1. ábra. A világ olaj-, szén- és földgáz-felhasználása, 1950–2002



8.2. ábra. A világ fosszilistüzelőanyag-felhasználása, 1950–2002

8.4. táblázat. A világ fosszilistüzelőanyag-felhasználása, 1950–2002

Év	Szén	Olaj	Földgáz
	milliárd toe		
1950	1074	470	171
1955	1270	694	266
1960	1544	951	416
1965	1486	1530	632
1970	1553	2254	924

8.4. táblázat folytatása

Év	Szén	Olaj	Földgáz
	milliárd toe		
1971	1538	2377	988
1972	1540	2556	1032
1973	1579	2754	1059
1974	1592	2710	1082
1975	1613	2678	1075
1976	1681	2852	1138
1977	1726	2944	1169
1978	1744	3055	1216
1979	1834	3103	1295
1980	1814	2972	1304
1981	1826	2868	1318
1982	1863	2776	1322
1983	1914	2761	1340
1984	2011	2809	1451
1985	2107	2801	1493
1986	2143	2893	1504
1987	2211	2949	1583
1988	2261	3039	1663
1989	2293	3088	1738
1990	2270	3136	1774
1991	2218	3138	1806
1992	2204	3170	1810
1993	2200	3141	1849
1994	2219	3200	1858
1995	2255	3247	1914
1996	2336	3323	2004
1997	2324	3396	1992
1998	2280	3410	2017
1999	2163	3481	2069
2000	2217	3519	2158
2001	2255	3511	2164
2002	2298	3529	2207

Forrás: BP adatok alapján DOE, IEA, IGU és LBL
Forrás: Energy Information Agency

Természetesen klíma- és környezetvédelmi szempontból a szén a földgázhoz képest több kedvezőtlen tulajdonsággal bír, ezek azonban részben kompenzálhatók,

mérsékelhetők az erőművi hatásfok növelésével, jó minőségű szenek felhasználásával, különböző füstgáztisztító és CO_2-kezelési technológiák alkalmazásával. A hatásfok javításának módja az elavult berendezések cseréje, illetve bővítések során korszerű, magas paraméterű egységek beépítése, illetve gázturbinás kiegészítések beépítése.

Magyarországon is hasonló trendeket kell követni. Az ellátásbiztonság növelése és az egyoldalú importtól való függőség csökkentése érdekében célszerű a szénre alapozott kapacitások létesítése. A meglévő környezetvédelmi szabályozás biztosítja a közvetlen károsanyag-kibocsátások megfelelő szinten tartását, de klímavédelmi szempontból fontos, hogy csak jó hatásfokú egységek létesülhessenek, a meglévő széntüzelésű erőművek pedig korszerűsítésekkel csökkentsék fajlagos kibocsátásukat.

Ezek a célok a szabályozói környezet megfelelő alakításával, az EU ETS-en belül, a Nemzeti Kiosztási Terven keresztül, az engedélyezési eljárások (MEH által kiadott erőművi, illetve tüzelőanyag-engedélyek, környezetvédelmi engedélyek) segítségével érhetők el.

A vizsgált időszakban hosszú távon lehet számítani a hazai liginitvagyonra alapozott Mátrai Erőmű működésére, melynek korszerűsítése folyik, illetve új egység(ek) beépítését tervezik. Van terv importszénre alapozott új kapacitás megépítésére is. A régi erőművek egy részében megvalósult a biomassza együtt tüzelése vagy egyes blokkok biomasszára való átállítása.

Tekintettel azonban arra, hogy az ideiglenesen maradó szenes blokkok meglehetősen öregek, hatásfokuk a korszerű technológiákéhoz képest alacsony, 2020-ig célszerű lenne olyan korszerűsítéseket megvalósítani, amelyek javítják a hatásfokot, csökkentik a fajlagos kibocsátást.

A fejlett széntüzelések illeszkedése a természet szénciklusába

A jelen XXI. század energiaigényét reálisan nézve, alapvetően az ismert energiahordozókkal lehet és kell kielégíteni. A feltárt és a reménybelinek nevezett energiahordozó-mennyiségek rendelkezésre állnak, és óriási tartalékot jelentenek a nem konvencionális készletek is. Ezért az összehasonlító számítások, bár figyelmeztetnek és orientálnak is, a jövő terveinket a realitásokra célszerű alapozni. A WEC 2007-es kutatási jelentésében található adatokkal a következő helyzetkép adódik:

Az energiafogyasztás 2000-ben kb. 0,5 ZJ/év (~$11{,}9 \cdot 10^9$ toe/év) értékű volt. A XXI. század 100 évében 1,5%-os növekedéssel számolva kb. 115 ZJ primer energiára lesz szükség (1 ZJ= 10^{21} J). Az U_{235} urán esetében $8 \cdot 10^7$ MJ/kg hőenergiával számolunk, ami azt jelenti, hogy a 0,7% U_{235} izotópot tartalmazó 1 Mt természetes uránérc hőértéke 0,56 ZJ, és ha 1,5% dúsítással számolunk, az 1 Mt urán 1,2 ZJ hőmennyiséget képvisel.

8.5. táblázat. A különböző energiahordozókból rendelkezésre álló mennyiség ZJ-ben, és a 115 ZJ-ből kielégíthető részarány

Energiahordozó	Műre való ZJ	Reménybeli ZJ	Műre való részarány	Műre való + reménybeli részarány
Kőolaj (16 5348 Mt)	6,95	6,7	0,06	0,12
Földgáz (18 0272 Mdm^3)	6,5	13,5	0,057	0,17
Szén (82 6001 Mt)	24,2	60,0	0,21	0,73
Fosszilis	37,65	80,2	0,327	1,02
Urán (40–130 USD/kg) (5300 Et)	6,3	10–12	0,055	0,14–0,16

A 8.5. táblázat szerint önmagában egyik energiahordozó sem képes az évszázad igényét fedezni, de együttesen igen. A megújulók (helyesen természeti közvetlen) és a minden energiahordozóból meglévő jelentős, nem konvencionális források ismeretében megnyugtató energetikai fejlesztéseket lehet végrehajtani, különösen az alap-energiahordozóként elfogadható széntechnológiáknál. (Mindig nyitottnak kell lenni azonban teljesen új elven működő energiafejlesztési lehetőség befogadására). Az évszázad uralkodó energiahordozó-forrása a szén marad, bár környezetszennyezés szempontjából a legproblematikusabb.

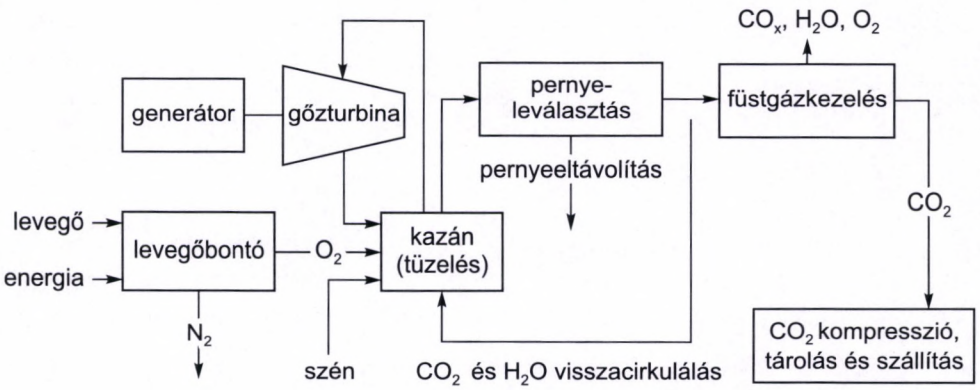
Az új tüzeléstechnikai szemlélet szerint a tüzelésnél elsődleges:
- az égési hőmérséklet csökkentése,
- a tüzelőanyagot és a levegőt az égési szempontokat és a szennyező csökkentési szempontokat érvényesítve kell, célszerű (fokozatos) keverésnek alárendelni.

Ha a tüzelőanyagban nitrogén is található, akkor N_2O képződéssel is számolni kell.

Az NO_x okozta első paradigmaváltás után a második paradigmaváltás már az egész energetikát érintette, azzal, hogy a globális klímaváltozás elsődleges okaként a légköri CO_2 (üvegházgázok) koncentrációjának a növekedését jelölik meg. Ez tudományosan nem igazolható, azonban remélhetően csak átmenetileg az energetikai stratégiák kidolgozásánál figyelembe kell venni. Számos kutató a CO_2 szerepét a globális felmelegedésben elhanyagolhatónak veszi. A valóságban van hatása, amit a gáztörvényekkel és a termodinamikai törvényekkel számítani lehet, de a klímaváltozásban csekély hatása miatt valóban nem kellene vele számolni. A fosszilis tüzelőanyagok tüzelésekor a széntartalomnak megfelelő szén-dioxid fog képződni. Jelenleg a CO_2-kibocsátásért (kvótán felüli) fizetni kell, vagy gondoskodni kell a szén-dioxid leválasztásáról vagy elhelyezéséről. A leválasztás hatásfokának növelését a koncentráció növelésével lehet elérni, tehát a maximális koncentrációnál, vagyis a keletkezési helynél kell leválasztani (nevet-

séges fejlesztések a levegőből való leválasztási kutatások). A távozó égéstermékekben a koncentrációnövelést például levegő helyett oxigénnel való tüzeléssel (oxyfuel combustion) lehet biztosítani. Az eljárás létezik, de költségessége miatt széles körű elterjedése nem várható, egyéb technológiákkal való összekapcsolása nélkül.

A tisztaoxigén-tüzeléssel a füstgázban a CO_2-szint elérheti a 95%-ot. Az energiafolyamat nagy önfogyasztással jár, ami rontja a teljes hatékonyságot, bár a tüzelés közel sztöchiometrikus körülmények között folyik. A füstgáz túlnyomórészt CO_2-t és H_2O-t tartalmaz, a vízgőz lekondenzálása után a CO_2-leválasztáshoz a feltételek igen kedvezőek. Ugyancsak jelentős előnye a rendszernek a nitrogénmentes égési környezet, így az NO_x-képződés is nagyon csekély. Jelentős hátrány azonban a tisztaoxigén-gyártás nagy energiaigénye, ami elérheti a fejlesztett energia 25%-át.



8.3. ábra. Oxyfuel-tüzelés vázlata

A társadalom igyekezete a légköri karbonnövekedés mértékének csökkentésére elismerésre méltó, de a Föld karbonkészletéhez, a karbonciklusban forgó mennyiséghez viszonyítva is kis értékekről van szó.

A Földön körülbelül 46 793 GtC (gigatonna karbon, 10^9t) karbon van a tárolókban. Ennek megoszlását mutatja a 8.6. táblázat.

A világ 860 milliárd tonna műre való szénmennyiségéből 405 mdt bitumenes és antracit, 260 mdt barnaszén és 195 mdt lignit. 2008-ban 5800 millió tonna feketeszén és 953 mt barnaszén került felhasználásra. A legnagyobb műre való szénmennyiséggel rendelkező országok: USA 242 721 mt, Oroszország 157 010 mt, Kína 114 500 mt, Ausztrália 76 600 mt, India 56 498, Dél-Afrika 48 000 mt, Ukrajna 33 873, Kazahsztán 31 300 mt, Szerbia 13 885 mt, Lengyelország 7502 mt.

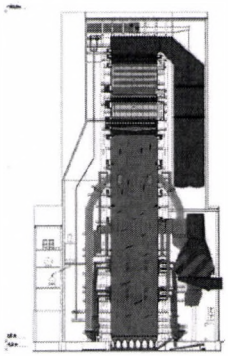
A szénportüzelési technikai fejlesztések lehetővé teszik korszerű, óriási teljesítményű kazánok létesítését.

8.6. táblázat. A földi karbontárolókban a karbon mennyisége

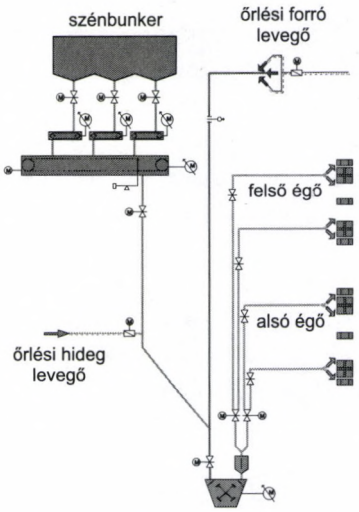
Tároló	GtC
Légkör	750
Vegetáció	610
Talaj	1580
Tengerbiológiai	3
Mélytenger	38 100
Fosszilis és cementgyártás	4000
Nem oldódó organikus karbon	700
Folyók, óceánok felülete	1020
Az éves körforgásban részt vesz	Tárolócsoport (GtC/év)
Talaj + vegetáció	121,6
Tenger	92
Összesen	213,6
Emberi tevékenység kb.	6,6 (tehát 3,1%)

Lippendorfi Erőmű (2·930 MW_{el})

A nagy nyomású frissgőz mennyisége: 2420 t/h. A megengedett frissgőz nyomása: 285 bar. A frissgőz kilépési hőmérséklete (SH): 554 °C. Újrahevített gőzmennyiség: 2213 t/h. Megengedett újrahevítési gőznyomás: 69 bar. Újrahevített hőmérséklet (RH): 583 °C.

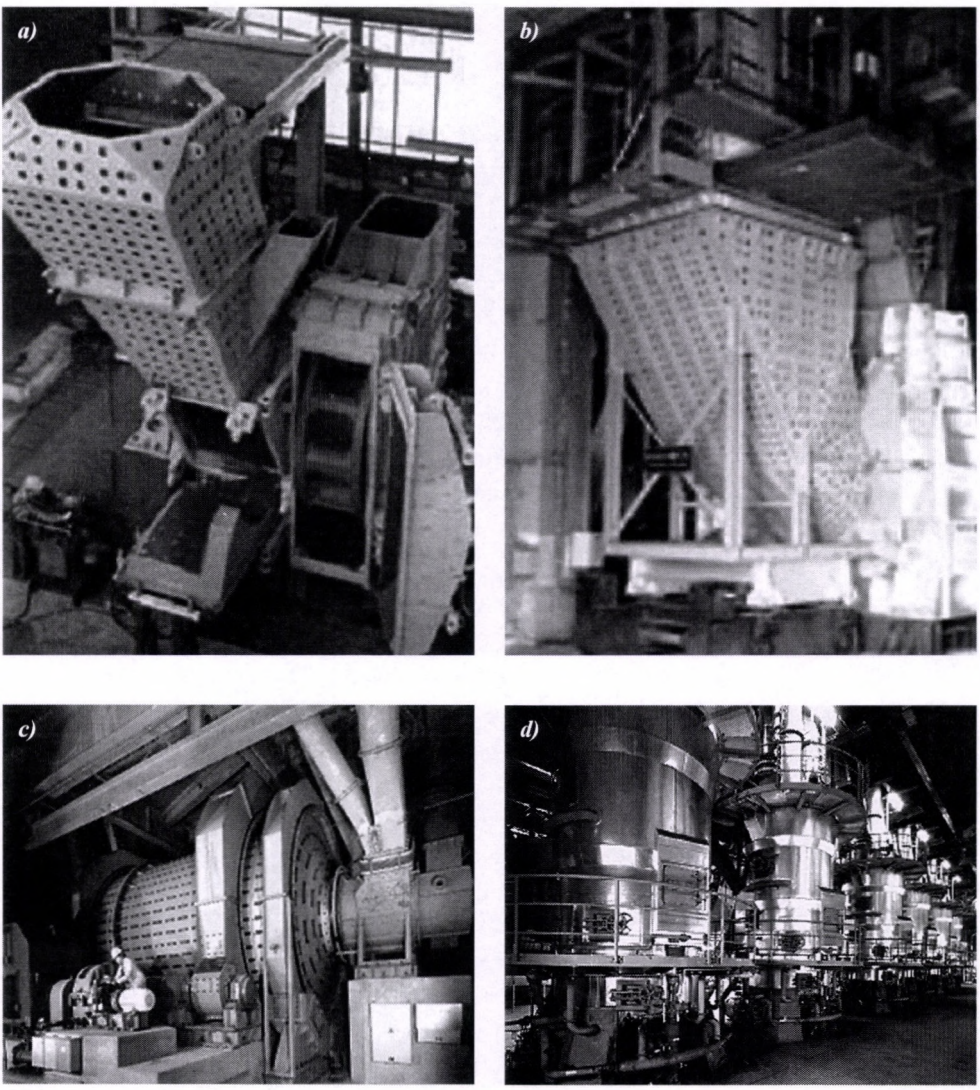


8.4. ábra. A Lippendorfi Erőmű szénadatai
Fűtőérték kJ/kg 9700 –11 100
Nedvesség 51,5–53,0%
Hamu 8,5–4,5%
Illó (szárazanyag) 57,0 – 63,0%
Kén 1,5–2,0%
Nitrogén 0,3–0,3%



8.5. ábra. A Lippendorfi Erőmű tüzelési rendszere

A szénportüzelésnél alapvető szerepe van a tüzelőanyag égéshez való előkészítésének. Ehhez a szén fajtájától függően a szén aprítását és szárítását megfelelően biztosító szénőrlő malomra van szükség. Különösen nehéz problémát jelent ez a gyenge minőségű ligniteknél és barnaszeneknél. A szárításhoz szükséges forrógázmennyiség áramlását és a szén megfelelő finomságúra való őrlését az ún. ventilátormalmokkal lehet elvégezni. Ilyen malomtípusokat nagyon széles teljesítménytartományban gyártanak. Ilyen sorozat a V5, NV10-től NV130 típusjelű gyártmány, amely 5 t/h névleges szénmennyiségtől 130 t/h mennyiségig képes őrölni.



8.6. ábra. A szénőrlő malom alaptípusai: *a)* előtörős malom, *b)* ventilátormalom, *c)* golyós dobmalom, *d)* görgős malom

A különböző szénfajták őrlésére javasolt malomtípusokat a szén hamu- és nedvességtartalmának ismeretében lehet csoportosítani.

Hardgrove index/hamu	HGI > 70	50 < HGI < 70	HGI < 50
hamu < 10%	NV	NV	NV vagy DGS
10% < hamu < 20%	NV	NV vagy DGS	DGS
hamu > 20%	NV vagy DGS	DGS	DGS

8.2. Olajtüzelés

Az olajtüzelést ma csak olyan helyeken alkalmazzák, ahol az olaj vagy olajszármazék a technológiából visszamaradt, vagy ahol az üzembiztonság ezt megköveteli (pl. villamos- vagy hőenergia-fejlesztés, biztonsági tartalék, kórházak). Ez gazdasági okokra vezethető vissza, ezért a hatásfokot növelő, kondenzációs olajkazánok gyorsan terjednek az olajtüzelések területén. Az olajtüzelésnél az olajat gőzzel előmelegítik, és előmelegítik az égéshez szükséges levegőt is. Az égők keverő, elpárologtató, porlasztó (ez a leggyakoribb) elven működnek.

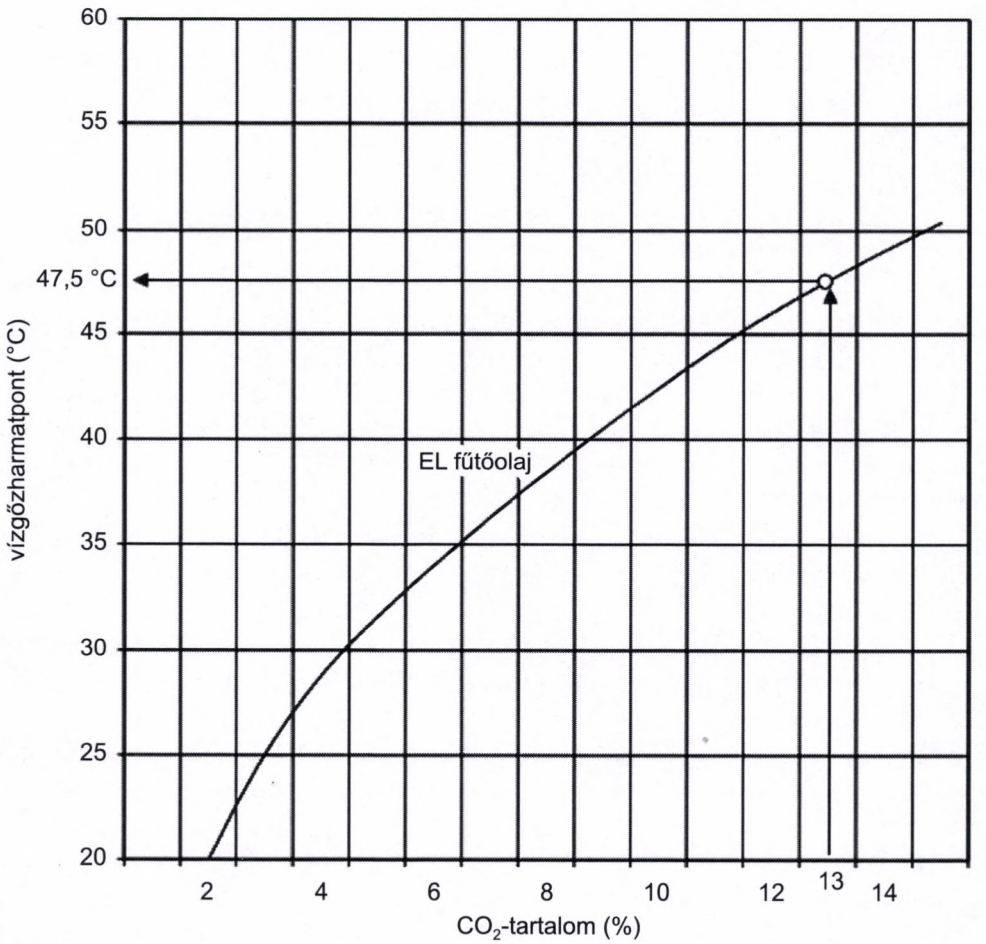
Az olajok (tüzelőolajok, fűtőolajok, pakura) tüzelésére az utóbbi két módszer: elgázosító égőknél (Nyugat-Európában az emissziós normák szigorítása miatt használatuk háttérbe szorult) a tüzelőolaj forró felülettel érintkezve elpárolog, a képződött olajgőzök az égéshez szükséges levegővel elegyedve elégnek. A porlasztóégőket sűrűbb, nagy viszkozitású olajféleségek (pakurák) jó hatásfokú tüzelésére használják. A porlasztóégőben az olaj finom eloszlású köddé alakul, az égési levegővel keveredve lebegő állapotban elég. Gőzzel, levegővel vagy nagy olajnyomással lehet a megkívánt porlasztást elérni. Ma elsősorban a környezetvédelmi követelményeket kielégítő kis NO_x-kibocsátású ún. „kék láng" minősítéssel ellátott tüzelőberendezéseket lehet használni.

Az égéshő-hasznosító olajtüzelésű kazánok fűtőfelületeinek a füstgázban lévő gőz lecsapására alkalmasnak kell lenniük. A kazánok energiahasznosítását általában a tüzelőanyag alsó fűtőértékére számított hatásfokkal szokták mérni. A korábbi kazánoknál az utófűtő felületeken a füstgázharmatpontnál alacsonyabb hőmérsékleteknél súlyos korrózió jelentkezett. A füstgázban jelenlévő nedvesség rejtett hőjét így nem lehet hasznosítani, veszteséget jelent. Ez a hőmennyiség az égéshő 11%-a gáztüzelés, illetve 5%-a olajtüzelés esetén. A könnyű fűtőolajban csekély (átlagban 0,15%) kéntartalom is van, ezért az égéstermékben a szén-dioxid és a vízgőz mellett nyomokban kén-dioxid és kén-trioxid is található. Ezek a vízgőzzel kénsavat és kénessavat alkotnak, amelyek a fűtőfelületekre kicsapódnak. A fűtőfelületeknek a savakkal szemben ellenállóaknak kell lenniük, ezért króm-nikkel-molibdén acélt kell a felületek anyagául választani.

A kéntartalom miatt az égéshő-hasznosító olajtüzelésű kazán csapadékát semlegesíteni kell. A kazánhoz egy semlegesítőt kell beépíteni. Ez elé egy aktívszénszűrőt is kell tenni, amely a szénhidrogéneket és a koromszemcséket leválasztja. A semlegesítő tartályban magnézium-hidroxiddal a pH értéket 6,5–6,8-ra emelik.

Az égéshő-hasznosító olajtüzelésű kazánnál különös jelentősége van a tüzelésszabályozásnak. A szabályozóberendezést a tüzelőberendezéssel egybeépítve kompakt égőket alkalmaznak. A légfelesleg csökkentése kisebb távozófüstgázveszteséget, alacsony NO_x-értéket és magas CO_2- értéket biztosít. A magasabb szén-dioxid-értéknél a füstgázharmatpont (vízgőzharmatpont) magasabb lesz. A távozó füstgáz hőmérsékletének megválasztásánál nagyobb a választási lehetőség.

EL jelű fűtőolajnál, a távozó füstgázban 13% CO_2 esetén, a vízgőzharmatpont 47,5 °C.



8.7. ábra. Vízgőzharmatpont a CO_2-tartalom függvényében EL fűtőolaj tüzelése esetében

8.3. Gáztüzelés

A földgáz kémiai összetételénél fogva az egyéb fosszilis energiahordozókhoz képest kedvezőbb tüzelőanyag a környezetszennyezés és fajlagos CO_2-kibocsátási szempontból is. További előnye, hogy a korszerű gáztüzelésű erőművek hatásfoka igen magas: a jelenleg üzemelő technológia is 40%-nál magasabb hatásfokú, de az újabban létesülő korszerű berendezések hatásfoka az 50%-ot is meghaladja, sőt eléri a 60%-ot is. A földgáz igen értékes alapanyag is.

A földgáz, amely rendszerint 90% fölötti metán mellett csökkenő mennyiségben magasabb szénatomszámú homológokat (etán, propán, bután, pentán) és inert gázt (N_2 és/vagy CO_2), esetleg H_2S-t vagy egyéb kéntartalmú vegyületet tartalmaz. A földgáz égése során annak szén- (C), hidrogén- (H) és kén- (S) tartalma ég el a levegő oxigénjével, és elsősorban gáz halmazállapotú égéstermékek (vízgőz, szén-dioxid, szén-monoxid, kén-dioxid) keletkeznek.

A tüzelési folyamatban nem kívánt termékek keletkezhetnek, amelyek részben energetikai veszteséget okoznak, vagy károsak. Ilyenek a:

- korom: karcinogén,
- szénmonoxid: mérgező,
- nitrogén-oxidok: a talajközeli ózonkoncentrációt növeli (mérgezés),
- szénhidrogének: üvegházhatás.

Ha a metánt tökéletes gáznak tekintjük, a fenti körülmények között 1 m^3, tehát 42,295 mol metánt tartalmaz. Ha $H_2O(g)$ keletkezik, akkor 1 m^3 metán elégésekor $q = 42{,}295 \text{ mol} \cdot -802{,}34 \text{ kJ mol}^{-1} = -33\,935 \text{ kJ} = -33{,}935 \text{ MJ}$ a hőváltozás. (A gázszolgáltató 34 MJ/m^3 fűtőértékkel számol.) Ha $H_2O(1)$ keletkezik, akkor 1 m^3 metán elégésekor $q = 42{,}295 \text{ mol} \cdot -890{,}36 \text{ kJ mol}^{-1} = -37658 \text{ kJ} = -37{,}658 \text{ MJ}$ a hőváltozás.

Ez utóbbi 10,97%-kal több, tehát ennyivel lenne nagyobb egy kondenzációs kazán hatásfoka, ha minden vízgőz kondenzál és a reakciótermékek 25 °C hőmérsékletűek.

Tételezzük fel, hogy a földgáz csak metánból áll, a levegő összetétele 21 mol% O_2 és 79 mol% N_2, valamint hogy az égés mindkét esetben sztöchiometrikus, tehát a füstgázban nem marad sem metán, sem oxigén. Az égés előtt a földgáz és a levegő is 25 °C hőmérsékletű és 1 bar nyomású. A szükséges adatok, mind 25 °C hőmérsékleten és 1 bar nyomáson: a képződési entalpiák:

$\Delta H_f^p = -74{,}81 \text{ kJ mol}^{-1}$,
$\Delta H_f^p(CO_2) = -393{,}51 \text{ kJ mol}^{-1}$,
$\Delta H_f^p(H_2O(g)) = -241{,}82 \text{ kJ mol}^{-1}$,
$\Delta H_f^p(H_2O(1)) = -285{,}83 \text{ kJ mol}^{-1}$.

A részt vevő anyagok állandó nyomáson vett moláris hőkapacitása:

$C_p(CO_2) = 37{,}11\ JK^{-1}mol^{-1}$,

$C_p(H_2OCg)) = 33{,}58\ JK^{-1}\ mol^{-1}$,

$C_P(H_20(1)) = 75{,}291\ JK^{-1}\ mol^{-1}$,

$C_P(N_2) = 29{,}125\ JK^{-1}\ mol^{-1}$.

A víz egyensúlyi gőznyomása 12 332 Pa 50 °C hőmérsékleten.

A tüzelés eredménye:

A reakcióegyenlet:

$CH_4 + 2\ O_2 = CO_2 + 2\ H_2O$

A standard moláris reakcióentalpia 25 °C hőmérsékleten, ha vízgőz keletkezik:

$D_rH^o = -802{,}34\ kJ\ mol^{-1}$

A standard moláris reakcióentalpia 25 °C hőmérsékleten, ha folyékony víz keletkezik:

$D_rH^o = -890{,}36\ kJ\ mol^{-1}$ (Turányi 2008).

Égéshőt hasznosító gáztüzelésű (kondenzációs) kazán

A fosszilis tüzelőanyagok legfontosabb éghetői a szén és a hidrogén. Az energetikai hasznosításuk során különös figyelmet kell fordítani arra, minél kisebb hőmennyiség maradjon a szabadba távozó égéstermékekkel. A veszteségminimum elérésével, vagyis a maximális hatásfok biztosításával nagy energiamennyiségeket lehet megtakarítani. A tüzelőanyagok égéstermékeiből a vízgőz kondenzálásával jelentős hőmennyiséget lehet a hasznosított részhez csoportosítani. Ezen intézkedés hatását az utóbbi években jelentősen elterjedt kondenzációs kazán hasznosítja. A tüzelőanyagok fűtőértékén általában az alsó fűtőértéket ($h_{ü}=h_a$) értjük, mivel a használatos berendezéseknél az égés folyamán keletkező H_2O rendszerint gőzként távozik a füstgázokban. A gőz kondenzációjára csak a harmatpont (T_h) elérésekor kerül sor. Ezt az alacsony hőmérsékletet a kazánba belépő nagyobb hőmérsékletű közeggel (pl. előmelegített tápvíz, távhőrendszer fűtővize) nem tudjuk elérni, vagy a megjelenő savas kondenzátum korróziós hatása miatt (pl. gáztüzelésű fűtőkazánok) kerüljük is. Csak bizonyos feltételek megléte és megteremtése mellett létesíthetünk olyan kondenzációs kazánokat, amelyekben a füstgáz H_2O-tartalmát kondenzálva és a tüzelőanyag felső fűtőértékét (h_f) hasznosítják, és a tüzelőanyaggal energetikailag nagyobb hatékonyságot lehet elérni.

Kondenzációs kazánok létesítése elsősorban földgázfelhasználás esetén vetődik fel. A földgáz felső fűtőértéke $h_f \cong 40\ MJ/m^3$ és alsó fűtőértéke $h_a \cong 36\ MJ/m^3$, az arányuk pedig

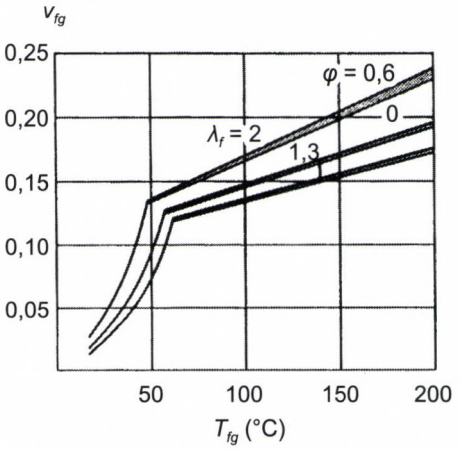
$$\frac{h_f}{h_a} \cong \frac{40}{36} \cong 1{,}11,$$

azaz a felső fűtőérték mintegy 11%-kal nagyobb az alsó fűtőértéknél.

A kazán füstgázveszteségét (v_{fg}) a kilépő füstgázhőmérséklet (T_{fg}) függvényében a 8.8. ábra mutatja, hogy paraméterek közül a légfelesleg-tényezőnek (λ_f) jelentősebb, a levegő nedvességtartalmának (φ) elhanyagolható befolyása van. A füstgázveszteségek megadott értékei itt a felső fűtőértékre vonatkoznak. Kisebb füstgázhőmérsékletek esetén a füstgázveszteségek jelentős csökkenését két hatás idézi elő. Egyrészt a harmatpont felett is a hőmérséklettel csökken a fizikai hőveszteség, másrészt a kondenzációs kazán megvalósításával a harmatpont alatt a vízgőz párolgási hője is hasznosul.

A hagyományos és a kondenzációs kazán füstgázveszteségének alakulását, a 8.8. ábra hatásfokainak összehasonlítását a 8.9. ábra szemlélteti azonos $m_{ü}$ tüzelőanyag esetén. A hagyományos kazán hatásfoka:

$$\eta_{mH} = \frac{\dot{Q}_a}{\dot{m}_{\dot{z}} h_a} = 1 - \left(v_{fg} + v_s\right)$$



8.8. ábra. Füstgázveszteség a kilépő füstgázhőmérséklet függvényében

A kondenzációs kazán hatásfoka

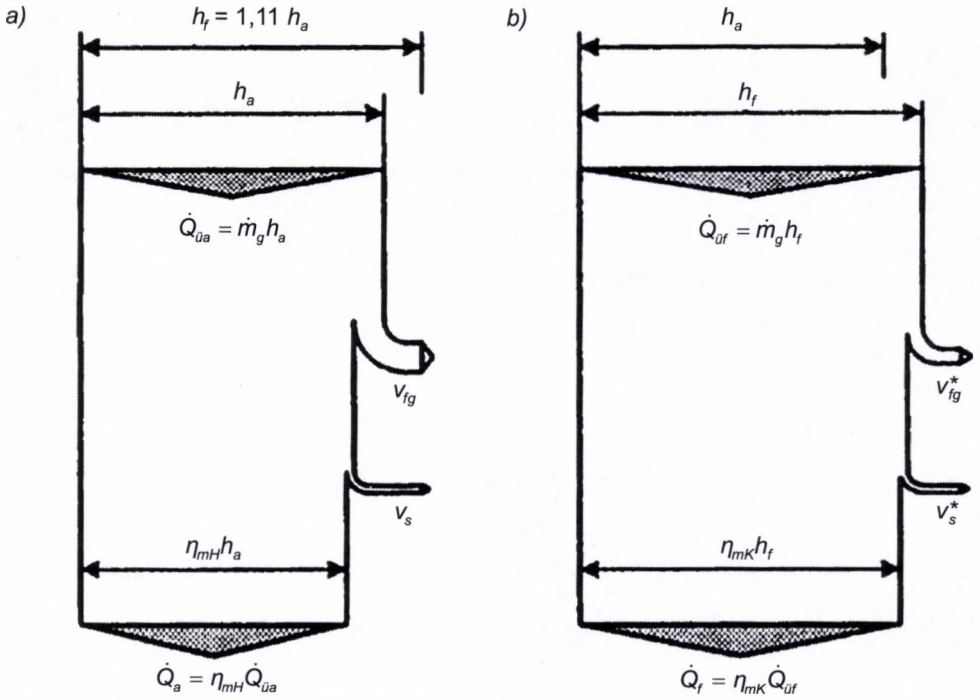
$$\eta_{mK} = \frac{\dot{Q}_a}{\dot{m}_{\dot{z}} h_f} = 1 - \left(\dot{v}^*_{fg} + \dot{v}^*_s\right)$$

ahol a két kazán füstgázvesztesége ($v_{fg} > v^*_{fg}$) és sugárzási vesztesége ($v_s > v^*_s$) eltérő lehet. Az összehasonlításra kerülő két kazán hőteljesítményének kell azonosnak lennie

$$Q_a = \eta_{mH} \dot{m}_{\dot{z}} h_a = \dot{Q}_f = \eta_{mk} \dot{m}_{\dot{z}k} h_f$$

és ebből a felhasználandó tüzelőanyagok aránya

$$\frac{\dot{m}_{\dot{z}K}}{\dot{m}_{\dot{z}}} = \frac{\eta_{mH} h_a}{\eta_{mK} h_f}.$$



8.9. ábra. A hagyományos *a)* és kondenzációs *b)* gázkazán hatásfokainak összehasonlítása

Ha pl. $v_{fg} = 0{,}1$ és $v^*_{fg} = 0{,}05$ értékkel számolunk, a sugárzási veszteséget pedig elhanyagoljuk, akkor a kondenzációs kazán tüzelőfelhasználása a hagyományos kazánénak 85%-a.

A kondenzációs kazán alkalmazásának feltétele, hogy a füstgázok lehűtéséhez megfelelően alacsony hőmérsékletű hőigény legyen. Ilyen hőigényt jelent az alacsony hőmérsékletű fűtés (pl. a padlófűtés), a használati melegvíztermelés, szellőző levegő melegítése stb. A példákból nyilvánvaló, hogy a kondenzációs kazánok elsősorban a fogyasztókhoz kapcsolva létesíthetők.

A kondenzációs kazán megvalósítása a kazán kialakításában is több feltétel megvalósítását igényli. A kondenzáció során kicsapódó kondenzátum savas kémhatású pH=3,5...5. A korrózió megakadályozása érdekében a kazán kondenzátummal érintkező felületeit alumíniumötvözetből vagy rozsdamentes acélból kell készíteni. A kondenzátumot körültekintően, csak megfelelő hígítással szabad a környezetbe kiengedni. A lehűtött füstgáz telítetté válik, a csapadék kiválásától a kéményt is védeni kell. A füstgáz lehűtése csökkenti a kémény huzatát, a kondenzációs kazán üzemeltetéséhez ventilátor válhat szükségessé.

Ha $H_2O(g)$ keletkezik, akkor 1 m^3 metán elégésekor q = 42,295 mol · –802,34 $kJmol^{-1}$, azaz –33 935 kJ = – 33,935 MJ a hőváltozás. (A gázművek 34 MJ/m^3 fűtőértékkel számol.)

Ha H_2O keletkezik, akkor 1 m^3 metán elégetésekor q = 42,295 mol · –890,36 $kJmol^{-1}$, azaz –37 658 kJ = – 37,658 MJ a hőváltozás.

Az utóbbi 10,97%-kal több, tehát ennyivel lenne nagyobb a kondenzációs kazán hatásfoka, ha minden vízgőz kondenzálna, és a reakciótermékek 25 °C hőmérsékletre hűlnének.

Egy m^3 földgáz elégetésekor, tehát 32,226 MJ hőt hasznosítunk a hagyományos, és 35,049 MJ hőt a kondenzációs kazánban. A számítást 25 °C és 80 °C közötti füstgázhőmérséklet-értékekre elvégezve, eredményként kiderül, hogy a víznek közel 80%-a 30 °C-on kondenzál, és 60 °C felett nincsen már kondenzáció. Természetesen a kondenzáció függ a légnyomástól.

8.4. Fluidizációs tüzelés

A légköri szennyező anyagok mennyiségének égés közbeni csökkentésére – különösen az SO_x és NO_x összetevőknek – különösen alkalmas tüzelési eljárás a fluidizációs tüzelés. Az NO értéke az alacsony égési hőmérséklettel, az SO_x adalékanyagokkal csökkenthető.

Az eljárást Németországban az 1920-as években a vegyipari technológiáknál kezdték alkalmazni. A technológia alapelve a 8.10. ábrán látható. A tüzelés megvalósítható légköri és túlnyomáson is.

A fluidizációs tüzelést megalapozó első találmányt a Badischen Anilin- und Sodafabrik vegyésze, Winkler jelentette be. Ennek megfelelően első tüzeléstechnikai alkalmazása is a Winkler-gázgenerátoroknál történt. Az ötvenes években a fluidizációs tüzelést a BASF AG kezdte villamosenergia-fejlesztési rendszerben alkalmazni, miután azt a piritfeldolgozásban már felhasználta.

A Lurgi Chemie vállalat a fluidizációs technikát sokoldalúan a nyersanyag előkészítésében és termelésében korán alkalmazta. Az ötvenes évek végén az eljárást olajmaradékok eltüzelésére használták. A hatvanas évek közepén a British Coal Utilisation Research Association (BCURA) és a National Coal Board (NCB) Angliában és a Pope, Evans és Robbins Washingtonban, az USA-ban mészkőadalékolással az SO_2-emisszió csökkentésére végeztek szénnel kísérleteket és üzemi vizsgálatokat. Az USA-ban, Németországban, Ausztráliában, Indiában és szerte a világon megindultak a kutatások és fejlesztések. A legjelentősebb cégektől a kisebbekig alkalmazták a fluidizációs technikát a tüzelésben. Megemlítendők a Lurgi, Babcock and Wilcox, Foster Wheeler, Ahlstrom, ABB, Hitachi, CSL, Deutsche Babcock és még számos jelentős cég.

A szilárd tüzelőanyagok tüzelésekor a legkritikusabb feladat az égési levegőnek a tüzelési és a kémiai-fizikai folyamatok szempontjai szerinti adagolása. A fluidizációs tüzelési eljárásnál a szilárd fázisú tüzelőanyagot, illetve ágyanyagot gázfázisú közeg áramolja át. A gáz-szilárd fázisú közegállapot jellemzésére egy megfelelően szerkesztett állapotdiagram szolgál. E diagram előállításához a hasonlósági kritériumok adnak segítséget. A fizikai mennyiségek hasonlósága a jelenséget jellemző valamennyi mennyiség hasonlóságát jelenti, azaz

– kinematikai – pl. a folyadék- vagy gázáramlás,
– dinamikai – erők
– hőállapot – hőmérséklet, hőáramlás

hasonlóságát.

A hasonlóság invariánsai, a hasonlósági kritériumok dimenzió nélküliek. A hasonlósági kritériumok meghatározásához szükséges, hogy a jelenséget analitikai összefüggéssel le lehessen írni, és ennek alapján a tételek:

– egymáshoz hasonló jelenségeknek azonos hasonlósági kritériumaik vannak,
– olyan integrált lehessen felállítani, amely a differenciálegyenlet hasonlósági kritériumainak függvénye,
– két jelenség akkor hasonló, ha egyértelműségi feltételeik hasonlóak és ezek alapján megállapított kritériumaik megegyeznek.

A szilárd szemcsés fázison átáramló gázközegre felírt, viszkózus folyadékáramlásra vonatkozó Navier–Stokes-egyenletből nyerhető hasonlósági kritériumok közül a következőket használják fel:

$$\text{Froude-szám } Fr = \frac{u}{\sqrt{\lg}}.$$

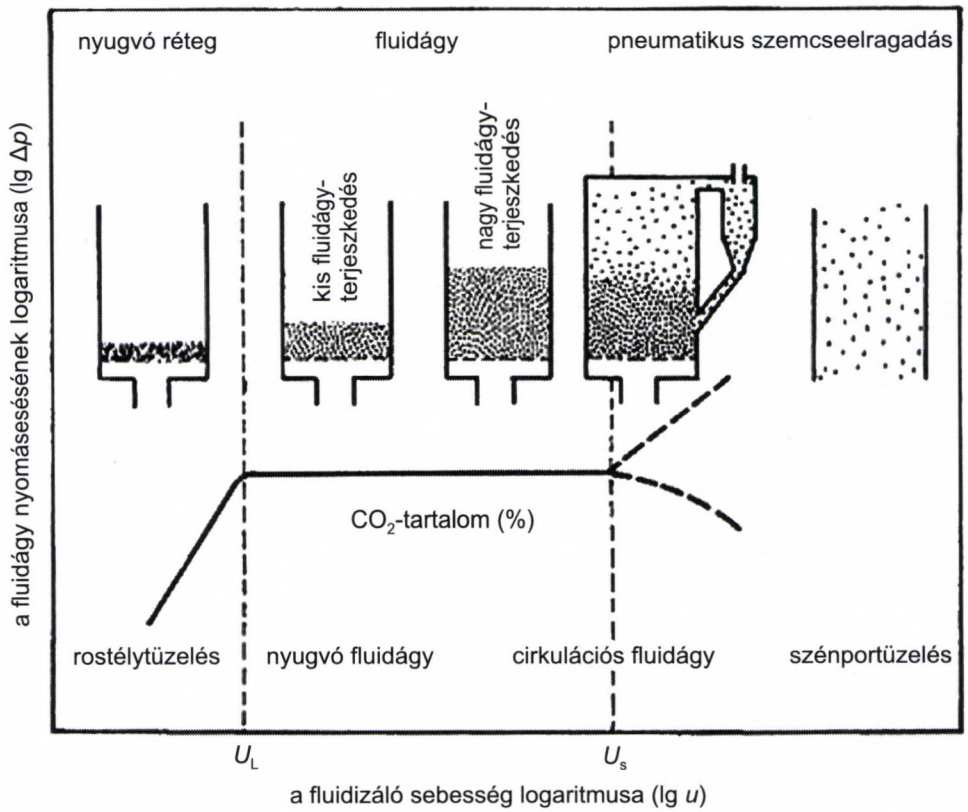
$$\text{Reynolds-szám } \mathrm{Re} = \frac{ul}{v} = \frac{\rho ul}{\mu}.$$

$$\text{Arkhimédész-szám } Ar = \frac{gl^3}{v^2} \cdot \frac{\rho_s - \rho}{\rho}.$$

Ha szilárd szemcsés halmazon gáz áramlik át, a sebesség növelésével a nyomásesés változását a 8.10. ábra mutatja (logaritmikus léptékek).

Az áramlás különböző szakaszán a nyomásesés változását leíró összefüggések:
A fluidum sebességétől függően három állapotot különböztethetünk meg:

1. fluidum sebessége egy jellemző sebességnél kisebb, a szemcsék ilyenkor mozdulatlanok.



8.10. ábra. Szemcsés halmaz állapotváltozása gázáramlás esetén. u_L a fluidizációs kezdősebesség, u_S a lebegési sebesség

2. A fluidum sebessége egy jellemző sebességnél nagyobb, a fluidum ilyenkor a szemcséket magával ragadja, szállítja.
3. A fluidum sebessége a két sebesség közé esik, ilyenkor kialakul a fluidizált réteg.

Első szakasz (rostélytüzelés)

$$\Delta p \sim \frac{u^2}{2g}, \ldots \log \Delta p \sim 2\log u.$$

A jelleggörbe ferde egyenes.

Második szakasz.
Az áramlás során a sebesség egy bizonyos u_L értéket elérve a réteg lazulni és kiterjedni kezd, a szemcsés halmaz kezd folyadékként viselkedni, mint ahon-

nan az elnevezés is származik. A nyomásváltozást az határozza meg, hogy lényegében a rétegben lévő állandó értékű anyagmennyiséget egyensúlyban kell tartani, azaz

$$\Delta p = \rho_s(1-\varepsilon)h,$$

$$m = áll. = \rho_s(1-\varepsilon)V = \rho_s(1-\varepsilon)hF,$$

$$\rho_s(1-\varepsilon) = \frac{m1}{Fh},$$

$$\Delta p = \frac{mh}{Fh} = \frac{m}{F} = áll.,$$

$$\log\Delta p = \log . áll = áll.$$

ahol

ε az átlagos űrtérfogat
ρ_s a szemcse sűrűsége
V a fluidizált réteg térfogata
F a fluidizált réteg keresztmetszete
h a fluidizált réteg magassága

A rétegen a nyomásesés állandó, tehát a sebesség függvényében a jelleggörbén vízszintes szakasz található.

Harmadik szakasz.
Cirkulációs fluidizáció (pneumatikus szállítás, szénportüzelés, átáramlás, szénpor gázosítása).

A sebesség növekedésével elérünk egy értéket, u_s lebegési sebesség értékét, amely felett a szemcsehalmazból a gáz szemcséket ragad magával. Ha megfelelő utánpótlása van a szemcséknek, akkor a jelleggörbe az áramlási ellenállásra érvényes törvényszerűséget követi, azaz

$$\Delta p \sim \frac{u^2}{2g}, \ldots \log\Delta p \sim m\log u.$$

A jelleggörbe a logaritmikus koordináta-rendszerben megfelelő „m" hajlásszögű emelkedő egyenes. Ha nincs szemcseutánpótlás, akkor a sebesség növekedése ellenére egy bizonyos értékig csökkenő jelleget mutat, mivel a tiszta gázáramlásérték felé tart.

A folyamatra jellemző paraméterek tehát a következő összefüggések leképzésére szolgálnak.

$$Fr \sim f(\mathrm{Re}),$$

$$Ar = áll.,$$

$$M = áll.,$$

$$Ar = áll. = \frac{gd_K^3}{v^2}\frac{\rho_K - \rho_G}{\rho_G} = \frac{gd_K}{u_G^2}\frac{\mathrm{Re}^2}{\rho_G}\frac{\rho_K - \rho_G}{\rho_G} = \frac{\mathrm{Re}^2}{Fr^2}\frac{\rho_K - \rho_G}{\rho_G},$$

$$áll.Fr^2 = \frac{\rho_K - \rho_G}{\rho_G}.$$

Az $Ar = áll.$ jelleggörbék, tehát logaritmikus léptékű koordináták esetén pozitív iránytangensű egyenesek.

$$M = áll. = \frac{u_G^3}{vg}\frac{\rho_G}{\rho_K - \rho_G} = \frac{\mathrm{Re}^2}{d_K}\frac{u_G^2}{g}\frac{\rho_G}{\rho_K - \rho_G} = \mathrm{Re}\,Fr^2\frac{\rho_G}{\rho_K - \rho_G},$$

$$áll.Fr^2\frac{\rho_G}{\rho_K - \rho_G} = \mathrm{Re}^{-1}.$$

Az M = áll. Jelleggörbék, tehát a megadott koordináta-rendszerben negatív iránytangensű egyenesek.

Az állapotdiagram a porozitás és (ε) az n áramlási „erő/szemcsesúly" viszony felhasználásával kijelöli a különböző tüzelési eljárások tartományait, azaz a rostélytüzelés, a nyugvó fluidágyas tüzelés, a cirkulációs fluidtüzelés és a szénportüzelés tartományát. A környezetszennyezés csökkenthető az új tüzelési eljárással.

Az ún. fluidizációs tüzelés, a széntüzelésnél az összes környezetszennyező csökkentésére kifejlesztett új tüzelési eljárás, amely a középnagy teljesítmények esetén kiszorítja a szénportüzelést.

A tüzelési eljárások a tüzelőanyag vegyi összetételén kívül jelentősen függenek annak méretjellemzőitől is. Szilárd szemcsés anyagok tüzelésére a befúvásos tüzelés, vagy a fluidizációs tüzelés a legelterjedtebb. A szemcsés szilárd anyagon a fluidizáció folyamán az áramló fluidum a szemcsés réteget mozgatja, melynek során a szemcsék keveredne. Az áramoltatáskor a szemcsék mozgásba jönnek és ütköznek egymással. Ütközés során a szemcsék porlódnak, rajtuk kémiai reakciók (pl. égés) és köztük anyag- és hőátadás történnek.

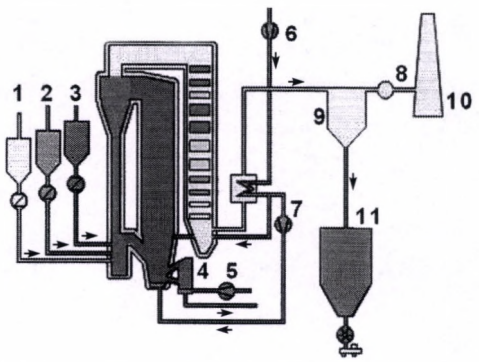
Fluidizációt befolyásoló folyamatok

Fluidizációs berendezésben a következő folyamatok mennek végbe:

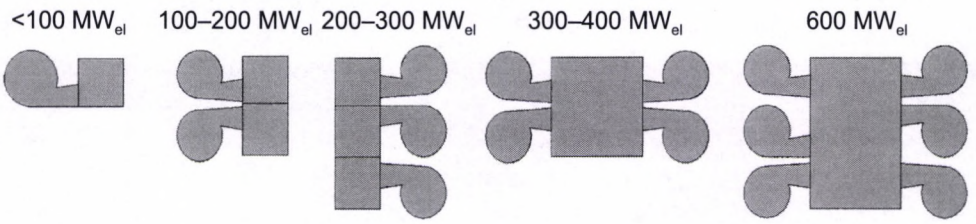
a) áramlástani folyamatok
b) anyagátadási folyamatok
c) hőátadási folyamatok
d) kémiai folyamatok

A fluidizációs tüzelés előnyei: az égés a tüzelőanyag és nagy inert-anyag keverékében történik, ezért a tüzelőanyag minőségére és annak változásaira érzéketlen, a tüzelési hatásfok magas, a tüzelőanyag-adagolás egyszerű, a távozó füstgáz kéntartalma alacsony, a füstgáz NO_x tartalma alacsony, a hőátadási tényező nagy, bio-tüzelőanyagok eltüzelésére versenytárs nélküli.

A fluidizációs tüzelés fejlesztésével számos gyártó és fejlesztő intézet foglalkozik. A blokknagyságok elérik a nagy teljesítményű szénportüzelésű kazánok közepesen nagy teljesítményfokozatát. Az Ahlstrom például a 600 MW_{el} villamosteljesítményű blokk létesítésére is képes.



8.11. ábra. Cirkulációs fluidizációs tüzelési rendszer. 1 – mészkő; 2 – szén; 3 – réteganyag; 4 – leválasztórendszer; 5 – cirkulációs ventilátor; 6 – levegőventilátor; 7 – fokozó ventilátor; 8 – szívó ventilátor; 9 – pernyeleválasztó; 10 – kémény; 11 – salaktároló



8.12. ábra. A fluidizációs tüzelés jelenlegi teljesítményfokozatai

Különleges, egytűzterű, belső cirkulációs, többfokozatú égést biztosító fluidizációs eljárást dolgozott ki a VEIKI, amely Hibrid-Fluid (Reményi et al.) néven került megvalósításra több erőműben.

Üzemi berendezések

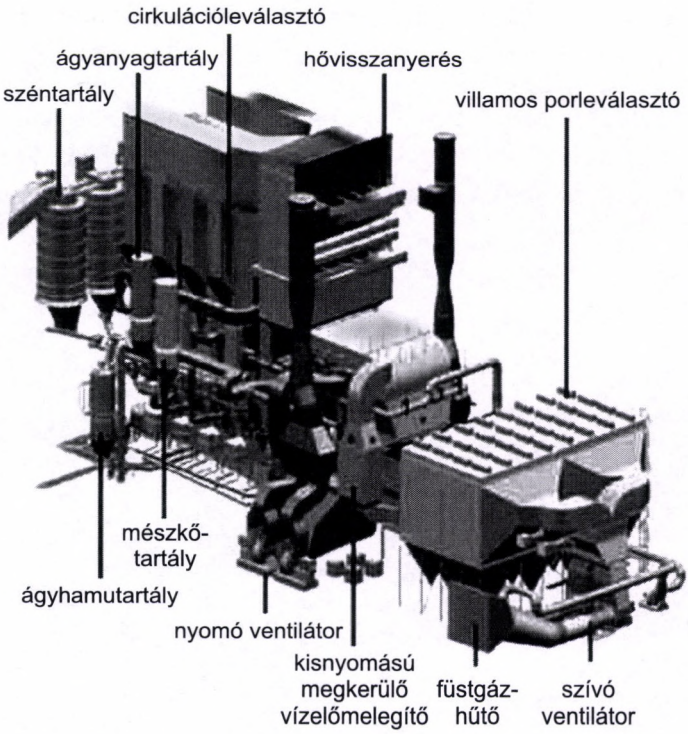
A fluidizációs technikát a petrolkémiában és a metallurgiában több évtizede alkalmazzák. A tüzeléstechnikában a technológiát 1968-ban kezdték alkalmazni. Az Ahlstrom cég a Pyroflow elnevezésű kazánját ipari kivitelben 1979-ben adta át üzemeltetésre, és 1987-ben az energetikai blokkban kivitelezett egység elérte a 110 MWe teljesítményt. A Pyroflow-rendszer előnyei:

- rugalmas tüzelőanyag-felhasználás,
- gyenge minőségű tüzelőanyagok eltüzelhetősége,
- többfajta tüzelőanyag együttes alkalmazása,
- nem szükséges komplex kémiai tisztítás,
- magas hatékonyság és rendelkezésre állás,
- egyszerű konstrukció,
- az emissziós előírások jól betarthatók.

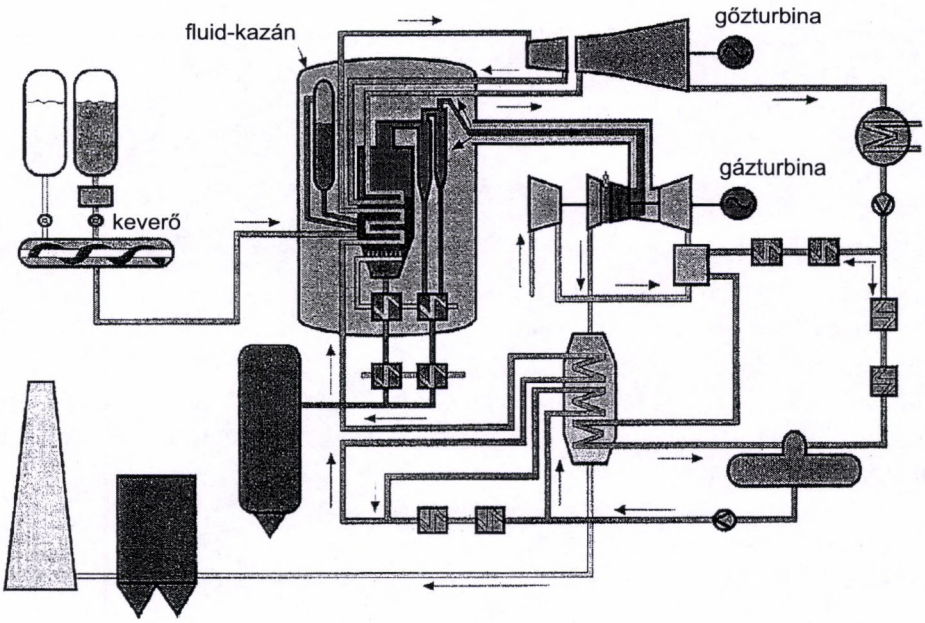
A cirkulációs tüzelési rendszerek közül a Pyroflow világszerte a legszélesebben elterjedt, mint azt már az 1995-ben üzembe kerülő 253 berendezés szám szerinti megoszlása jelezte. Az üzemben lévő kazánokból több 125 MWe teljesítményű, és 1993-ban lépett üzembe165 MW_e-os blokk. Az Ahlstrom 300 MW_e és 600 MW_e blokk teljesítményű blokk szállítását is vállalja. Ha többfajta tüzelőanyagra tervezik, például lignitre és feketeszénre, úgy a tervezést előnyös a gyengébb minőségűre végezni. Ekkor a tüzelőanyag-váltás üzemvitelileg megoldható. Fordított esetben kisebb konstrukciós módosítások szükségesek. Ha lignit tüzelőanyag kerül felhasználásra, akkor a primer levegő kb. 40% , a szekunder 60%, míg feketeszénnél a primer 60% és a szekunder 40%.

A 2009-ben a világ legnagyobb teljesítményű, 460 MW villamos teljesítményű blokkban elhelyezett, cirkulációs fluidizációs kazánját Lengyelországban, a Łagisza Erőműben helyezték üzembe. Ez volt a világ első szuperkritikus paraméterekkel rendelkező fluidizációs kazánja. A tüzelőanyag elsősorban bitumenes szén, de felhasználnak szénmosásból származó iszapot is. Tervezik biomassza bekeverését a későbbiekre. A tüzelőanyag-felhasználásban a rendszert különösen rugalmasra tervezték. Tájékoztatás szerint a nitrogén-oxid-kibocsátás 71%-kal, a szén-dioxid-kibocsátás 28%-kal csökken a korábbi állapotokhoz képest. Az üzemi tapasztalatok rendkívül kedvezőek.

A fluidizációs tüzelési rendszerben is megjelent a nagyobb tűztérnyomású kazánok alkalmazása, amely nagy égési sebesség elérése, kis berendezésméret, közvetlen gáz-gőz körfolyamat lehetősége, környezetszennyezők csökkenése stb. szempontjából jelentős előnnyel kecsegtet. Itt azonban nagy hátrány az alacsony (~850 °C) füst-gáz hőmérséklet, amellyel a korszerű gázturbinás körfolyam előnyeit nem lehet kihasználni. A nyomás alatti fluidizációs technikának valószínűleg a tüzelőanyag-elgázosítás területén lesz nagyobb jelentősége.



8.13. ábra. Cirkulációs fluidizációs kazánblokk elrendezési modellje



8.14. ábra. Nyomás alatti fluidizációs kazánblokk (gáz-gőz kombinált ciklus)

Konstrukció szempontjából a levegőfúvókák többféle változatát találjuk. A legelterjedtebb a fúvókacsöveken, radiális irányba elhelyezett furatokkal való megoldás, esetleg a furatok tengelyének belülről kifelé történő lejtésével az elrakódás megakadályozására és a holtterek csökkentésére. Újabb megoldás a levegőbefúvó csöveknek a sík ágylemezre való közvetlen becsatlakozása. A tüzelőanyagnak a levegőszekrénybe való behullását egy csőhurokkal akadályozzák meg.

A fluidizációs rendszerben a kénmegkötést számos paraméter, de a konstrukció is befolyásolja.

A legfontosabbak
- a tüzelőanyag típusa és szemcsézete,
- a mészkő reaktivitása és szemcsézete,
- az ágyhőmérséklet,
- a tüzelőanyag-adagolás kialakítása,
- a leválasztó ciklon hatékonysága,
- a pernye-visszavezetés,
- a légfelesleg,
- a primer és szekunder levegőmegoszlás,
- a gáz tartózkodási ideje.

A tüzelőanyag-betáplálás megoldása igen jelentős.

A fluidizációs tüzelésnél kedvezőek a viszonyok az NO_x-kibocsátás csökkentésére. A legfontosabb tényezők:
- a tüzelőanyag típusa és szemcsézete,
- az ágyhőmérséklet,
- a légfelesleg,
- a primer és szekunder levegőmegoszlás,
- a Ca/S arány,
- a tüzelőanyag-adagolás kialakítása,
- a füstgáz oxigénkoncentrációja.

Az SO_x- és NO_x-kibocsátáson kívül nagy jelentősége van a CO-, C_xH_x- és VOC-emisszió korlátozásának. Ennek mértékét a következő legfontosabb tényezők befolyásolják:
- tüzelőanyag fajtája és szemcsézete,
- a tüzelőanyag-adagolás megoldása,
- ágyhőmérséklet,
- légfelesleg, – levegőelosztás,
- a gáz tartózkodási ideje.

A fluidizációs tüzeléssel elérhető teljesítmény az utóbbi időben jelentősen nőtt. Korábban a világ egyik legnagyobb teljesítményű kazánját a Charbonnages de France a Stein Industrie-vel 1987-ben helyezte üzembe. A cirkulációs fluidkazán 367 t/h teljesítményű, 134 bar, 544 °C gőzparaméterű, 540 °C újrahevítésű gőzt fejleszt, 125 MW elektromos teljesítményű blokkba. A blokk tüzelőanyaga 33% víztartalmú szén-víz szuszpenzió vagy száraz iszap. A szén paraméterei 10 500 kJ/kg, 33% nedvesség, 45% hamu (száraz anyagra) és az iszapé 20 300 kJ/kg, 8% nedvesség és 28% hamu (száraz anyagra). A kéntartalom viszonylag magas, kb. 0,9 mg/kJ. A szemcseméret 0–3 mm közötti.

Ma már a szénportüzelés szempontjából is középkategóriába tartozó teljesítményű blokkokat építenek.

8.5. Vegyes tüzelés

A vegyes tüzelés csoportba minden olyan megoldás beletartozik, amelyeknél többfajta tüzelőanyagot tüzelnek egy időben. Korábban az olaj és gáz együttes tüzelése volt gyakori, manapság azonban az olaj gyakorlatilag kiszorult például a villamosenergia-fejlesztésből. Ma a leggyakoribb vegyes tüzelés a szén vagy gáz mellett a legkülönbözőbb bio-tüzelőanyagok felhasználása.

Az bioanyagok oxigéntartalma miatt az égetés során az égési levegőigény és a keletkező füstgáz mennyisége csekélyebb, mint a szenek égetésénél. Fontos jellemző a magas illótartalom. Gabonaszalma esetén például az éghető anyagok 82–86%-os részarányából 70–80% illó alkotó. Ezek az égés során 250–300 °C hőmérsékleten szabadulnak fel nagy mennyiségben.

8.7. táblázat. Különböző fafajták fűtőértéke

Fafajta	Fűtőérték (kJ/kg)
Fenyők	
Jegenyefenyő	17 648
Lucfenyő	19 478
Vörösfenyő	16 612
Lágyfák	
Fűz	17 012
Nyár	17 497
Nyír	18 439
Akác	17 845
Cser	18 134
Gyertyán	17 464
Juhar	17 774
Kőris	18 125
Tölgy	18 176

A tüzelés céljára hasznosítható faféleségek választéka széles: tűzifa, hasábfa, erdei aprítékfa, fűrészelési melléktermék. A fából nyerhető energia mennyisége a fűtőértékkel jellemezhető. A fa fűtőértéke függ a víztartalomtól és a fa fajtájától.

A fűtőérték változását a víztartalom függvényében a 8.8. táblázat mutatja.

8.8. táblázat. A különböző állapotú fák fűtőértéke

A fa állapota	Víztartalom	Fűtőérték (F)
Erdei frissességű	50–60%	7,1 MJ/kg
Egy nyáron tárolva	25–35%	12,2 MJ/kg
Több éven keresztül tárolva	15–25%	14,4 MJ/kg

A víz elpárologtatásához szükséges hő (kb. 2,5 MJ/kg) veszteségként jelentkezik.

A $C_6H_{12}O_6$ összetétele: 40% C, 6,7% H és 53,3% O. A számított égéshő 27 655kJ/mol, azaz

Száraz faanyag: 48–50% C, 43–44% O, 5–6% H.

ΔH: reakcióhő (negatív: exoterm reakció, pozitív: endoterm reakció)

Fatüzelés

A biomassza-tüzelés kialakítása jelentős átalakításokat igényelt az erőműben:

– a tűzifa fogadása vasúton és közúton,
– a famozgatás és -tárolás a telephelyen,
– a fa aprításának – aprítógép üzembe helyezésével történő – biztosítása,
– az apríték kazánba juttatása és hatékony eltüzelése.

A biomassza-tüzelés általában szénnel vegyesen történik, de az utóbbi években a biomassza részaránya fokozatosan növekedve 2004-ben már elérte a 80%-ot. A tiszta biomassza-tüzelés is lehetséges. Fontos tapasztalatok szűrhetők le az eddigi beruházásokból. Más, zöldmezős biomassza-tüzelést megvalósító beruházásokhoz képest rendkívül gazdaságos volt a meglévő energetikai háttér miatt.

8.9. táblázat. A termesztett növények egységnyi területre vonatkozó legnagyobb tüzelőhőhozama

Nemesnyár	130–350 GJ/ha
Fűz	350 GJ/ha
Energiafű	240 GJ/ha

A következőkben ismertetett néhány erőmű többsége már öreg erőmű, de mégis érdekesek azért, mert egy teljesen új tüzelési feladat, a biotüzelőanyagok tüzelési problémáinak megoldásához jelentős a hozzájárulásuk.

Ajkai Erőmű

Szén helyett fát felhasználva a VEIKI Hibrid-Fluid tüzelési rendszerű (szénpor- és fluidtüzelést együttesen alkalmazó) kazánokba a szénpor mellett fa-, faipari melléktermék-, erdészeti melléktermék- aprítékot adagolva a tüzelőberendezés csekély mértékű átalakításával lehetővé válik a biomassza erőműi energetikai felhasználása. A berendezés és tüzelési mód lehetővé teszi szén és biomassza változó aránya mellett is az erőműi követelményeknek megfelelő hatásfokot, rendelkezésre állást, szabályozhatóságot az emissziós határértékek alatti károsanyag-kibocsátást. Kisebb mértékben módosult a tüzelőanyagot a kazánba juttató berendezések és a kazán levegő-füstgáz rendszere.

A 2003-as év második felében kezdték el a biomassza fogadásához, tárolásához és előkészítéséhez szükséges létesítmények, berendezések építését. A teljes rendszer 2004. február 2-től üzemszerűen működik.

Az átalakítást követően az erdészeti, ipari és mezőgazdasági eredetű alapanyagok termikus hasznosításával biztosítani lehet a gazdasági és környezetvédelmi célok megvalósítását. A megújuló energiaforrások felhasználásával a biomassza alacsony kéntartalmának köszönhetően jelentősen csökken a kén-dioxid-kibocsátás. Hasonlóan kedvező a biomassza-tüzelés a CO_2-kibocsátás szempontjából.

A tüzelőanyag elsősorban keményfa rönk volt (2004-ben mintegy 160 ezer tonna), főleg cser és tölgy. Apríték több mint 60 ezer tonna, fűrészpor közel 7 ezer tonna és mezőgazdasági melléktermék (főleg törköly és kevés szalma) másfél ezer tonna volt. A biomassza-mennyiség összesen 21 (!) beszállító partnertől érkezett. A termelt villamos energia 2004-ben 208 GWh volt, melyből 184 GWh-t adtak hálózatra.

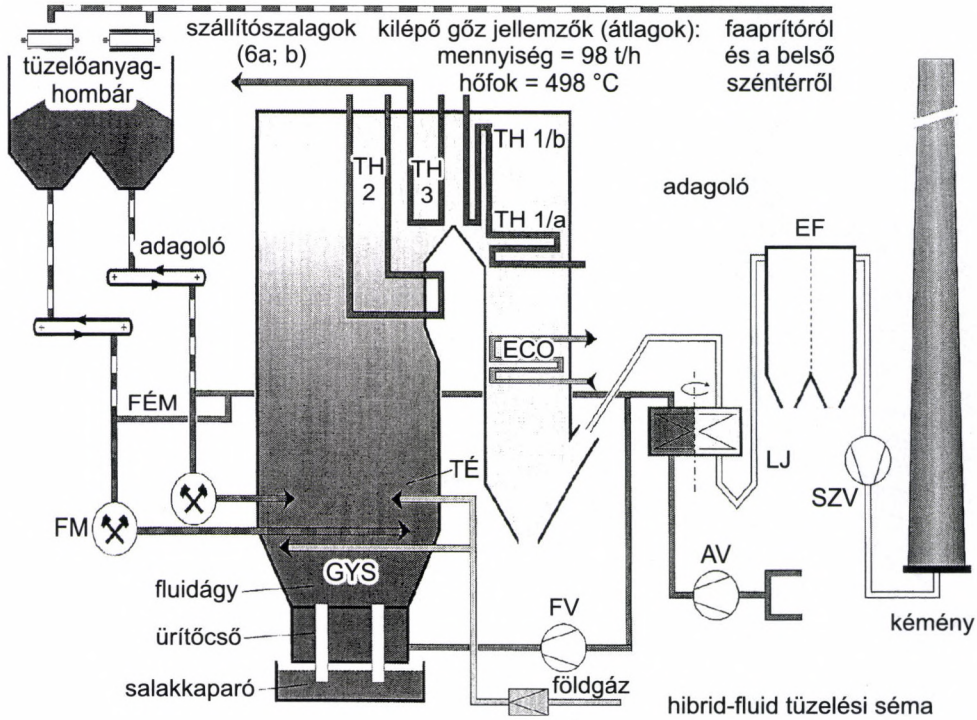
A környezetvédelmi paraméterek igen kedvezően alakultak. A szilárd, CO- és NO_x-kibocsátás a megengedett határérték 50-60%-át tette csak ki, míg az SO_2 kevesebb mint 1%-ot.

8.10. táblázat. Az Ajkai Erőmű szénpor-biomassza tüzelés emissziói fluidizációs kazánnal

Megnevezés	Határérték	Tény
Szilárd (mg/Nm^3)	30	16,4
CO (mg/Nm^3)	250	143,2
NO_x (mg/Nm^3)	300	148,8
SO_2 (mg/Nm^3)	200	1,1

A homogén biotüzelőanyag biztosítása kedvező, minden más tüzeléshez viszonyítva rugalmasabb a tűzvezetés stabilitása mellett. Célszerű közbenső tárolóteret is kialakítani. A kazán indítása könnyű, csak kevés gáz kell a begyújtásához, a tűz-

tér gyorsan eléri a gyulladási hőmérsékletet. Az elektrofiltereknél gondot okozott a por szállítása, mert a fahamu éghetője hajlamos volt még a gyulladásra.



Jelmagyarázat:
FM = fluid-malom, FÉM = felső égők, FV = fluid ventilátor, AV = aláfuvó ventilátor, SZV = szívó ventilátor, EF = elektrofilter, LJ = Ljungström léghevítő, TH = túlhevítők, TÉ = támasztóégők, GYS = gyújtó- segéd és rétegégők

8.15. ábra. 100 t/h gőzteljesítményű, szénpor-tüzelésűből VEIKI Hibrid-Fluid fluidizációs tüzelésre átalakított kazán

A Borsodi Erőmű átállítása biomassza-tüzelésre

A Borsodi Erőmű 2002-ben kezdte el a biomassza-alapú energiatermelést. Az először alkalmazott biomassza fűrészpor volt, amelyet 2003-ban követett a tűzifából előállított apríték felhasználása. A tűzifa-felhasználás bevezetése jelentős átalakításokat igényelt: meg kellett szervezni a gépkocsis és vasúti fogadást, a telephelyen belüli famozgatást, valamint az apríték kellő hatásfokú, környezetkímélő eltüzelését. Újabb tüzelőanyagok is szóba kerültek: például a napraforgóolaj gyártásánál keletkező maghéj, amely az egyik legkönnyebben égethető tüzelőanyagnak bizonyult.

A tűzifa zömében az észak-magyarországi erdőgazdaságoktól származik.

8.11. táblázat. Lehetséges erőműi biomasszaforrás

Alapanyag	Hozam t/ha	Fajlagos GJ/t	Energiaérték GJ/ha
Venyige	0,6	14,8	9
Szalma	2	13,5	27
Hígtrágya	0	0,2	0
Kínai nád	16	13	208
Energiafű	16	15	240
Cukorcirok	28	2,4	67
Csicsóka	50	1,8	90
Cukorrépa	39,5	1,7	67
Burgonya	17,4	2,3	40
Repce (észter)	1,8	14,8	27
Rostkender	16	13,5	216
Silókukorica	22	4,1	90
Fűz	60	11	660
Nyár	50	12	600
Akác	48	13	624

A mezőgazdasági melléktermékek között a szalma a leggyorsabban és legkönnyebben hasznosítható tüzelőanyag. A tüzeléstechnikai problémák felmérésére és megoldására kutatásokat és fejlesztéseket végeznek. Az erőmű átalakított kazánjainak biomassza-felvevő kapacitása 400 000 tonna/év, amely mintegy 330 GWh megújuló villamosenergia-termelésnek felel meg. Továbbfejlesztik a szén-biomassza együtt égetését 100%-os biomassza-részarányig.

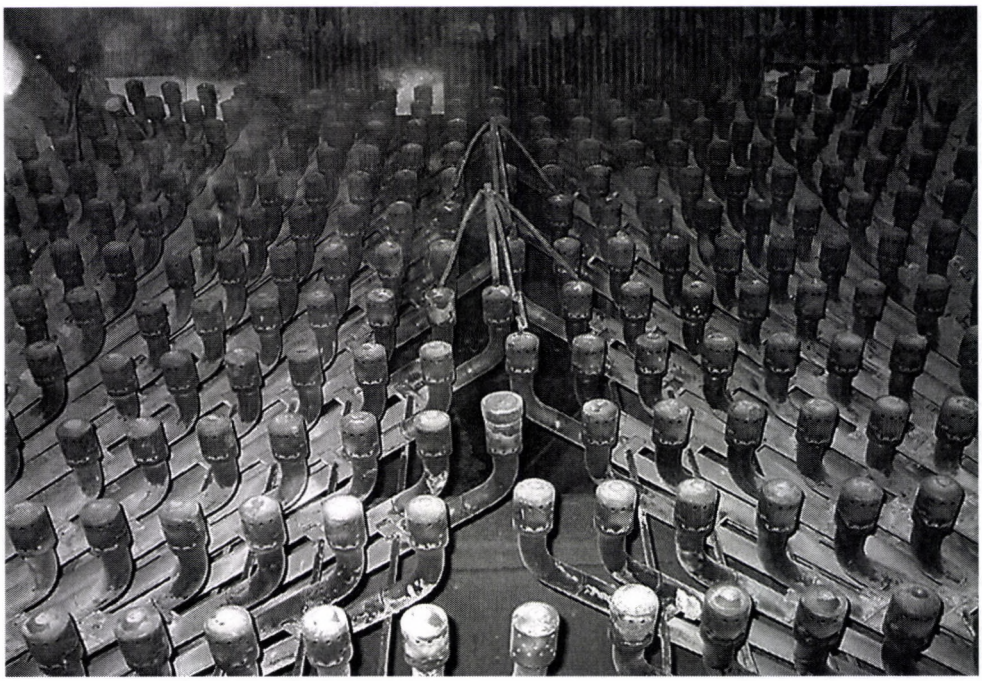
Vértesi Erőmű

A széntüzelésű erőművek gazdasági és környezetvédelmi lehetősége a biomaszszák tüzelése (az ún. együttégetési, például szén és biomassza program). Jelentős a kedvező árú mezőgazdasági hulladékok felhasználása, a szénnel történő együttes tüzelése. Sikeres tüzelési kísérletek voltak 20–40%-os kazánonkénti hőarányfelhasználással, ami jelentős CO_2-kereskedelmi bázist biztosít. A négy 230 tgőz/h teljesítményű kazánból az 1-es és 2-es blokk VEIKI Hibrid-Fluid átalakítása lehetőséget teremt szennyvíziszapok szénnel történő együttes tüzelésére is. Ez veszélyeshulladék-égető beruházások költségeit válthatja ki.

Két kazánt átalakítottak szén és biomassza együtt történő tüzelésére, fluidágy-technológia alkalmazásával. A Hibrid-Fluid kazánnal 1,2 PJ/év biomassza hasznosítható úgy, hogy a kazán átalakításával 30-40%-nyi biomasszát tüzel-

hetnek. Előnyös, hogy az oroszlányi bányából kitermelt szénnek magas a hamutartalma, mert ez segít a korróziós anyagok megkötésében. Olyan beszállítók vannak, akik 30, maximum 50 kilométeres körzetből el tudják látni az erőművet biomasszával. A hengeres erdészeti tűzifa, a faapríték, a mezőgazdasági eredetű hulladékok, melléktermékek, a termesztett kínai nád, a kommunális szennyvíziszap, valamint az egyéb hulladékok is szerepelnek a források között. Sajnálatos módon a Vértesi Erőművet leállították, és üzeme csak a kismértékű hőszolgáltatási igénytől függ.

Az átalakított kazán fluidizációs tüzelőberendezését mutatja a 8.16. ábra.



8.16. ábra. 230 t/h gőzteljesítményű, szénportüzelésről fluidizációs tüzelésre átalakított kazán fluidizáló fúvókarendszere

A Mátrai Erőmű Részvénytársaság

A visontai telephelyű Mátrai Erőmű Részvénytársaság a magyar villamosenergia-rendszerben a 950 MW beépített teljesítménnyel az ország legnagyobb korszerű széntüzelésű erőműve. A társaság saját bányáiban külfejtéses technológiával kitermelt lignitből állít elő villamos energiát.

A társaság a magyar nemzetgazdaság villamosenergia-fogyasztásának mintegy 13%-át fedi le. Az Észak-Magyarországon végighúzódó közel 1 milliárd tonnás lignitvagyon tartós biztosítékot ad a jövőbeni energetikai fejlesztéshez

A társaságnál működő villamosenergia-fejlesztő blokkok teljesítménye az alábbi:

I. blokk: 100 MW lignit
II. blokk: 100 MW lignit
III. blokk: 220 MW lignit
IV. blokk: 232 MW lignit
V. blokk: 232 MW lignit
VI. blokk: 33 MW földgáz
VII. blokk: 33 MW földgáz

A Mátrai Erőmű szénportüzelésű kazánjaiban jelentős mennyiségű biomasszát is eltüzel.

PANNONPOWER

A PANNONPOWER Holding Zrt. a társaság stratégiai lépéseként 2004-ben üzembe helyezte Közép-Európa legnagyobb biomassza-tüzelésű erőműi blokkját (melynek teljesítménye 49,9 MW). A széntüzelésű kazán átalakításával az erőmű jelentős lépést tett az emissziós értékek jelentős csökkentése felé. A Dalkia Energia Zrt. támogatásával – a stratégia megvalósításának második lépcsőjeként – további két biomassza-tüzelésű blokk kialakítása indult meg; egyrészt lágy szárú mezőgazdasági termékek (energiafű, szalma és más mezőgazdasági melléktermékek), másrészt energiaültetvényből és erdészetektől származó fatüzelőanyag felhasználásával, új tüzelőberendezés beépítésével, illetve a meglévő szénportüzelésű kazán átalakításával. Az újabb biomasszaprojektek megvalósíthatóságát komoly vizsgálat előzte meg; a tanulmányok eredményei alátámasztják, hogy a régió adottságai megfelelőek. Jövője nem teljesen tisztázott.

8.12. táblázat. Megújuló energiával történő villamosenergia-fejlesztés Magyarországon (GWh)

	2003	2004	2005
Biomassza	97	677	1568
Borsodi Hőerőmű	71	247	278
Tiszapalkonya	15	77	229
Pécs	0	129	344
Bakony V. VI.	0	13	60
Bakony VII	3	189	201
Mátra	1	14	445
Egyéb	7	8	11
Szél	4	5	9
Víz	23	42	50
Összesen	124	724	1627

(Forrás: Magyar Energia Hivatal)

A borsodi, a bakonyi és a pécsi erőművek részvételével 2004 decemberében megalakult a Biomassza Erőművek Egyesülése. A korszerű, környezettudatos technológiák iránt elkötelezett energetikai vállalatok gazdálkodásuk eredményességének előmozdítására, valamint szakmai érdekeik egységes képviseletére hozták létre az egyesülést.

A biomasszát is tüzelő erőművek

Faapríték-tüzelésű kiserőművek (BT<50 MW)

Bakonyi Bioenergia Kft (Ajka), 30 MW. 2004-ben termelt 208 GWh, kiadott 184 GWh;

Pannongreen Kft. (Pécs), 49 MW, 2004 júliusától, termelt 132 GWh, kiadott 128 GWh;

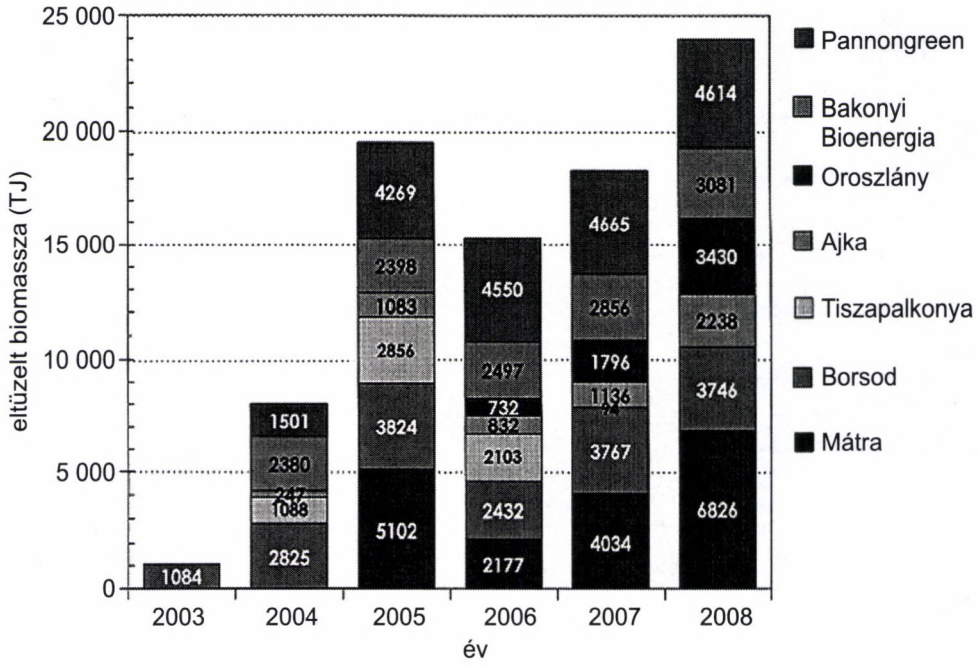
Biomasszát szénnel együtt tüzelő erőművek

AES Borsodi Hőerőmű (Kazincbarcika), 137 MW

AES Tiszapalkonyai Hőerőmű (Tiszaújváros), 200 MW,

Bakonyi Erőmű Rt. (Ajka), 102 MW

Mátrai Erőmű Rt. (Visonta), 950 MW



8.17. ábra. A magyar erőművekben néhány korábbi évben eltüzelt biomassza

Víztisztításoknál (Nyírbátor, Debrecen, Nyíregyháza);
Új-Tatabányán (Bánhída) 3 MW, 2006-tól

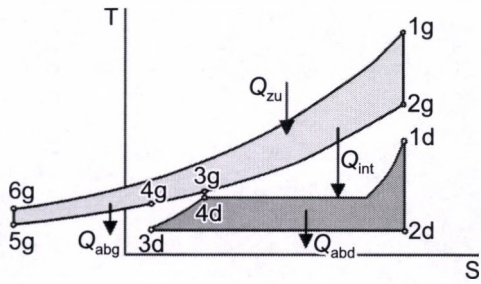
8.6. Gáz-gőz erőművek

A kombinált ciklus olyan termodinamikai körfolyamat, amely több egyszerű körfolyamatból áll. Két vagy több megfelelően választott körfolyamat, például a Brayton–Joule-ciklus és a Rankine-ciklus együttműködése a rendszer összhatásfokát javítja.

A kombinált ciklusú erőműben az első egység egy gázturbina-generátor, a gázturbinából távozó, még forró gázzal, amely egyébként veszteséget jelentene, gőzt termelnek. Ez gőzturbinát hajt, amely egy másik generátorral áramot termel. Ezzel a megoldással az elektromos energiatermelés összhatásfoka javul. Európában és Észak-Amerikában a legtöbb új gáztüzelésű erőmű ebben a rendszerben épül.

Minél nagyobb a hőmérséklet-különbség a bevezetett és elvezetett hő között, annál jobb lesz az erőmű hatásfoka (Carnot-ciklus). Ezt a célt a Rankine-ciklus (gőz) és Brayton–Joule-ciklus (gáz) kombinációjával érik el.

Ha az erőmű csak villamos energiát szolgáltat, 59% érhető el, hőszolgáltató erőmű esetén pedig, ahol a villamos energia mellett az erőmű ipari gőzt vagy fűtési melegvizet is kiad, az összhatásfok elérheti a 85%-ot is.



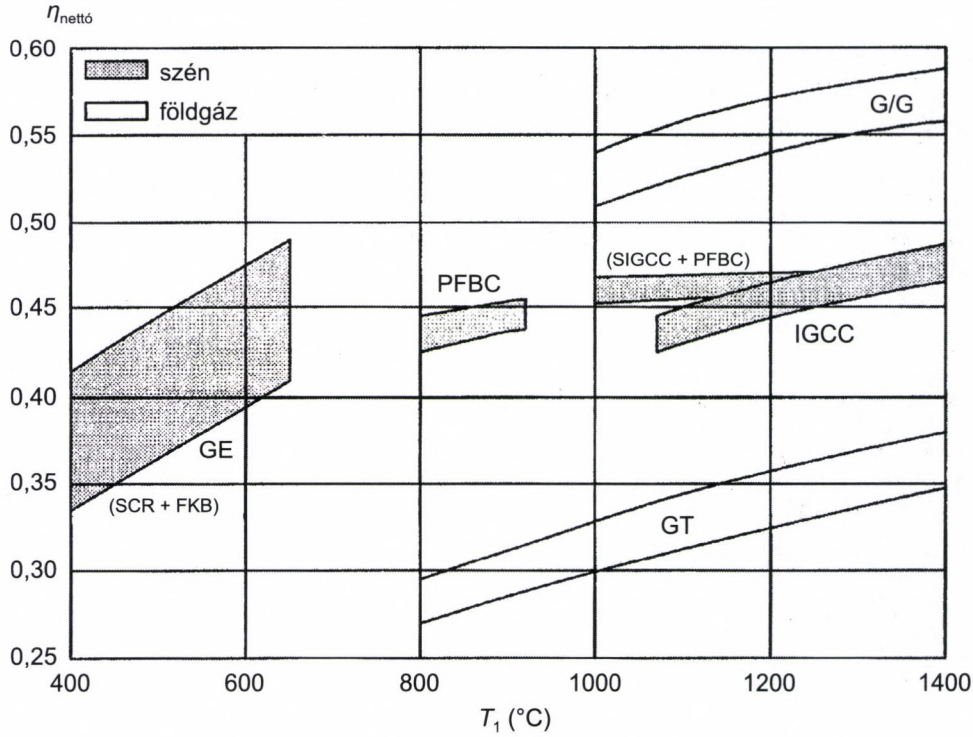
8.18. ábra. Gázturbinás és kondenzációs turbinás kombinált gáz-gőz erőművek

A kombinált gáz-gőz erőművek alaptípusai a következők:

- gázturbinához kapcsolt kondenzációs hőhasznosító gőzerőmű (az ún. kombiblokk). Az ilyen típusú gáz-gőz erőmű hatásfoka $\eta_{G/G}$ = 0,48–0,54 értéket érhet el. Az igen jó hatásfokot az teszi lehetővé, hogy ez a kapcsolás a gázturbinából kilépő hulladékhőt koncentráltan hasznosítja.
- feltöltött (túlnyomásos) kazánban integrált kondenzációs gáz-gőz erőmű. Az integrált gáz-gőz erőmű hatásfoka nagyon kedvező lehet $\eta_{G/G}$ = 0,42–0,45, de nem éri el a kombiblokk hatásfokát. A rosszabb hatásfok oka az, hogy a gőztermeléshez kapcsolódó gőzerőmű hatásfoka kisebb, mint a kombiblokk hatásfoka.

– kondenzációs gáz-gőz erőmű szénelgázosítással. A gázturbinában a nyomás alatti fluidágyról (fluidtüzelésű kazán) érkező tisztított füstgázok expandálnak, gőzt pedig a gázturbina kilépő gázai és a fluidágy merülő felületei termelnek.
– kondenzációs gáz-gőz erőmű nyomás alatti fluidkazánnal.

Az erőművek, köztük a kombinált gáz-gőz erőművek várható hatásfokát a 8.19. ábra mutatja. Az egyik szélső értéket a hagyományos gőzerőművek (GE) jelenlegi 40% alatti hatásfoka, míg a másik szélső pólus a földgáztüzelésű kombinált gáz-gőz erőművek (G/G) jelentik 50%-ot jóval meghaladó hatásfokkal.



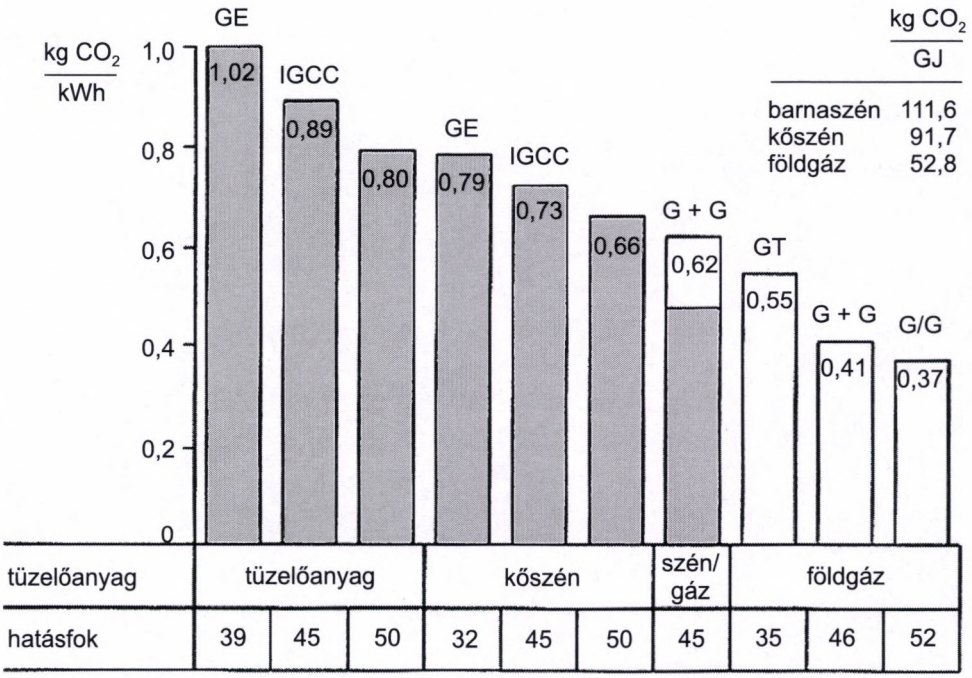
8.19. ábra. A széntüzelés különböző megoldásainál elérhető hatásfoktartomány

A „topping ciklus"-nak és a IGCC-nek (Integrated Gasification Combined – integrált elgázosítással működő kombinált ciklus) a kombinált erőművekben való kapcsolatáról szólva elmondhatjuk, hogy a „topping ciklus" lényegében a „gáz-gőz" körfolyamat és a konvencionális gőz körfolyamat összekapcsolása. A technikai megoldás igen változatos a konvencionális erőművi berendezésektől kezdve a nyomás alatti fluidizációs elgázosításig, minden változatra alkalmazható.

A rendszerben a fluidizációs elgázosítóban részben elgázosított szénből fejlesztett gáz és a gázturbina égőkamrájában, magas hőmérsékleten (innen a név, ez a „cik-

lus teteje"), továbbá az elgázosítóból kikerülő koksz a cirkulációs fluidkazánban a gőzfolyamat számára gőzfejlesztésre szolgál. Ezzel az eljárással adalékanyaggal (mészkő) jó kéntelenítés is elérhető.

A „topping ciklus" fő előnye, hogy az energiafejlesztési költségek a konvencionális szénportüzeléshez képest 20%-kal csökkennek. Az integrált elgázosításos kombinált ciklus az elérhető jó hatásfok és a fejlesztett gáz összetétele révén járul hozzá a CO_2-csökkentéshez. A CO_2 csökkentésére lényegesen bonyolultabb, az energiafejlesztés körfolyamatába iktatott eljárások is születtek. A különböző erőművek fajlagos szén-dioxid-kibocsátását mutatja a 8. 20. ábra.



8.20. ábra. Különböző típusú erőművek fajlagos szén-dioxid-kibocsátása

Az energiafejlesztést és a metanolgyártást összekapcsoló rendszer is létezik, amely rendkívül bonyolult, és gyakorlatilag minden probléma megoldását tűzi ki célul a legkorszerűbb technikai elemek alkalmazásával.

9. A fosszilis tüzelőanyagok jövője, alap-energiahordozók

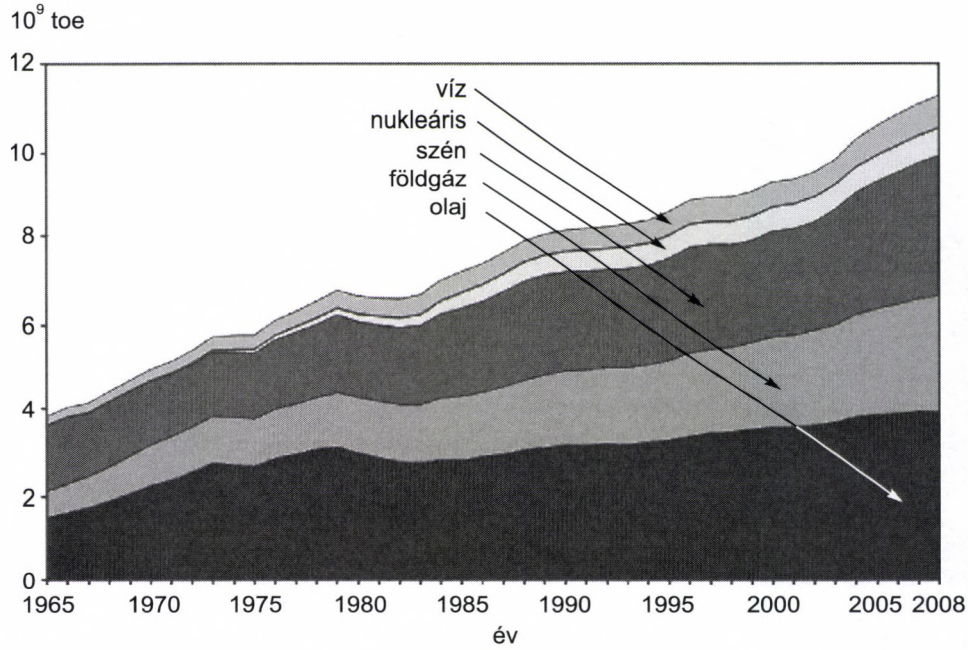
Az energiastratégiák kialakításakor legfontosabb feladat az energiahordozó kiválasztása. Ennek megtétele után a megoldandó problémák négy nagy csoportba sorolhatók:

1. A hozzáférés biztosítása (accessibility)
2. A különböző energiafajták rendelkezésre állása (availability)
3. A társadalmi elfogadás (acceptability)
4. A finanszírozhatóság (accountability)

A helyes döntésnél tehát az első és legfontosabb kérdés, hogy mivel gazdálkodhatunk, az adott energiahordozó milyen mennyiségben, minőségben és költséggel áll rendelkezésre. A vagyon mennyiségének értékelése sohasem zárható le, mert az új lelőhelyek felfedezésével és az új hasznosítási technológiákkal változik.

A világra vonatkozó adatokból lényeges aránytalanságok állapíthatók meg. A szén körülbelül a helyén van, a szénhidrogének túlreprezentáltak, míg a nukleáris energia alulreprezentált. Az olaj elsősorban a közlekedésben érdekelt, a villamos energiában kellene a nukleáris energia részarányát növelni a gáz rovására. Ez a jelenlegi technikai megoldások mellett problémás, a jövő pedig egyéb megoldásokat rejthet magában.

Az energetikában a primer tüzelőanyagok között a meglévő arányok változtatása nemcsak elhatározás kérdése. Az energiahordozó-arányhoz technikai berendezések tartoznak, a változtatás esetleg igen nagy tőkeigénnyel jár. Az atomenergia hasznosításának igénye legújabb generációs erőműket, nagyon költséges megoldásokat tesz szükségessé. Az energetikában a jelenlegi igen alacsony részesedésének (összes primer energiából 6-7%, villamos energiából 16-17%) megkétszerezése is nagyon nagy beruházásiköltség-igényt jelentene. Az elmúlt évtizedekben a fosszilis energiahordozók szerepe nyomasztóan nagy volt, aminek reálisan nézve lényeges változása nem várható, legfeljebb a csoporton belüli arányok módosulnak.

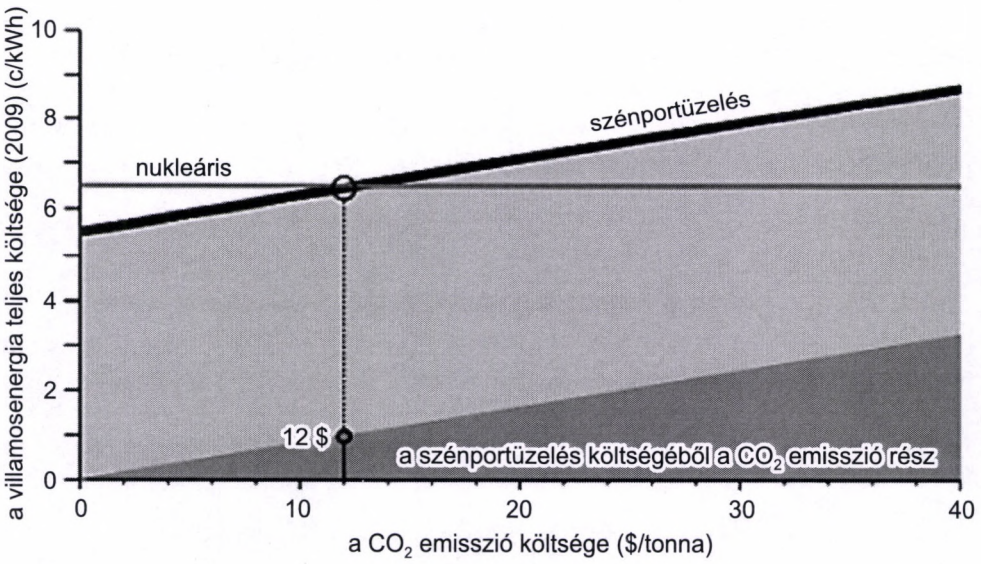


9.1. ábra. A különböző energiaforrások részesedése a világ energiafogyasztásából 1965 és 2008 között
(Forrás: BP Statistical Review of World Energy)

Amíg a szén-dioxidnak a klímaváltozásban betöltött szerepe nem kerül a helyére, addig a fosszilisokon belül elsősorban a legvitatottabb a szénfelhasználás lesz. A verseny legélesebben a szén- és a nukleáris energia között folyik. Hol az egyik, hol a másik alkalmazása során felmerült régebbi vagy újabb problémák erősödnek fel. Az utóbbi időkben elsősorban a szén-dioxid-piac árai jelentős befolyást (torzítást) gyakoroltak az értékelésre. A következő évekre, Fukushima okán, a biztonság problémájának hatása 2012-ben még kiszámíthatatlan.

A különböző megoldások összehasonlításához a költségek nem túl megbízhatóak és változnak.

A nukleáris erőművek összehasonlító költségeit tárgyaló MIT-tanulmányt 2009-ben tették naprakésszé. Kizárólag kereskedelmi állapotban lévő, támogatás nélküli konstrukciókat és üzemeket vettek figyelembe. A költségek tartalmazták a tüzelőanyag, a hulladékkezelés és a leszerelés terheit. A becsült villamos energia költsége 6,5 cent/kWh. Az OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development) tanulmánya 2005-ben beruházásnál 10% diszkont mellett, a legalacsonyabb költségre 5,7 cent/kWh értéket adott. Hulladék kezelése nélkül, a jelenlegi (2009) energiaforrások közül legolcsóbb a szénből fejlesztett villamosenergia 5-5,5 cent/ kWh értékkel. A fogyasztók részére, a nukleáris energia 5–10%-kal drágább, mint a legolcsóbb, szénbázisú energia.



9.2. ábra. A széntüzelésű és nukleáris erőművekben termelt energiaköltségek összehasonlítása (MIT, Massachusetts Institute of Technology)

A szénerőműveknél a környezetszennyezés csökkentésének költségei igen jelentősek. A közvetlen természeti energiák (megújulók), a köztudatban élő értéknél lényegesen kisebb mennyiségben állnak gyakorlatilag rendelkezésre, nem beszélve arról, hogy az általuk termelt energia költsége esetleg többszöröse a konvencionális erőművekben termeltéhez képest. A szénhidrogének legfőbb problémája a Föld felületén a források egyenlőtlen, kedvezőtlen eloszlása.

Az Európai Unió a klímaváltozásra hivatkozva ugyancsak túlzó (nem is indokolható) igényeket kíván az államokra rákényszeríteni. A fő probléma a kiotói egyezmény tízéves tapasztalata alapján vált világossá. Az egyezményben aláírt vállalásokat éppen a fejlett országok nem teljesítették, és csak a felvett új tagállamok iparának leállításai miatt egyszeri nagy csökkentéssel közelítették az EU-felajánlást. Az EU 15 fejlett országa a vállalt 8%-os csökkentés helyett 2%-ot teljesített, Kanada semmit. Az érdekellentétek a jövőben még nagyobbak lesznek, mert minden különösebb magyarázat nélkül megállapítható, és ki is kell mondani, hogy az ázsiai fejlődés (elsősorban Kína és India) az újabb ÜHG-csökkentési terveket lehetetlenné teszi. A koppenhágai konferencián bizonyos látszatvállalásokra születtek javaslatok, de még azok sem kerültek elfogadásra. Különösen fontos tehát a szén-dioxid hatásának reális megítélése, a jelenlegi jelentősen eltúlzott mérték helyett.

A legnagyobb probléma a megegyezések feltételeinek megalapozatlansága. A fosszilis energiahordozók jövőbeni szerepe, Kína és India fejlődése, a természeti közvetlen (megújulók) drágasága és korlátai stb. eleve átgondolatlanságot tükröznek.

Példa nélküli, ami Koppenhágában történt, azaz, hogy egy nemzetközi konferencián kétoldalú tárgyalásokon öt vezető ország (USA, Kína, India, Brazília és Dél-Afrika) készítette el az egyezményt. Ehhez csatlakozott az UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change) legtöbb ország (nem mind), további öt országgal (Bolívia, Kuba, Nicaragua, Szudán és Venezuela), és csak „egyetértőleg jegyezték" azt.

Még súlyosabb probléma, hogy a szén-dioxid (üvegházgázok) korlátozásával elérhető érdemi beavatkozás az éghajlatváltozásban tudományosan megalapozatlan.

A mérési adatokat többször korrigálják, a különböző prognózisokban több száz százalékos az eltérés (1,4–5,8 °C). Ezeket az adatokat nem szabadna a földi élet minden területére kiható döntésekre felhasználni. Elsősorban hiú remény a szén-dioxid-emisszió csökkentésre alapozni az időjárás-változás elkerülését.

9.1. A CO_2 szerepének reális értékelése

A fosszilis tüzelőanyagok széntartalma a légkörben volt, és csak egy kis rész kerül vissza az eredeti állapotába. Ezek egy része reverzibilis folyamatokból áll. Nemcsak évmilliók alatt volt jelentős változás a Föld felszínén, hanem néhány ezer év alatt is, ami rövid időintervallumnak mondható. Ilyen időtávban a Föld felületén jó néhány nagy változás is található.

A Föld termikus egyensúlyban van, és a globális változások léteznek, de a globalitás meghatározásának egyértelműnek kell lennie. Az ún. üvegházhatás is ismert, a mértéke és a hatása erősen vitatott. Okozói az üvegházgázok és elsősorban a fosszilis tüzelőanyagokból felszabadult szén-dioxid. A CO_2-abszorpció és -emisszió tulajdonsága biztosítja, hogy a Nap sugárzásából a hőenergia egy részét a Föld a légkörében visszatartja, és az utóbbi 150 évben az átlaghőmérsékletnek a jelenleg „elfogadott" 0,74 °C növekedését okozta. Tény, amennyire a mérések megbízhatóságát elfogadjuk, hogy az utóbbi 150–200 évben a légkör CO_2-koncentrációja kb. 280 ppm értékről kb. 380 ppm-re növekedett, és az átlaghőmérséklet kb. 0,5–0,7 °C-kal magasabb lett. Azonban az irodalmi adatok alapján sem mondható a kapcsolat korrelációnak, de konvergenciának sem. Az átlagoláshoz kiválasztott szakaszoktól függően sokféle megállapítást lehet tenni. A klímával kapcsolatos rendkívül széles körű kutatás nagyon sok fontos ismeretet szolgáltat, de a globális hőmérséklet-változásra és annak a szén-dioxiddal való kapcsolatára nem adnak megfelelő tudományos magyarázatot. Az egyértelmű eredményekért a Föld termikus egyensúlyára építő, egyszerű egyenletet kell alapul venni.

A Föld energetikai egyensúlyának a hőcsere mellett számos, vele közel egyenértékű összetevője van. A modellek eredményei közötti nagy eltérés alapján arra a következtetésre lehet jutni, hogy a bonyolult modellekben a sok közelítés az összekapcsolásukat nem teszi lehetővé.

A klímakutatásban az egyes jellemzők mérési pontossága meglehetősen korlátozott és nem mindig egyértelműen meghatározott (így a legfontosabb, a globális hőmérséklet sem, földfelületi, földközeli levegő, troposzféra-közép, stb.). Nem meggyőző, ha a legnagyobb felkészültségű kutatóhelyek eredményei között azonos bemenő paraméterek esetén is a változások prognosztizált adatai között az arány többszörös érték.

A globális hőmérséklet fogalma gyakorlati használatra nem értelmezhető. A különféle mozgalmak eddigi tevékenysége eredménytelenségük mellett bizonyos szakmai és gazdasági torzulásokhoz is vezetett.

Elsősorban az energetikánál jelentkeztek kedvezőtlen mellékhatások. Az energetikával szemben bizonyos ellenszenvet generált, de ez csak másodlagos probléma. Helytelen azonban, hogy az energiatakarékossággal összekötötték az ÜHG-csökkentést. Nemcsak a fosszilis energiahordozóból termelt energiával kell takarékoskodni, hanem mindegyik fajtával, a nukleárissal és a megújulóval is (az utóbbi a legdrágább energia, ha sokszor azt mondják is, hogy ingyen van).

A klímaváltozást gyakorlatilag csak a szén-dioxid-korlátozással az energetika számlájára írni indokolatlan és káros, mert eredmények nélkül igen nagy költségekbe hajszolja a világot. A jövő energiaforrásairól és az energiamixről való döntéskor az országoknak számos tényezőt kell figyelembe venniük, többek között az importenergia árainak növekedését, saját forrásaik kimerülését, a biztonságos ellátást, az üvegházgázok csökkentését, az új technológiák megjelenését.

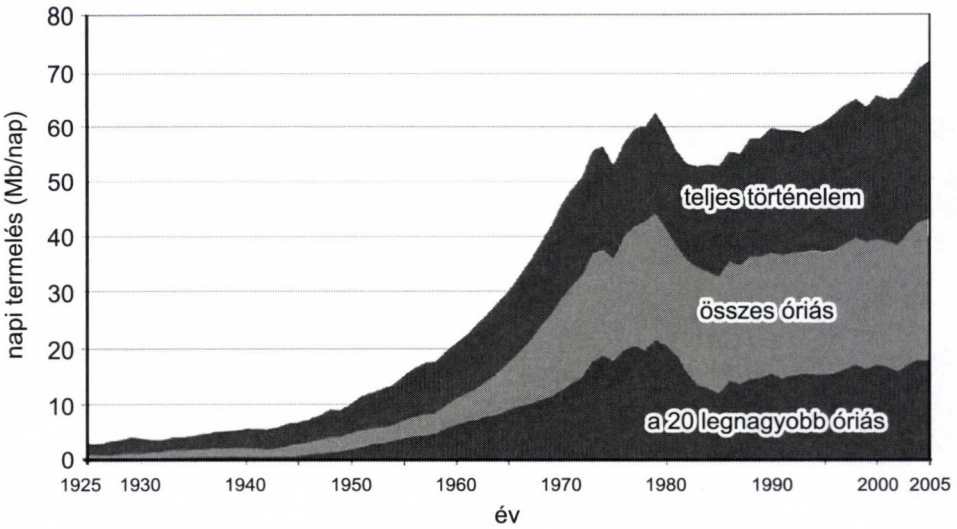
A 2007/2008-as pénzügyi válság a vártnál lényegesen nagyobb lett. Az energetikai súlypont országról országra változik. Az olaj és a szén továbbra is jelentős lesz az energiamixben. Az utolsó évtizedekben az energiahordozó-összetétel nem változott jelentősen, bár rövidebb periódust tekintve megfigyelhető volt a megújulók (víz nélkül is) arányának a növekedése

A világon az energia a gazdasági növekedéshez rendelkezésre áll, a környezet a kihívás. A konvencionális energiaforrásokat az alternatívokkal együtt kell használni. Mindkettőt párhuzamosan agresszívan fejleszteni kell. Mindenekelőtt a konvencionális (olaj, gáz, szén és nukleáris) energiahordozókkal kapcsolatos fejlesztéseket kell fokozni, hogy környezetbarát legyen a felhasználásuk. Az általuk biztosított nyugodt energiaellátás mellett lehet az új, alternatív technológiákat fejleszteni. A villamos energia a fejlődés hajtóereje, a fejlődő országokban elsősorban a villamosenergia-fejlesztésre a szenet fogják használni. Az alternatívoknak mint a nap-, szél-, geotermál- és a bioenergia igénybevételének a növekedése szükséges az energiamixben, de ez lassú folyamat. A következő évtizedben a szénhidrogének játsszák a legfontosabb szerepet. Az olajhomokból való termelés a 2007-es 1,2 millió barrel értékről 2020-ra megduplázódik, és eléri a 3 millió barrel értéket.

A szén döntő szerepet játszik az energiaigény kielégítésében és a szegénység visszaszorításában. Sokat hallani a karbonemisszió csökkentéséről, de keveset a szegénységről. A villamos energia a fejlődés hajtóereje, a fejlődő országokban a

villamosenergia-fejlesztésre elsősorban a szenet fogják használni. Technológiai fejlesztéssel elérhető a „zöldenergia-fejlesztés", közel zéró karbonkibocsátással (gyakran megtévesztő célzatú és tartalmú az elnevezés).

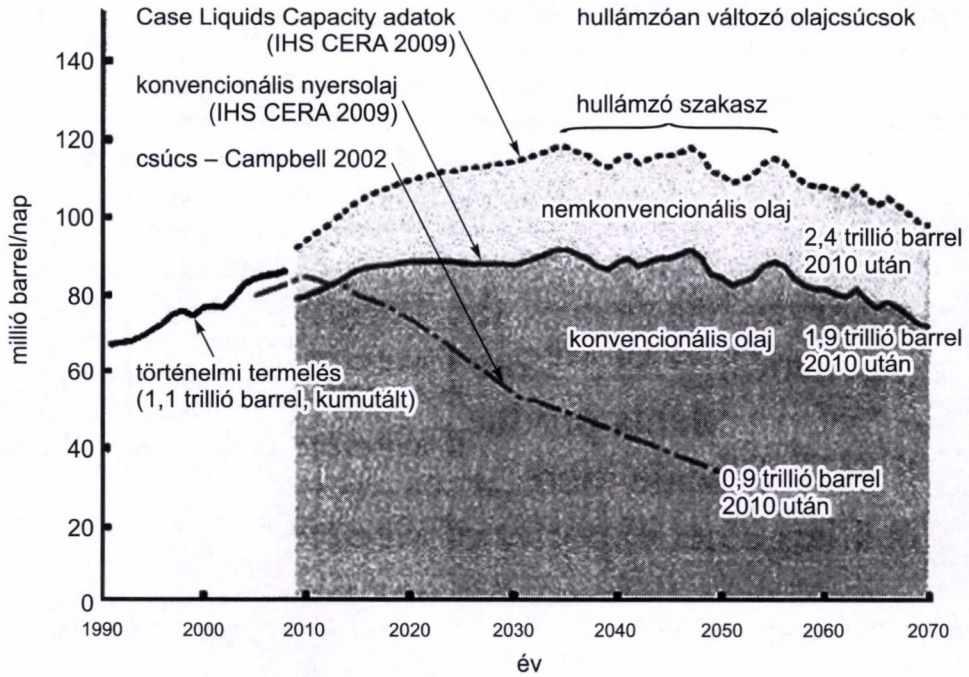
A széntermelés az elmúlt tíz évben gyorsabban nőtt, mint minden más energiahordozóé, világviszonylatban csak ez a fenntartható tüzelőanyagforrás, és ez biztosítja a kiemelkedő gazdasági fejlődést. Az International Energy Agency (IEA) a 2009-es Energy Outlookban 2030-ig átlag 1,5% primer energiaigény-növekedést prognosztizál, amely szerint az akkori 85 MM b/d (barrel/nap) olajfogyasztás 105 MM b/d értékre nő. A technológiáknál jelentős előnyt hoz a szén és a földgáz esetén is a kombinált ciklusú energiafejlesztés. A megújulókkal való energiafejlesztés még sokáig gazdasági problémát jelent. Indiában az olajtermelés százalékosan stagnál, 2009-ben az energiahordozók összetétele 10% gáz, 30% olaj, 52% szén, 1% nukleáris és 5% vízenergia. 2030-ig az összetétel várhatóan nem változik jelentősen. Kanadában sokat várnak az olajhomoktól, a 2020–2030 közötti termelésnél már 95 000 b/d mennyiséget érnek el. Új-Zélandon a 15 milliárd tonnával az egy főre eső szénmennyiség a világon a legnagyobb. Új-Zéland a széncseppfolyósítással 10 000 b/d mennyiséget olajáron tud gyártani gazdaságosan, ha az olaj ára 100 és 150 USD/bbl értéket ér el. Az olaj a legkritikusabb üzemanyag.



9.3. ábra. A világ nyersolajtermelésének változása 1925–2005 (1 barrel = 159 liter)

Az energiabiztonság szempontjából a gáz a legbiztonságosabb. Az „Energy Security Forum" szerint a piac bonyolultsága kihat a biztonságra is. A 70–75 USD-os olajár már kedvez a helyettesítésnek. Az energiaszektor beruházásai késnek, ami a gazdaságosságot rontja. Oroszország 2020-ig 20-25%-kal növeli a hazai energiafelhasználást. Itt van a világ gáztartalékának 34%-a. Növelték a tartalékot 4 Tm^3

(141 Tcf) gázmennyiséggel. A gáztartalék 90%-a Nyugat-Szibériában van, és legnagyobb részét Európába szállítják. Jelentősek a fejlesztések Kelet-Szibériában és Jamal-félszigeten. Kelet-Szibériából 2010–2020 között kb 110 milliárd m^3 (3,9 Tcf) gázt lehet nyerni. A Gazprom két új vezetéket épít. Az Északi Áramlat 55 milliárd m^3 (1,9 Tcf) évenkénti gáz szállítására alkalmas. A Balti-tengerben helyezik el, és 2012-ben indul a szállítás. A Déli Áramlat 63 milliárd m^3 (2,2 Tcf) gázt szállíthat, a Fekete-tengeren keresztül.



9.4. ábra. A világ nyersolajtermelésének prognózisa a CERA (Cambridge Energy Resources Associates) becslése alapján

A Világkereskedelmi Szervezet (World Trade Organisation, WTO) munkájához való hozzájárulásként a WEC (World Energy Council) a legkritikusabb, környezetvédelmet érintő eszközökről és szolgáltatásokról összeállított egy listát, amelynél nagyon figyelni kell reális vámok megállapítására vagy esetleg eltörlésére. A WEC 2007-ben szükségesnek látta ezzel komolyan foglalkozni, mert számos nemzetközi szervezet létesült és egyezmények születtek. Ezek egyike az Általános egyezmény a tarifákról és kereskedelemről (General Agreement on Tariffs and Trade, GATS) és a WTO- egyezmény, amely közvetlen befolyást gyakorolt a nemzetközi kereskedelemre. A multilateriális egyezményekben például a legfontosabbak egyike a szénhidrogénekről, a vegyi anyagokról szóló, az országokat hálózattal összekötő energetikai együttműködés.

A WEC 2009-ben készített egy tanulmányt „Az energetikai kereskedelem és beruházások szabályairól" címmel, amely kiemeli a WTO-szabályok hatásának fontosságát a nyitott energiapiacra, különösen figyelembe véve a pénzügyi válságnak a hatását a gazdaság újjászerveződésére. Ez érinti az energetikát is általában és különösen a környezetbarát eszközök és szolgáltatások széles körű elterjedése miatt.

A WEC az energetikai folyamatok legjobb ismerőjeként azt kérte a WTO-tól, hogy „az energetikánál a környezetvédelmet érintő eszközök és szolgáltatások terheit csökkenteni vagy eltörölni lehessen", és ezt egyezményben is rögzítsék. Az energiakereskedelem egyik legfontosabb feltétele az országok közötti fizikai és államközi kapcsolatok minél szorosabb megléte.

A változás legfontosabb feltétele a beruházási és a technikai fejlesztések lehetősége. Központilag a finanszírozás 2030-ig több mint 20 000 milliárd USD-t feltételez. Növelni kell a nemzeti és nemzetközi együttműködések hatékonyságát. Az elkövetkezendő évtizedekben a konvencionális és nem konvencionális fosszilis tüzelőanyag-technológiák szerepe lesz az uralkodó. A korszerű széntechnológiák, a mélyvízi feltárások, az olajhomok, a gázpala, olajpala stb. mint energiahordozóforrások felhasználásra kerülnek.

Számos nagy baleset történik a nagy biztonsági kultúra mellett is. A szervezeteknek össze kell fogniuk a megelőzésre és szolidarítást kell vállalniuk egymással. A katasztrófákért való felelősség és az infrastruktúrák rekonstrukciója volt a Világ Energia Tanács (WEC) megalapításának az oka. Az energetikai világnak meg kell értenie az új kockázatokat és a kritikus „valószínűtlenségeket". Ebben a WEC élenjáró volt a kockázatok és a kritikus valószínűtlenségek szcenárióinak elkészítésével.

A főbb tüzelőanyagok közötti választási lehetőségek három nagy csoportba sorolhatók:

1. Fosszilis energiahordozók:
   - szén
   - szénhidrogének
   - nyersolaj
   - földgáz
2. Nukleáris energiahordozók (felhasználásuk szerint)
   - fissziós
   - fúziós
3. Természeti közvetlen energiaforrások (megújulók)
   - víz
   - Nap
   - szél
   - geotermikus
   - biomassza

9.2. A világhelyzet

Az energiahordozó-vagyon mennyiségének értékelése sohasem zárható le, mert az új lelőhelyek felfedezésével és az új hasznosítási technológiákkal változik. Ennek részletesebb elemzése a fosszilis és a nukleáris energiahordozókkal kapcsolatosan a legérdekesebb.

Az első és legfontosabb kérdés az, hogy az adott energiahordozóból az ellátás mennyi időre biztosítható. Erre a kérdésre általában nagyon felületes választ kapunk. Egyértelművé kell tenni, miről beszélünk. A pontatlan meghatározások igen jelentős nézetkülönbségeket idézhetnek elő. Nem soroljuk fel a különböző forrásokban található fogalommeghatározásokat, és összehasonlításukkal sem foglalkozunk. A könyvben használt forrásoknál egyértelműek a fogalmak, az elemzések és azok használhatósága.

A fogalmak és használatuk:

- Műre való (ipari) igazolt vagyon (proved recoverable reserves) – az adott helyen, a jelen és a helyi várhatóan gazdaságos feltételek között működő és rendelkezésre álló technológiával feltárható, igazolt mennyiség (ezzel számolunk).
- Termelés (production) – az adott energiahordozó-vagyonból a vizsgált évben kitermelt mennyiség.

Elterjedten használják egy-egy energiahordozó értékelésekor a két mutató arányát.

- R/P – vagyon/termelés (reserves/production).
- Az arány dimenziója: év, mert tömeg/tömeg/év a műveletben részt vevő fogalmak. Felületesen értékelve azt mutatja, hogy az adott energiahordozó hány évig áll rendelkezésre. Energetikailag értékelve azonban ez a szám önmagában csak első tájékoztatásként fogadható el. Az energiahordozó jövőbeni szerepére csak úgy kapunk használható adatot, ha figyelembe vesszük a teljes energiahordozó-szükségletből az adott energiahordozó részesedési arányát is.

Az R/P viszony az adott energiahordozó jövőben várható szerepét nem fejezi ki. Azt feltételezi, hogy a vizsgálati évtől kezdve a vagyon a kitermelés értékével csökken, és a kitermelés mértéke nem változik. Az R/P mutató azonban új vagyon művelésbe lépése nélkül folyamatosan csökken, a végén a vagyon elfogyása miatt zérus lesz. Az összes energiaigényből az adott energiahordozó részesedése egyéb feltételek változatlansága mellett nem változik.

Az energetikában, tehát az adott tüzelőanyag szerepének értékeléséhez kiegészítő információk szükségesek. Mind a nevező, mind a számláló változásával erős módosulások lépnek fel. A termelés változása erős torzulást adhat. A termelés leállítása például a mutatót értelmezhetetlenné teszi.

Javasolni lehet egy új mutató bevezetését, amely az adott tüzelőanyag szerepének megítéléséhez összekapcsolja a vagyonnak az összes energiafelhasználásból való részesedését.

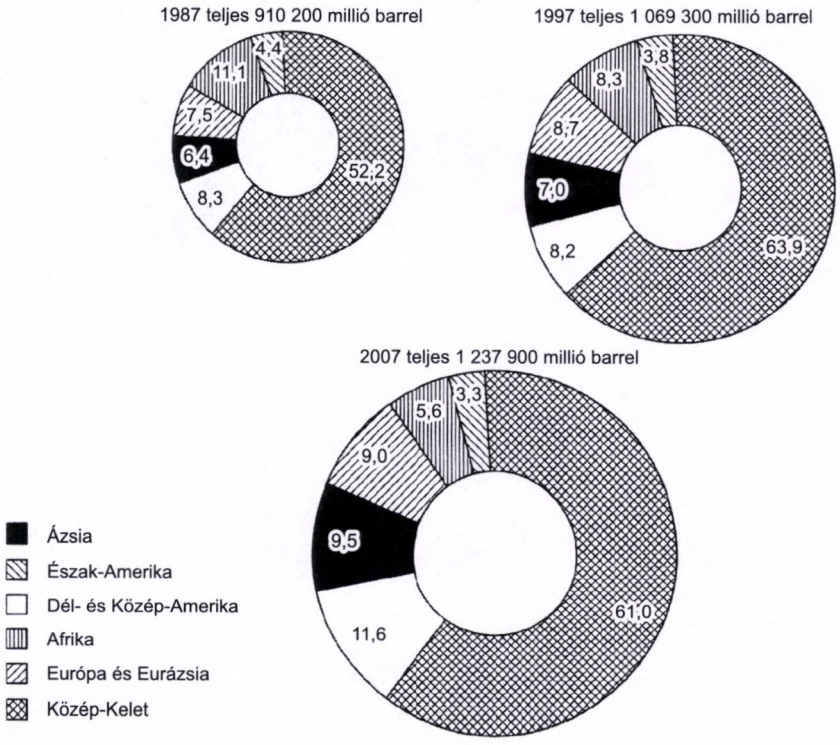
Az R értéke a Földön elvileg (a technika színvonalától és a gazdaság igényeitől függően) meghatározható érték. Az energetikában azonban egy normál értékkel kell számolni, ami a feltárásoktól, a vagyon fogyásától, az újabb lelőhelyektől, gazdaságossági határértéktől, a technológiától stb. függ. Mindenképpen, tehát a gyakorlatban az adott időben létező érték. A P értékét az objektív tényezők mellett számos szubjektív befolyás is éri, például a társadalmi megítélés, technológiai tényezők stb. A termelés csökkentésekor esetleg félrevezetően nagy értéket érhet el.

A javasolt új (Re = R·P) mutatóban az energetikában betöltött szerepet is figyelembe vesszük.

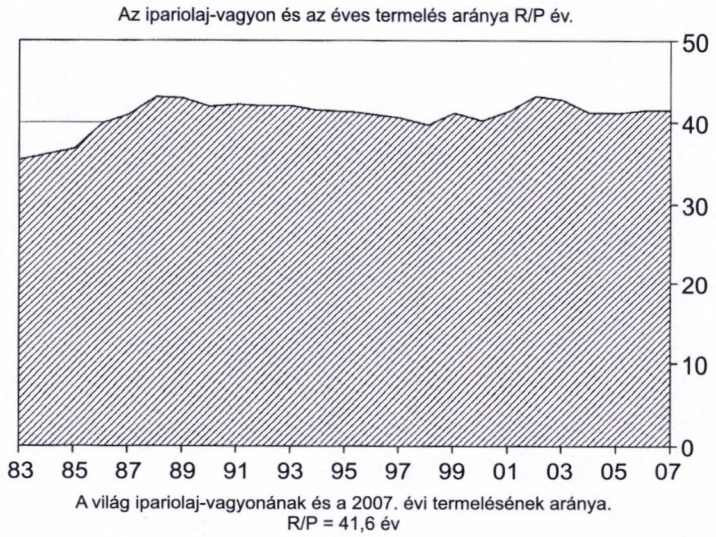
9.1. táblázat. A „Re" mutató értékei a világ energiahordozó-vagyonára

	Műre való vagyon	Termelés	Vagyon% Termelés%		
	mtoe	%	toe/év	%	Re = R · P
Olaj	168 600 (1287000 mbl)	13,49	3 922,8	35,6	480,24
Földgáz	159 624 (177,36 trill.m^3)	13,01	26 37,7	23,8	309,64
Szén	591 224 (847488 mt)	48,26	3 177,5	28,6	1380,24
Urán	305 000 (3297 kt)	29,9	622,0	5,6	139,44
Világ	122 4448	100	11 099,3	100	10 000
Világ					R/P 110,32 év

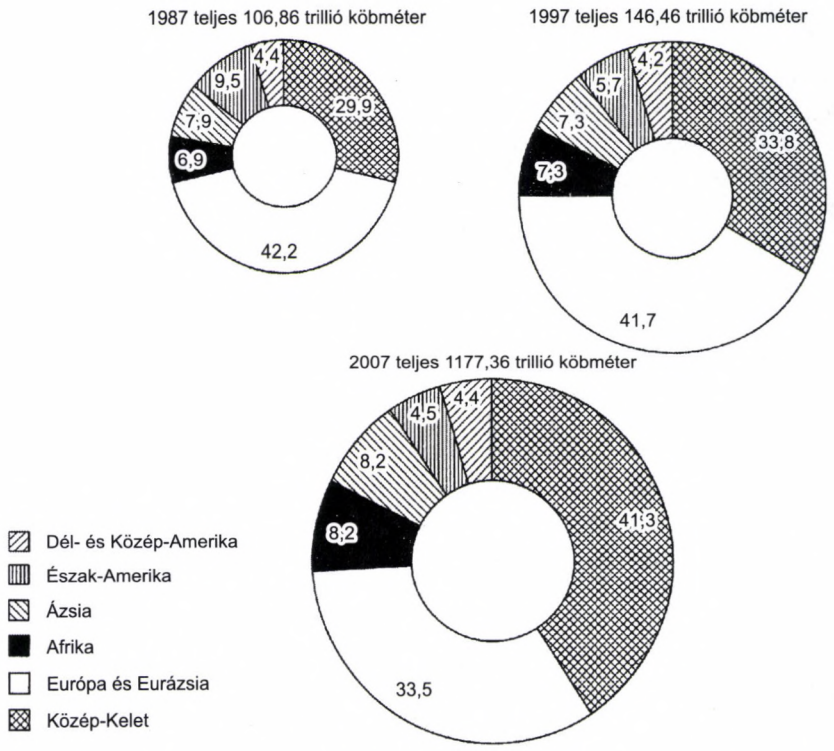
Az Re jellemző használatának problémáit és korlátait tisztázni kell. A jellemző tájékoztatást ad arról, hogy a többkomponensű rendszerben az adott tüzelőanyag a vagyon által adott lehetőségek mellett az adott időben milyen súllyal vesz részt az energiaigények kielégítésében. Jelzi, hogy a rendszerben mennyire biztosított a többféle energiahordozó viszonylag egyenletes eloszlása, a többtámaszú energetika. Egyfajta tüzelőanyagos rendszerre és a teljes ellátás értékeléséhez az átlagos R/P mutató is elégséges. Az Re változása az R/P mutatóhoz hasonlóan a vagyon és a termelés változásától függ, de az arány helyett a szorzattal képzett jellemző rögtön a rendszerről is tájékoztat. Az Re többkomponensű rendszerben egy-egy komponens energetikai súlyát jellemzi. Felhívja a figyelmet arra, vagy a vagyon kevés, vagy a termelés növelésének lehetőségét kell megvizsgálni. Természetesen az egyes összetevőkre számolt Re-számok számtani összege nem adja ki a rendszerre számolt átlagos Re-számot, ami 10 000. Ha a vagyon és a részvétel is egyforma érték, mondjuk négyelemes rendszernél 25–25%, akkor Re értéke 2500, a kivételes érték, amikor a mutató additív.



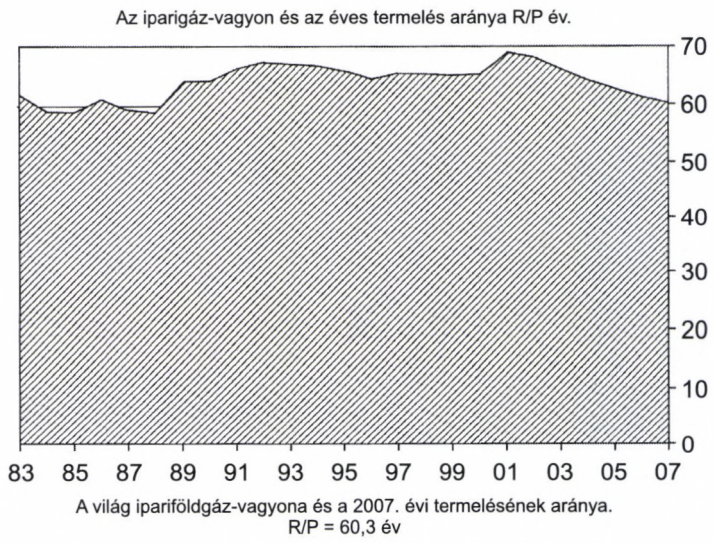
9.5. ábra. Az olajipari vagyon eloszlása az 1987-es, az 1997-es, illetve 2007-es évben (%)



9.6. ábra. Az olaj számított R/P értékének változása



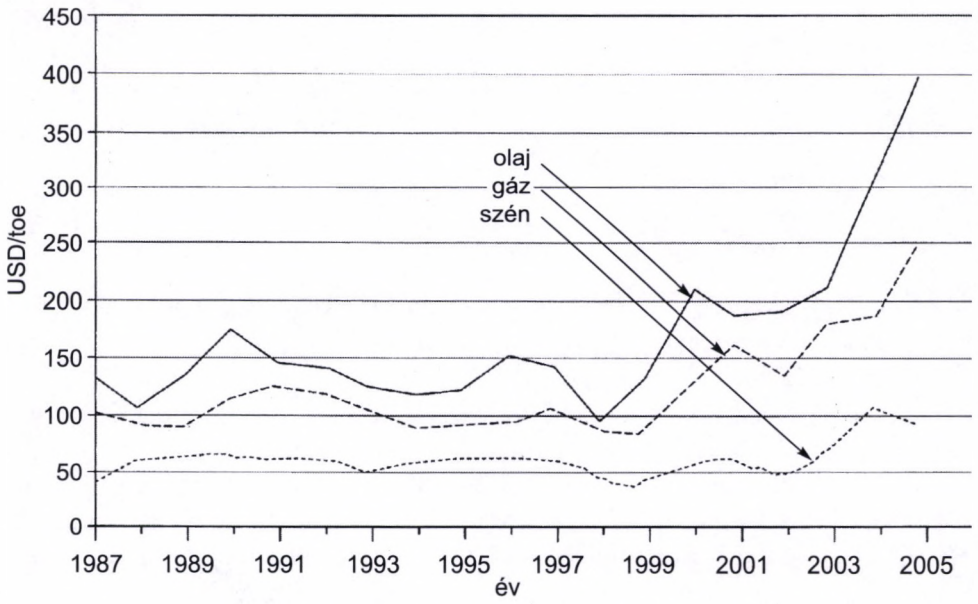
9.7. ábra. A földgázipari vagyon az 1987-es, az 1997-es, illetve 2007-es évben (%)



9.8. ábra. A gáz számított R/P értékének változása

Az R/P érték elsősorban az adott időpontban a helyzet felmérésére ad tájékoztatást. Fontos, hogy a teendőket és azok sürgősségét is meg tudjuk határozni. Tájékoztató jellegére rávilágít, ha különböző tüzelőanyagokra néhány évtizedre visszamenőleg vizsgáljuk a műre való (ipari) vagyon és az R/P változását. A következőkben a British Petrol (BP) elemzése alapján összefoglaló tájékoztatást adunk, amely bemutatja egyrészt az olaj- és a gázforrások változását, másrészt érzékelteti, hogy mennyire bizonytalan az R/P mutatónak a források kimerülésének értékelésére való használata.

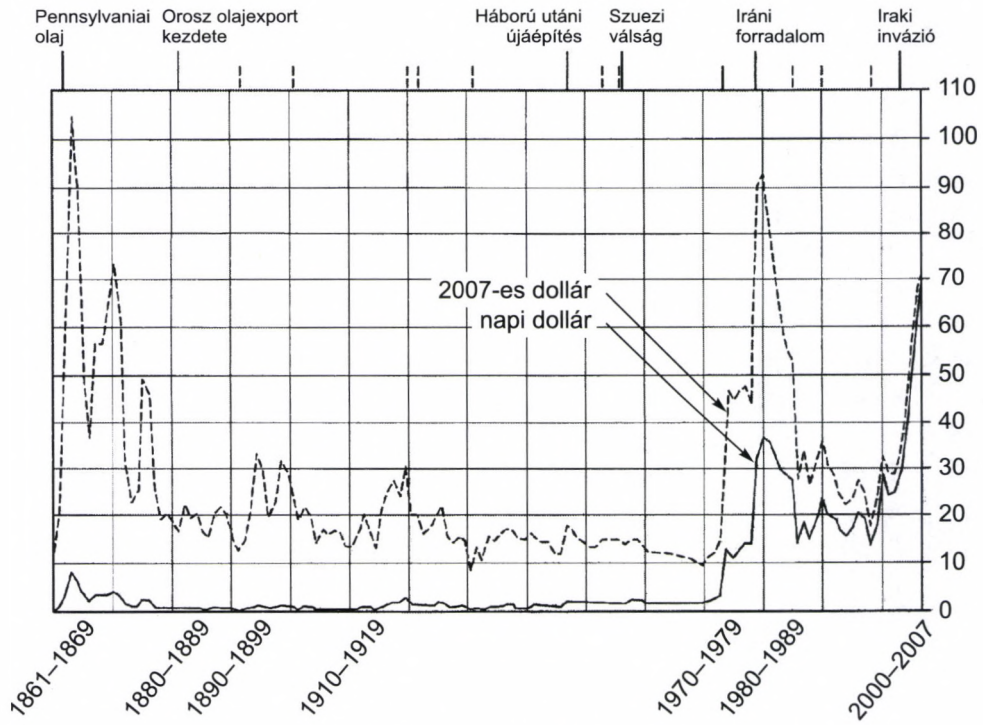
A 9.5.–9.8. ábrák a 2007. évtől visszamenőleg 20 (24) évre szemléltetik a helyzetet olajra és gázra. Más energiahordozókra is szerkeszthetők hasonló ábrák. Megállapítható, hogy az R/P viszonyban mind a számláló, mind a nevező változik, de az elmúlt évtizedekben az arány közel állandó maradt. Az új feltárások kompenzálják a felhasználás növekedését, így érthetővé válik, hogy múlnak az évtizedek, de az adott energiahordozó rendelkezésre állásának időtartama nem nagyon változik. A világ energiafelhasználásában a szén rovására a földgázfelhasználás jelentősen megnőtt. Az energiafelhasználást jelentősen befolyásolja az árak mértéke és stabilitása. Az utóbbi két évtized árváltozásait szemlélteti a 9.9. ábra.



9.9. ábra. Az energiahordozó-árak alakulása az utóbbi közel két évtizedben

A szénhidrogénárak geológiai és számos technikai oknál fogva hajlamosak időszakosan extrém kiugró értékekre. A legkevésbé ingadozik a szén ára, bár a tüzelőanyagok árai mindig hatnak egymásra.

Az árváltozások közül a legkritikusabb ingadozásokat az olaj mutatja (2008. évben elérte a 157 USD/bl értéket, ami néhány hét leforgása alatt 39 USD/bl értékre esett vissza). Közel 200 évre visszatekintve láthatjuk az olajárváltozást a 9. 10. ábrán, folyó áron és a 2007. év dollárértékére normálva.

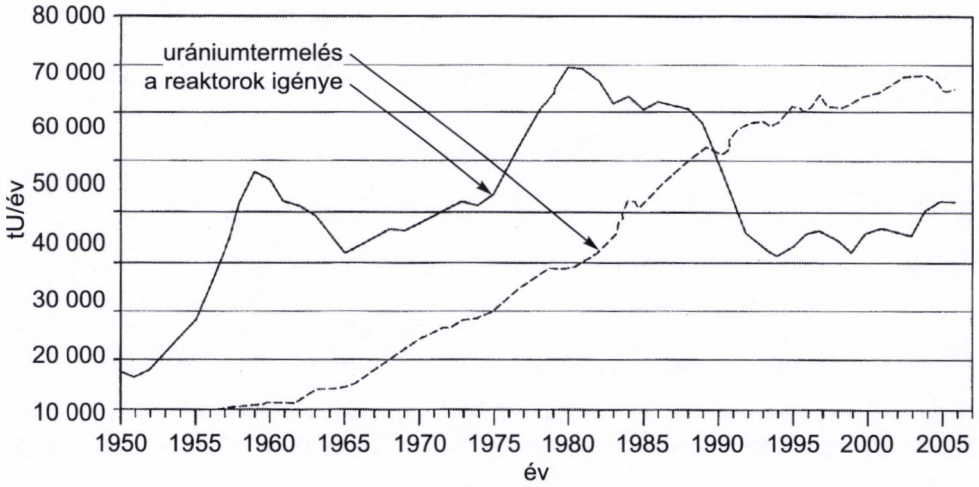


9.10. ábra. A nyersolajár változását befolyásoló világesemények

A legbonyolultabb a nukleáris energia szerepének elemzése. Néhány elemet ki lehet ragadni, de nehéz felmérni a már jelenben is reális megoldások és még inkább a jövő lehetőségeinek elterjedését.

Jelenleg a nukleáris energia a primer energiaigény 6-7%-át, a villamosenergia-fejlesztés 17%-át fedezi. Urániumtermelés jelenleg 19 országban folyik. A 2004–2006 időszakban a termelt urán mennyisége 40 200 tU és 41 700 tU között változott, a 2000–2003 években 15%-os növekedést mutatott. Ez a termelés a működő reaktorok igényének 60%-át fedezi. Az utóbbi 20 évet tekintve a termelés és a reaktorok igénye közötti különbség értékét a 9.11. ábra szemlélteti.

A termelés és igény különbségének egy részét másodlagos források fedezik. A primer urániumtermelési kapacitás jelenleg évente 52 000 tU, de 2025-re eléri a 86 000 tU értéket, ami alacsony nukleáris villamosenergia-fejlesztési prognózis eléréséhez is szükséges. A magasabb tervezési szintek eléréséhez 2030-ra 129 000 tU évi termelési teljesítményre lenne szükség, 130 USD/kgU ár figyelembevétele mellett.



9.11. ábra. Az éves urántermelés és a reaktorok igényének teljes mennyisége 1950 és 2006 között

A primer urániumtermelés melletti hiány kiegészítésére fontos a katonai készletből lehetséges pótlás. A másodlagos források közül jelentős a reprocesszálás, az MOX (mixing fuel), a plutónium stb.

9.3. Magyar energiastratégia

A magyar energiastratégia kidolgozását az érdekektől és mozgalmaktól függetlenül kell elvégezni, és természetesen biztosítani kell a társadalmi elfogadást. Ennek feltétele, hogy minden megoldásnak korrekt szakmai és gazdasági alátámasztása legyen. Ekkor a bölcs társadalom megfelelő döntést fog hozni. A tisztességes szakmai döntésnél nincs demokrácia és nem kell konszenzus, hanem tényeken alapuló érvelés szükséges. A gazdasági döntésnél már biztosítani kell a változatok közötti választási lehetőséget. A többletköltségek tudatában és vállalásával lehet csak választani költségesebb megoldásokat is.

A magyar energetikának számtalan neurotikus pontja van, és tovább rontja a helyzetet, hogy a társadalom tájékozottsága sem megfelelő.

A hazai energiastratégia kidolgozásánál helyes több lehetséges változat kidolgozásából kiindulni. Az energetikai létesítmények megvalósítása nagyon hosszú időátfutású, ezért néhány sarokpontot rögzíteni kell. A magyar helyzetet figyelembe véve a mozgástér nagyon szűk, tehát ki kell jelölni néhány sarokpontot.

Ezek a következők:

1. A hazai vízenergia-hasznosítási lehetőségek korrekt bemutatása (Nagymaros kérdése)

2. A hazai energiahordozó-források hasznosítása, különös tekintettel a lignitvagyonra.
3. A természeti közvetlen energiaforrások (megújulók) szerepe és hatása (támogatás, beruházás stb.)
4. A nukleáris energia jövője, megoldások (részben elhatározott)
5. A globális felmelegedéssel kapcsolatos magatartás

A magyar energiastratégia kidolgozásának alapja a hazai energiahordozó-vagyon szűkösségének figyelembevétele és az energiahordozók közötti arány javítása kell legyen. A megállapításokat, torzító befolyásoktól mentesen, tisztán szakmai és gazdasági érvekkel kell alátámasztani.

Az energiastratégia kidolgozásának alapját az összes energiafelhasználás összetétele és a villamosenergia-fejlesztésben az energiahordozók megoszlása jelenti. Mindkettőben a szénhidrogének aránya túlzottan nagy. Annál inkább fontos az arányjavítás szempontja, mert mind az olaj, mind a gáz túlnyomórészt importból származik, és a jövőben a hazai források kimerülésével csökken a hazai részarányuk. Egészségtelenül nagy az összes energiában a gáz részaránya, bár a világon igen nagy kapacitású források lehetőségéről találni tájékoztatásokat. Az olaj részesedése is túlzott, de csökkentése nem nagyon lehetséges, mert alapvetően a közlekedés igényeit elégíti ki.

Az arányváltozás korlátozott, és elsősorban a villamosenergia-ipar energiahordozó-felhasználásánál lehet elérni. A lakossági gázfelhasználást célszerű megtartani. Az erőművekben eltüzelt gáz mennyiségének csökkentését a jövőben szénerőművek és atomerőművek létesítésével lehet elérni. A villamosenergia-ipar energiahordozó-eloszlását tekintve szénerőművek létesítése lenne kívánatos. Az összes energiafelhasználási arányt tekintve a nukleáris energiafelhasználás növelését kell előtérbe helyezni a gáz kiváltására.

Döntés volt a Mátrai Erőműben egy, hazai lignitre telepítendő 440–500 MW-os teljesítményű blokk létesítésére. Ez akkor is helyes lépés volt, ha az erőmű külföldi tulajdonban van (RWE, Rheinische Westfalische Elektrizitästwerke). A blokknak többségi tulajdonosa a magyar MVM (Magyar Villamos Művek) lett volna. Sajnálatos módon már kétszer szakították meg a megvalósítást, amiért igen jelentős többletköltség jelentkezik.

Helyes az előkészítése egy új atomerőműi blokk létesítésének, célszerűen a Paksi Atomerőmű telephelyén. A fűtőanyag ebben az esetben is import, de beszerzése nem látszik problémásnak. Előnye az is, hogy nagy biztonsági tartalék képezhető.

Az erőmű-fejlesztési program folytatásaként meg kell vizsgálni egy import feketeszénre középtávon létesítendő új, nagyerőmű építését is. Importszén a világ legkülönbözőbb helyeiről beszerezhető viszonylag jól tervezhető áron. A fogadás Európa több nagy tengeri kikötőjében lehetséges (nagyon kedvező lenne a Rajna–Majna–Duna vízi út).

A megújuló (közvetlen természeti) energia részaránya az összes energiából, a megújuló energiák alkalmazásának kiszélesítésével kapcsolatosan sokirányú vizsgálatot igényel, és elemzést kell végezni. Az alkalmazás előnyeit, hátrányait és különösen a gazdasági kihatását világosan fel kell tárni és közismertté tenni. A jelen helyzetben a társadalom ösztönösen vagy különféle hatásokra alakítja ki véleményét. A jelenlegi módszer helytelen. A berendezések importból származnak és a tulajdonos is több helyen külföldi. A támogatás így jelentős terhet jelent a gazdaságnak. A megújulók szélesebb körű alkalmazására csak a berendezésekre jelentős saját gyártási kapacitás létrehozásával lenne célszerű alapozni (lásd: Németország, Spanyolország stb.). A megújulók már túl vannak a bevezetési szakaszokon, a saját, támogatás nélküli, de legalább lényegesen csökkentett mértékű támogatással kell gazdaságosságukat biztosítani.

Mielőbb el kell (2012) határozni a hazai vízerő-hasznosítás előítélet nélküli felülvizsgálatát. Ehhez segítségül szolgál a „21. Világ Energia Kongresszuson" elhangzott szlovák tanulmány. A Duna vízenergiájának hasznosítására, magyarul „Bős–Nagymaros" elnevezéssel szerződés született Magyarország és Csehszlovákia között, közös vízerőmű építésére. Mint ismert, az erőmű a szlovák oldalon megépült, a Nagymarosi Erőmű viszont nem épült meg. A WEC-en (World Energy Conference) a szlovákok tájékoztató anyagokat terjesztettek elő az eddigi tapasztalatokról, amely konkrét adatokat közöl az eredményekről.

A Paksi Erőmű meglévő blokkjainak üzemidő-meghosszabbítása és új erőműblokk létesítése eldöntött. A japán katasztrófát elemezni kell, és a tapasztalatokat hasznosítani. A tapasztalatok folyamatos figyelembevételével a szükséges intézkedéseket meg kell tenni. Ez a vélemény a hazai energetikai szakemberek körében egyhangúan támogatott.

A legproblémásabb az energetikának a klímaváltozáshoz való hozzájárulása. Sajnos ez az alapkérdést érinti, azaz a szén-dioxid és a globális felmelegedés közötti kapcsolatot. Az államközi kapcsolatok alapján létrehozott panel (IPCC) jelentéseinek eredményei időnként erős korrekcióra szorultak, és az adatok jelentős részének hitelessége is (dokumentáltan) megkérdőjeleződött.

A szén-dioxid-kibocsátás hatása a klímafelmelegedésre, számításokkal alátámasztva erősen eltúlzott. Csupán egy paraméterhez (nevezetesen a szén-dioxidhoz vagy az üvegházgázokhoz) a gyakorlat szerint alkalmazott szoros kötődés, „horribile dictu" korrelációja tudományosan nem megalapozott. Az erre alapozott politikai, technikai, gazdasági intézkedések, indokolatlanul, túlzott terheket jelentenek a társadalom számára.

Az ország számára a legkorrektebb szakmai és gazdasági szempontból megfelelő energiastratégiát kell kidolgozni. Indokolt esetekben vállalni kell esetleg világtendenciákkal szemben is az állásfoglalást. Nemzetközileg elfogadott álláspontok is számtalanszor ellentétesre változnak. Több egyezmény eleve megvalósíthatatlan célokat tűz ki. Ilyen az egyik legjelentősebb például, a kiotói jegyzőkönyv, amely-

nek mentésére Koppenhágában tettek az államok kísérletet, eredménytelenül. A Cancunban tartott konferencia pedig már a tényleges megegyezés lehetetlenségét vetítette előre, ami Rio de Janeiróban gyakorlatilag bekövetkezett. A tudományos világ már széles körben megkérdőjelezi a szén-dioxidnak tulajdonított szerep mértékét.

Magyarországnak az energiahordozókkal való ellátottságáról éles vita folyik.

9.2. táblázat. Magyarország energiahordozó-vagyona és ellátottsága

	R mtoe	P mtoe/év	R/P év
Olaj	20,8	1,04	20
Gáz	56,7 (63Gm^3)	2,51	22,6
Szén	522,8 (2544,3 mt, 21 987 PJ)	2,8	186,7
Urán	3,09 (tartalék)		
Ország	599,5	6,35	94,4

Hazánkra kiszámítva a mutatókat, a számok csak figyelemfelhívásra alkalmasak, és igazolják azt a közismert tényt, hogy energiahordozókban szegény ország vagyunk. Az átlagértékre adódó 94,4 év mellett is érvényes a megállapítás, mert a legjelentősebb szén például az összes energiaigényből csak 13,1%-ot fedezett. Az olaj- és a gázvagyonunk legfeljebb 2-2 évtizedre elegendő, az energiahordozó-ellátásban a jelenlegi, igen kis mértékű részvétele mellett is.

A 9.3. táblázat a hazai tüzelőanyag-helyzetet mutatja be. Az ország erősen importfüggő. A 2002.évben, ha a három legfontosabb fosszilis (olaj, gáz, szén) energiahordozót nézzük, az általuk biztosított 840,8 PJ energiából 270,8 PJ volt a hazai termelés és 570 PJ az import. Az import tehát 68%-ot tett ki. Ha ehhez hozzászámítjuk a szintén importból származó 141,3 PJ nukleáris fűtőanyagot, az összes energia 982,1 PJ lesz, az import tüzelőanyag 711,3 PJ, ami 72,4%.

Az energiastratégia kidolgozásának alapját az összes energiafelhasználás összetétele és a villamosenergia-fejlesztésben az energiahordozók megoszlása jelenti.

A magyar energiarendszer az EU része, de az energiaforrások jelentős része EU-n kívüli államokból jön. Az EU2 energiaforrás-gazdálkodása a villamosenergia-iparban elsősorban nukleáris energiaforráson nyugszik.

9.3. táblázat. Az EU2 fejlesztett energiamennyisége primer energiaforrások szerinti bontásban

Tétel	M.e.	2008	2009	2010
Fejlesztett villamos energia	GWh	16 962	17 295	17 327
Szén/biomassza	GWh	1408	1101	873
Földgáz és tüzelőolaj/fűtőolaj	GWh	736	722	648

9.3. táblázat folytatása

Tétel	M.e.	2008	2009	2010
Nukleáris	GWh	14 818	15 427	15 761
Szél	GWh	0	45	45
Kiadott villamos energia	GWh	15 815	16 127	16 208
Szén/biomassza	GWh	1 218	934	729
Földgáz és tüzelőolaj/fűtőolaj	GWh	712	700	632
Nukleáris	GWh	13 885	14 447	14 802
Szél	GWh	0	45	45
Fejlesztett hő	TJ	5255	4901	4355
Szén/biomassza	TJ	361	347	386
Földgáz és tüzelőolaj/fűtőolaj	TJ	4340	4045	3467
Nukleáris	TJ	554	509	502
Kiadott hő	TJ	4960	4667	4217
Szén/biomassza	TJ	354	340	374
Földgáz és tüzelőolaj/fűtőolaj	TJ	4052	3818	3341
Nukleáris	TJ	554	509	502

9.4. táblázat. A magyarországi villamosenergia-termelés megoszlása

Megnevezés	1990		2006		2007	
	GWh	%	GWh	%	GWh	%
Energetikai barnaszénből	4607	16,8	1229	3,4	762	1,9
Lignitből	2605	9,5	5460	15,2	6042	15,2
Feketeszén féltermékből	942	3,4	340	0,9	546	1,4
Szénből összesen (1)	8154	29,7	7029	19,6	7350	18,4
Fűtőolajból (2)	914	3,4	534	1,5	589	1,5
Földgázból (3)	4486	16,3	12 978	36,2	15 116	37,9
Szénhidrogénből összesen	5400	19,7	13 512	37,7	15 705	39,4
Fosszilis energiahordozókból	13 554	49,4	20 541	57,3	23 055	57,8
Szélenergiából	–	–	43	0,1	110	0,3
Vízenergiából	178	0,6	186	0,5	210	0,5
Biomasszából	–	–	1215	3,4	1488	3,7
Egyéb megújuló + hulladékból	–	–	413	1,2	340	0,9
Atomenergiából (4)	13 731	50,0	13 461	37,5	14 677	36,8
Mindösszesen*	27 463	100	35 859	100	39 880	100

*országos adat (5) megújuló + hulladék

A világban jelenleg és a jövőben is a fosszilis energiahordozóké lesz a fő szerep az energiaellátásban.

Az iparosítás kezdeti szakaszában a fosszilis energiahordozó felhasználása nem gyakorolt hatást a természet szénforgalmára. A légkörben az ipar által okozott széntartalom-növekedést meghaladta a természetes szén-dioxid-koncentráció növekedése. Ez arra is rámutat, hogy a természet szénforgalmában az ipari többlet a folyamatok (fizikai, kémiai, biológiai) szempontjából nem különálló rész. A globális felmelegedés szempontjából azonban a szén-dioxid-koncentráció növekedésének szerepét a termikus folyamatokra már lehet többletként kezelni. Ez fizikai számítás, amelyben a származás nem játszik jelentős szerepet. Az 1930-as évek környékén megállapítható, hogy az emberi tevékenységből származó CO_2 hatással van a légkör koncentrációjára. Itt sem ismeretes azonban, hogy a többlet szén-dioxid rész az ipari, vagy a természetes szén-dioxidból származik.

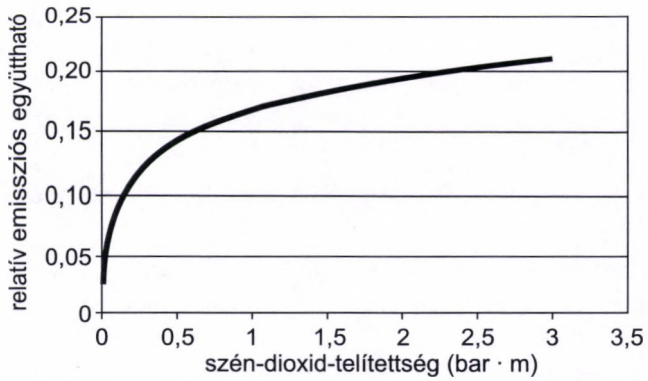
Két alapvető folyamatot nem értékelnek jelentőségének megfelelően.

Az első, hogy a fosszilis tüzelőanyagok széntartalma a légkörben volt, és csak egy kis része kerül vissza az eredeti állapotába. Ezek egy része reverzibilis folyamatokból áll. Nemcsak évmilliók alatt volt jelentős változás a Föld felszínén, hanem néhány ezer év alatt is, ami rövid időintervallumnak mondható. Tízezer évvel ezelőtt a Szahara helyén dús erdőség volt, bár még az emberi beavatkozás az óriási változásnál fel sem merülhet. Ilyen időtávban a Föld felületén jó néhány nagy különbség is található.

A második tény a Föld termikus egyensúlyával, így a globális felmelegedéssel kapcsolatos. Az ún. üvegházhatás (helyesebben inkább csak üveghatás, glasseffect) okozói az üvegházgázok, és elsősorban a fosszilis tüzelőanyagokból felszabadult szén-dioxid. A CO_2-abszorpció és -emisszió tulajdonsága biztosítja, hogy a Nap sugárzásából a hőenergia egy részét a Föld légkörében visszatartja, és a légkörben a rétegek hőmérséklet-eloszlását úgy változtatja meg, hogy például az alsóbb rétegek átlaghőmérsékletének növekedését okozza. A termikus egyensúly fennmaradásához azonban a Föld globális vagy átlagos hőmérsékletének (a légkör és egyebek által kialakult sugárzási hőmérsékletnek) változása csak olyan mértékű lehet, amit a napállandóból számított egyensúlyi hőmérséklet változása indokol. A növekedés mértékére adott értékek különösen hibásak. Közismert, hogy a CO_2 emissziós és abszorpciós tényezője a koncentrációval (Beer-féle törvény $p \cdot x$) igen erősen telítődő görbével rendelkezik (Ónodi 2003).

Külön fel kell figyelni tehát arra, hogy az emissziós együttható erősen egy telítési érték felé halad. Ez azt jelenti, hogy a légkörbe kerülő szén-dioxid növekedésével egyre kisebb mértékben abszorbeál a sugárzásból, a felmelegedés növekedésének sebessége csökken

A légköri CO_2-koncentráció növekedése a hőenergia visszatartó hatására exponenciálisan csökken, azaz egy határig már inkább csak a mennyiséggel arányos. A nagy felmelegedést prognosztizáló kutatások eredményei bizonyosan nem helytállóak.



9.12. ábra. A szén-dioxid emissziós együtthatójának változása a telítettség függvényében

Nem lehet korrelációról beszélni a légkör szén-dioxid-tartalma és a globális hőmérséklet között. Hosszabb időszakokra is lehet példát találni ennek ellenkezőjére. Ilyen például az 1940 és 1970 évek közötti időszak (lásd a 7.2. ábrán, a karbonkibocsátás növekedése mellett található globális hőmérséklet-csökkenéses időszakasz).

Ugyancsak problémás egyértelműen magyarázni a XV–XVIII. század folyamán, az ipari forradalom előtti globális és a Kelet-Európában tapasztalt lehűlést, amely kb. 1,5 °C tartományban mozgott.

A kiotói jegyzőkönyv, a szén-dioxid és az egyéb ÜHG-k szén-dioxid egyenértékre számolt mennyiségének korlátozását tűzte ki célul. A több mint tízéves tapasztalat után megállapítható az egyezmény teljes csődje. Az EU-teljesítést is csak az új 12 tagállam csatlakozásával lehetett menteni, de ezt is csak az ezekben összeomlott nagyipar segítette. A fejlett EU-15 nem teljesítette vállalását, a vállalt 8%-os csökkentés helyett mindössze 2%-ot, azaz kettő százalékot teljesített.

A CO_2 kitüntetett szerepét a fizika-kémia törvényeivel való elég jó számíthatóságának köszönheti, mert az egyéb tényezők hatásának számítása és mérése még inkább bizonytalan.

A Napból érkező sugárzás a légkörön áthaladva az összetevő gázok egy részének abszorpcióképessége miatt gyengül, és a sugárzásnak csak egy része éri el a földfelületet. A Föld termikus egyensúlyban van, tehát az átlaghőmérséklete (a naptevékenységet figyelembe véve) állandó (természetesen nem statikus állandóságot kell érteni). A Föld az abszorbeált energiát a Kirchoff-törvénynek megfelelően teljes egészében emittálja (eltekintve a biológiai és a vegyi folyamatoktól). A világűrbe történő visszasugárzás visszaverődésből és a légkör spektrális sugárzásából tevődik össze.

A földi sugárzás egy részét a légkör abszorbeálja. A légkörbe abszorbeált földi sugárzást a napsugárzás folyamatosan pótolja, ez az oda-vissza sugárzás a légkört magát felmelegíti, és a légkör határán a közel állandó napállandóból adódó egyensúlyi hőmérséklet és a visszasugárzás hőmérséklete is meg kell egyezzen, illetve

állandó marad. A CO_2-változással a sugárzási energia Föld és légkör közötti megoszlási aránya változik, míg az átlaghőmérséklet állandó (a globális hőmérsékletet megtévesztően használják, mert az fogalmilag helyesen az átlaghőmérséklettel megegyezne. A gyakorlatban a globális hőmérsékletnek a földfelszín-közeli légrétegének hőmérsékletét értik).

A rendszerben elsődlegesen abszorbeált és a földfelület-sugárzásból abszorbeált részek aránya változik.

A CO_2-koncentráció növekedésének a légkörön áthaladó sugárzás gyengítésére való hatását ismerve, a napsugárzásnak a Föld felszínére jutó része, a légkör által a beeső sugárzásból abszorbeált rész, a visszavert sugárzásból abszorbeált rész számítható. A beeső sugárzásból 30% (közelítés) közvetlenül visszaverődik a világűrbe, azaz $0{,}3 \cdot 346 = 104 W/m^2$. A légkörben $346 - 104 = 342\ W/m^2$ sugárzás szétosztására kerül sor.

9.5. táblázat. A szén-dioxid hatása a globális hőmérséklet-változásra

CO_2	pl	ε	εpl	$e^{\varepsilon pl}$	$\frac{1}{e^{\varepsilon pl}}$	$1-\frac{1}{e^{\varepsilon pl}}$
280	2,17	0,198	0,4297	1,537	0,65	0,35
350	2, 7	0,205	0,554	1,739	0,575	0,425
450	3,5	0,215	0,752	2,122	0,471	0,529
500	3,9	0,225	0,878	2,4	0,416	0,584
600	4,64	0,23	1,06	2,91	0,344	0,656
800	6,1	0,23	1,43	4,2	0,24	0,66

CO_2	$\frac{1}{e^{\varepsilon pl}}$ és $\left(1-\frac{1}{e^{\varepsilon pl}}\right)$		$\frac{1}{e^{\varepsilon pl}} \cdot 242$	$242 \cdot \left(1-\frac{1}{e^{\varepsilon pl}}\right)$	Vissza-sugárzás	Rendszer	ΔT_{CO2}
légkör	átsugárzás		felsz. elér	rendszerben	abszorbancia	összes	rész
ppm			W/m^2	W/m^2	W/m^2	W/m^2	K
280	0,65	0,35	157,3	84,7	55,1	139,8	6,1
350	0,575	0,425	139,2	102,8	59,2	162,0	7,0
450	0,471	0,529	114,0	128,0	60,3	188,3	8,1
500	0,416	0,584	100,7	131,3	58,8	190,1	8,2
600	0,344	0,656	83,3	158,7	54,6	213,3	9,2
800	0,24	0,76	58,1	183,9	44,2	228,1	9,8

A napállandó: $S = 1385\ W/m^2$ $S_á = 346{,}2\ W/m^2$,
Visszaverődés: $R = 0{,}3\ 346{,}2 = 104\ W/m^2$
A sugárzásban részt vesz: $242\ W/m^2$

A vizsgálat menete: Feltételezzük, hogy a rendszerben abszorbeált hőenergia melegíti a légkör rendszerét. A légkörbe belépő sugárzás az üvegházgázok mennyiségétől függően egyrészt abszorbeálódik, másrészt eljut a földfelülethez, abszorbeálódik és szintén visszasugárzódik. A visszasugárzás során a hősugárzásnak a légkörön át kell haladnia, és egy része abszorbeálódik, más része eljut a légkör határáig és kilép a világűrbe. A légkörrendszert tehát a belépő sugárzásból és a visszasugárzásból abszorbeált energiák összege fogja melegíteni. Elfogadva, hogy a 350 ppm-hez tartozó szén-dioxid a teljes felmelegedésből maximum 7 °C-kal részesül (bár erre eltérő értékeket lehet találni), a más szén-dioxid-koncentrációhoz tartozó felmelegedések a rendszerben maradó energiaváltozás arányában változnak.

A növekedés mértékét a rendszerben maradó sugárzási rész növekedése okozza. Például a CO_2-koncentrációnak 350 ppm-ről 500 ppm-re való növekedése esetén: az 500 ppm-re való növekedés a légkörön belül a jelenlegi hőmérséklet-különbséget 1,17 °C-kal növeli.

A CO_2 miatti felmelegedés határértékét az jelentené, ha a teljes oxigénmennyiséget a fosszilis energiahordozók elégetésével CO_2-vé tüzelnénk el. A 9.6. táblázat mutatja a hőmérséklet-emelkedést.

9.6. táblázat. A légkör hőmérsékletének növekedése 21% CO_2 tartalom esetén

CO_2	CO_2	pl	a_g	ε_g	T_F
%	tömeg%	mbar	Beer koeff.		K
21	31,9	1632	~1	0,176	293

A maximális felmelegedés az egyébként változatlan légköri viszonyok mellett tehát ~5 °C lenne. Amíg a CO_2-koncentráció például lineárisan nő, exponenciálisan változik a sugárzásgyengítés, a hőmérséklet-változás pedig egy határértékhez tart.

A modellek eredményei közötti nagy eltérés alapján arra a következtetésre lehet jutni, hogy a bonyolult modellekben a sok közelítés az összekapcsolásukat nem teszi lehetővé. A tanulmányunk végkövetkeztetéseként reális értékeket elfogadva, érdemesebb a nagy energiákat a változásokra való felkészülésre fordítani, nem belehajszolni a világot egy finoman szólva is kilátástalan és óriási költségeket felemésztő küzdelembe. A vitathatatlan, de egyszerűbb globális számításokkal kapott globális hőmérséklet-emelkedés értéke 1–1,5 °C, nem elhanyagolható, de nem ad megoldhatatlan feladatot az emberiség számára. Új elveken alapuló energiafejlesztési módok segíthetnének. Ki kell mondani, a megújulók (helyesen közvetlen természeti energiák – direct natural energies) segítenek, de megoldani a jelentős költségtöbblet árán sem tudják a problémát.

CO_2-nek a klímaváltozásra való hatásával kapcsolatosan az utóbbi időben már egyre inkább úgy változik a klimatológusok véleménye, hogy a CO_2 miatti felmelegedés csak néhány tized fok lesz, annyi, amennyivel a légkör energiamegkötő

képessége növekszik (mint korábban már leírtam és könyvemben is említettem). Ez az energianövekedés elegendő lehet arra, hogy a kis légköri katasztrófák számának csökkenése mellett a nagyok száma növekedjék (Rádió 1, Mika János 2012 01. 03, 14h). A légkörről részletes, régiónkénti energetikai számítások még nem ismeretesek, amelyek alátámasztanák ezt az elméletet. A következményét már korábban, magam is kikövetkeztettem. Azonban az átlagos, néhány tizedfokos átlagos hőmérséklet-emelkedésnél, a rövid idejű ciklikus hőmérséklet-emelkedések lényegesen nagyobb mértékűek (több fok is lehet). Így a légköri katasztrófáknak, például ezen hőmérséklet-változások okozta energiaváltozásokban kell az óriásciklonok okát és gyakoriságuk növekedését keresni. A hőmérsékletváltozások és az energetikai viszonyok kapcsolatának kutatása lehet elsőrendű feladat. A különböző paraméterekben késleltetések, fáziseltolódások megismerése közelebb visz a jelenségek megmagyarázásához.

10. Pusztító tüzek

A természeti csapásokból, emberi mulasztásokból, illetve csupán a véletlenek kedvezőtlen alakulása folytán a tűz óriási károkat is okozhat az emberi társadalomnak. Ezen katasztrófák között találhatók városok vagy városrészek leégése, erdő- és bozóttüzek, a tüzelőanyagok kinyerésével, szállításával kapcsolatos tüzek stb.

A nagy történelmi várostüzekről részben tényadatok alapján, de a korábbiakról nagyrészt legendák alapján vannak ismereteink. A legismertebbek: Londonban a nagy tűzvész 1666-ban, Chicagóban 1871-ben, San Franciscóban 1906-ban és Rómában Kr. u. 64-ben. A tüzek keletkezésének okai nagyon különbözőek, például emberi figyelmetlenség, földrengés vagy Róma esetében a legendák szerint (vitatott) Néró őrületében gyújtotta fel a várost.

A modern kor egyik jellegzetes veszélyforrása a nagy tömegben, óriási energiamennyiséget jelentő *tüzelőanyag-szállítások és -tárolások*. Ilyenek például a folyékony földgázt kezelő terminálok, amelyek városok közelében helyezkednek el, illetve a szállítóhajók. A folyékony földgáz a meghibásodott berendezésből a szabadba kerül és elpárolog, nagy területen szétterjed, majd az égéshez szükséges megfelelő oxigénkoncentrációt elérve meggyullad, esetleg felrobban. Óriási katasztrófák ismeretesek. Ilyen volt 1944-ben, az LNG kezdeti időszakában Clevelandban történt hatalmas baleset. A gáz a városi csatornákban szétterjedve lángtengerré változtatta a várost.

Sajnos a történelemben, a világ minden régiójában nagyon gyakran fordul elő, hogy hatalmas *erdő- vagy bozótterületek égnek*. A tűz oka legtöbbször a nagy szárazságban lángra lobbanó növényzet, de nem ritka a szándékos gyújtogatás sem. Ritkán, de természetes gyújtóforrás lehet egy vízcsepp is, amely a napsugarakat összegyűjtve gyújtólencseként viselkedik. Ezek a tüzek a természet élővilágában nagy károkat okoznak, és emellett a lakosság egészségét és életét is veszélyeztetik.

A legnagyobbak között kiemelhető a Szumátra és Kalimanta (Borneó része) területén, 1997-ben égő, közel egymillió hektár erdő. 2012-ben Colorado Springsben volt nehezen megfékezhető erdőtűz.

A szénbányászat kezdete után megjelentek az igen tragikus *bányatüzek* is. A mélybányászatban a szén fajtájától függően, a szén mellett több-kevesebb mennyiségben előfordulnak szénhidrogének, elsősorban metán és egyéb éghető anyagok is. Különleges tüzet okozhat a szénfejtéskor keletkező nagyon finom por is. Az éghető por-levegő keverék (Dust) akkor jön létre, amikor megfelelő feltételek között finom porszemcsék a levegőben szuszpendálódnak. Ez éghető vagy robbanóképes lehet, és katasztrofális tüzet és robbanást okozhat.

A szénpor-levegő keverék csak megfelelő körülmények között robbanásképes. A finom por nagy felülettel nagyon alkalmas spontán égésre. A legnagyobb bányabalesetek között sok a *porrobbanás.* Ilyen katasztrófa volt Dél-Walesben, Senghenyddben 1913-ban, 1906-ban az észak-franciaországi Courrières-ben, Németországban a luisenthali *bányakatasztrófa* 1962-ben. A legborzalmasabb katasztrófa Kínában történt 1942-ben, a benxihui robbanás 1549 áldozatot követelt. A bányarobbanást sok esetben bányalég (metán-levegő keverék) indítja, és a lökéshullám hozza létre a robbanásveszélyes koncentrációt. A megelőzésre jelzőként „bányászlámpát" és fokozott szellőztetést alkalmaznak.

A tárnákban meggyulladt szénréteg esetleg hosszú ideig éghet, a környezetet 700–800 °C-ra felhevítve. A világon a legveszélyesebb bányatüzek többsége Kínában fordult elő. Az emberi áldozatok mellett jelentősek az anyagi veszteségek is. Kínában az így elégett szénmennyiséget konkrét adatok hiányában évi 20–200 millió tonnára becsülik.

Vannak gyakorlatilag elolthatatlan bányatüzek is. Példa erre a pennsylvaniai Centralia melletti bánya, amely 1962 óta ég, és egyes feltételezések szerint akár még 250 évig is éghet.

A szénbányászat mellett az olaj- és gázipar tűzesetei a gyakori és nagyon súlyos katasztrófák közé tartoznak. A szárazföldi és tengeri, fúró- és szállítóeszközök kis meghibásodásai is tragikus baleseteket okozhatnak. 2010-ben például a British Petrol Deepwater Horizon fúrótornya robbant fel. A tengeri katasztrófák sajnos nagyon gyakoriak.

A tüzet a bölcs ember hozzá méltatlan dolgokra is felhasználta. A mások feletti hatalom gyakorlásának is eszköze lett, eszköz a halálos ítéletek végrehajtására. Talán a ma már nem alkalmazottak közül a legismertebb kivégzési mód volt a *máglyahalál*, amely azonban még középkori mércével mérve is kirívóan szadista büntetésnek számított. Általában akkor alkalmazták, ha az elkövetett cselekmény a korabeli vallási-erkölcsi normákat (is) sértette. Nemcsak közönséges bűnözőket, hanem sok elmebeteget is mint boszorkányt, máglyán égettek el. Ugyanígy végezték az egyház ellenfelei, az eretneknek bélyegzett személyek, köztük sok híres gondolkodó is. A történelem legismertebb, máglyahalált halt személyei közül csak

néhányat említünk: Husz János (1415), Jeanne d'Arc, az orleans-i szűz (1431), Girolamo Savonarola (1498), Giordano Bruno (1600), Szervét Mihály (1553). Könyvtárnyi forrás tanúskodik a középkori magyarországi boszorkányperekről, melyeknek gyakori kimenetele volt a boszorkányégetés, s megdöbbentő, hogy az utolsó ilyen cselekmény 1756-ban történt.

Irodalom

2007 Survey of Energy Resources, 2008. World Energy Council, London. http://www.worldenergy.org/documents/ser2007_final_online_version_1.pdf. Letöltés: 2012.12.12.

Alföldi Zoltán: Az atmoszféra. Humánökológia. Debreceni Egyetem ATC, HEFOP 3.3.1., Ciklusok. www.agr.unideb.hu/ktvbsc/dl2.php?dl=90/3_eloadas.ppt. Letöltés: 2012.12.12.

Anual European Community greenhouse gas inventory 1990–2005 and inventory report 2007, Submission to the UNFCC Secretariat, European Environment Agency, Version 27 May 2007. http://www.eea.europa.eu/publications/technical_report_2007_7. Letöltés: 2012.12.12.

Arrhenius, Svante: On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground. *Philosophical Magazine,* 41(1896), 237–276. (The paper presented to the Royal Swedish Academy of Sciences, 11th December, 1895.)

Australian Mines Atlas.mht http://www.australianminesatlas.gov.au/

Balogh Lászlóné–Pláveczky György–Reményi Károly: A fluidizációs tüzelési technológia részfolyamatainak vizsgálata a hazai szénerőművekben. Kutatási jelentés. VEIKI, Budapest, 1997. július.

Balogh Lászlóné–Pláveczky György–Reményi Károly: A hazai barnaszenek égési idejének és égési sebességének vizsgálata fluidizációs körülmények mellett. VEIKI-jelentés, 1997. július, Budapest

Balogh Lászlóné–Pláveczky György–Reményi Károly: A széntüzelőanyag és az alkalmazott adalékok előkészítési és adagolási jellemzőinek vizsgálata a károsanyag-kibocsátás nagyságára. MVM, Budapest ,1996.

Balogh Lászlóné–Reményi Károly: A fluidizációs tüzelés és a magyar HibridFluid tüzelés továbbfejlesztése. Budapest, OMFB, 1996–1998.

Bassa Gábor: A porszénégés elméletének gyakorlati alkalmazása. MTA-tanulmány, Budapest 1962.

Beck, E.-G.: 180 Years of atmospheric CO_2 Gas Analysis by Chemical Methods. *Energy & Environment,* 18(2007)/ 2, 259–282.

Beck, E.-G.: 50 Jahre kontinuierliche CO_2-Messung auf Mauna Loa. *Energy & Environment,* 19(2008), 7.

Beeston, G.–Essenhigh, R. H.: Kinetics of Coal Combustion: The Influence of Oxygen Concentration on the Burning-Out Times of Single Particles. University of Sheffield, England, Fifth International Conference on CFD in the Process Industries CSIRO, Melbourne, Australia, 13–15 December 2006. http://web.anl.gov/PCS/acsfuel/preprint%20archive/Files/06_2_ATLANTIC%20CITY_09-62_0225.pdf. Letöltés: 2012.12.12.

Bérczi P.-né et al.: Környezetkímélő széntüzelés az Ajkai Hőerőműben, VEIKI Közlemények, Budapest, 1992.

Bérczi Szaniszló–Koppány György: Lakható marad-e a Föld? *Légkör,* 53(2008), 3.
Berecz Endre: *Fizikai kémia.* Tankönyvkiadó, Budapest, 1991.
Berényi Dénes: Klímaváltozás, globális felmelegedés, CO_2-hatás – kritikus szemmel. *Magyar Tudomány,* 2011/1, 18–31.
Bora Gyula–Korompai Attila (szerk.): *A természeti erőforrások gazdaságtana és földrajza.* Aula Kiadó, Budapest, 2001.
Brown, R. C.–Miake-Lye, A. R.– Lukachko, S. P.– Waitz, I. A.: Heterogeneous reactions in aircraft gas turbine engines. *Geophysical Researchletters,* 29(2002). http://web.mit.edu/aeroastro/people/waitz/publications/HetChemGRL.pdf. Letöltés: 2012.12.12.
Büki Gergely: *Fosszilis erőművek.* Magyar Atomfórum Egyesület, Budapest, 2005.
Callendar, G. S.: On the Amount of Carbon Dioxid in the Athmosphere. *Tellus,* 10(1958), 243–248.
Carbon Dioxide Emissions From Power Plants Rated Worldwide. *ScienceDaily.* Retrieved April 8, 2011, from http://www.sciencedaily.com /releases/2007/11/071114163448.htm
Combustion Fundamentals: http://authors.library.caltech.edu/25069/4/AirPollution88-Ch2.pdf. Letöltés: 2012.12.12.
Császár Géza–Haas János–Nádor Annamária: A klíma- és környezetváltozások földtudományi összefüggései. *Magyar Tudomány,* 2008/6, 663–687.
Dryer, F. L.: *Spherically Symmetric Theory.* Princeton University, Princeton, 1997.
Faragó Tibor: Csak a nemzetközi klímapolitikai tárgyalások folytatása látszik biztosnak. http://klimabarat.hu/node/433. Letöltés: 2012.12.12.
Faragó Tibor: Nemzetközi klímapolitikai együttműködés: eredményes volt-e és folytatható-e az eddigi módon? MTA Környezettudományi ülnöki Bizottság két albizottságának együttes ülése, 2012. február 23. http://www.vahavahalozat.hu/system/files/FaragoTibor+Nemzetk%C3%B6zi+Kl%C3%ADmapolitikai+egy%C3%BCttm%C5%B1k%C3%B6d%C3%A9s.pdf. Letöltés: 2012.12.12.
Filho, C. G. da Silva–Milioli, F. E.: A thermogravimetric analysis of the combustion of a Brazilian mineral coal. *Química Nova,* 31/1, São Paulo, 2008. http://dx.doi.org/10.1590/S0100-40422008000100021
Fleming, J. R.: *Historical Perspectives on Climate Change.* Oxford University Press, New York, 1998.
Furuhata, T.–Tanno, S.–Miura, T.: *Prediction of NO concentration in liquid-fueled gasturbine combustor. Transport phenomena in combustion.* 2. Taylor & Francis, Washington DC, 1996.
Gerber, S.–Oevermann, M.: An Euler-Lagrange/DEM-Approach to wood gasification in fluidized beds. *Proceedings of the European Combustion Meeting,* 2009.
Gray V. R.: Temperature Trends in the Lower Atmosphere. *Energy & Environment,* 17(2006)/5, 707–714.
Green energy: http://www.green-energy-2011.info
Gu Hongyu–Peng He– Shuxia Mei–Junlin Xie–Lixin Song: Simulation on Different Proportions of Coal and Natural Gas Co-combustion in a Rotary Lime Kiln. *International Journal of Intelligent Systems and Applications,* 3(2011)/4, 17–24.
Gyulai Iván: *A biomassza-dilemma.* Magyar Természetvédők Szövetsége, Budapest, 2006.
Hámorné Vidó Mária: A kőszénvagyon újraértékelésének és hasznosításának irányai. Előadás. http://www.youtube.com/watch?v=4N4tLvu_gAo. Letöltés: 2012.01.17
Hartai Éva: *Teleptani alapismeretek.* Oktatási segédlet. Miskolci Egyetem, 2004. http://fold1.ftt.uni-miskolc.hu/~foldshe/telep00.htm. Letöltés: 2012.12.12.
Hillier, W.: *Something in the Air we Breath.* Research School of Biological Sciences, Australian National University Canberra ACT 0200 Australia, 2011.
Intergovernmental Panel of Climate Change, Powered by the Scientific Computing Division, NCAR, 05- Sept- 2007 (IPCC WG-I, 2007, 237.)
Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Fourth Assessment Report, 2007. http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_ipcc_fourth_assessment_report_synthesis_report.htm. Letöltés: 2012.12.12.

ISIS Report 19/08/09: O2 Dropping Faster than CO2 Rising. http://www.i-sis.org.uk/O2DroppingFasterThanCO2Rising.php. Letöltés:2012.12.12.
Joos, F.–Harder, S.: *PDF-Modellierung turbulenter, reagierender Strömungen.* Helmut-Schmidt Universität, Universität der Bundeswehr Hamburg, Universität Stuttgart, 2001.
Juhász Árpád: *Évmilliók emlékei.* Gondolat Kiadó, Budapest, 1987.
Juhász Sándor: A Vértesi Erőmű ZRt. biomassza tüzelési programja. MTA. Budapest, 2007. május 08. http://www.reak.bme.hu/MTAEB/files/konferencia_20070508/1_2_Juhasz_Sandor_MTAEB_20070508.pdf. Letöltés: 2012.12.12.
Kämpfer, N.: *Athmosphärenphysik.* Universität, Bern, Frühlingssemester, 2011.
Keeling, R.: *Atmospheric O_2 concentration, reported as the O_2/N_2 ratio.* University of California at San Diego Institution of Oceanography (SIO), US, 2006.
Kim, S.-T.–O'Neil J. R.: Equilibrium and non-equilibrium oxygen isotope effects in synthetic carbonates. *Geochimica et Cosmochimica Acta,* 61(1997), 3461–3475.
Kiss Ádám–Horváth Ákos: Az energiatermelés környezetfizikai vonatkozásai. *Környezeti fizika.* Főiskolai jegyzet. Szerk.: Ligetvári Ferenc, Szarvas, 2001.
Kopp, C. Otto: Brown Coal Primary Contributor. http://www.britannica.com/EBchecked/topic/81675/brown-coal. Letöltés 2012.12.12.
Kovács László: A Bakonyi Erőmű ZRt. biomassza programja. MTA, Budapest 2007. május 8. http://www.reak.bme.hu/MTAEB/files/konferencia_20070508/1_1_Kovacs_Laszlo_MTAEB_20070508.pdf. Letöltés: 2012.12.12.
Kuijk, H. A. J. A. van: *Grate Furnace Combustion: A Model for the Solid Fuel Layer.* University of Technology, Eindhoven, 2008.
Kutschera, W.: AMS and Climate Change. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research,* B268 (2010), 693–700.
Law, Chung K.: *Combustion Physics.* Cambridge University Press, 2006.
Leggett, J.: *A fele elfogyott. Olaj, gáz, forró levegő és a globális energiaválság.* Typotex, Budapest, 2008.
Liu, James A.: Kinetics, catalysis and mechanism of methane steam reforming, Worcester Polytechnic Institute, January 3, 2006.
Ma, Liqiang: *Combustion and Gasification of Chars in Oxygen and Carbon Dioxide at Elevated Pressure.* Stanford University, August 2006.
MacKay, David J. C: Fossil Fuels: Their Advantages and Disadvantages. http://alternativeenergysecret.com/index.html
Magony András: Primer energiahordozók helyzete és ellátásbiztonsága Magyarországon. Előadás. 2008. december 17.
Magyarország ásványi nyersanyagvagyona, 2006. Magyar Geológiai Szolgálat, Budapest. http://users.atw.hu/bdszarhiv/files/vagyon.pdf
Majoros József: *Római élet.* 15. kiadás, Tankönyvkiadó, Budapest, 1974.
Maldonado, D.–Zulli, P.– Shen, Y. S.–Guo, B. Y. and Yu, A. B.: Application of a Coal Combustion Model in the Design of Blast Parameters for an Ironmaking Blast Furnace. Fifth International Conference on CFD in the Process Industries CSIRO, Melbourne, Australia 13–15 December 2006.
Mann, M. E.: Proxy-based reconstructions of hemispheric and global surface temperature variations over the past two millennia. *Proc. Nat. Acad. Sci. USA.* 2009, 106(6)E10.
Marosvölgyi B.: Biomassza-hasznosítás I (2001). és II (2002). Előadásanyag. NYME Energetikai Tanszék, Sopron, 2002.
McElroy: *The Atmospheric Environment: Effects of Human Activity.* Princeton University Press – Princeton and Oxford, 2002.
Mészáros Ernő: Különleges egyensúly a levegőben. Előadás. MTA, Miskolci Akadémiai Bizottság, 2010. június 2.

Mészáros Róbert: Meteorológiai mérések és megfigyelések. sas.elte.hu/szb/m_m/met_meresek_eloadas-2011.pdf

Micsinai Daniella: Szénhidrogének képződése, vándorlása és csapzódása. 2011. http://kornyezet.elte.hu/cimlap/hu/kornytan/Zarovizsga/Vedes_prez/110701/MicsinaiDaniella.pdf. Letöltés: 2012.12.12.

Montford, A. W.: *The Hockey Stick Illusion: Climategate and the Corruption of Science.* Stacey International, London, 2010.

Mozsolics Amália: Hephaistos sántasága. *Ponticulus Hungaricus,* 5(3), 2001.

Naruse, I.–Ohtake, K.: *N_2O formation/destruction caracterictics and its mechanism in coal combustion, Transport phenomena in combustion.* 2. Taylor & Francis, Washington DC, 1996.

Neftel, A.–Moor, E.– Oeschger, H.– Stauffer, B.: Evidence from polar ice cores for the increase in atmospheric CO_2 in the past two centuries. *Nature,* 315(1985), 45–47.

Nyerges Dávid: Az energiakínálat és -kereslet alakulása 2050-ig. *Műszaki információ. Energiaellátás, energiatakarékosság világszerte,* 2003/11, 3–11.

Ónodi Tibor: Kételyek az üvegházhatás mértékében. *Bányászati és Kohászati Lapok. Kőolaj és Földgáz,* 36(2003)/10, 119–128.

Pápay József: Kőolaj és földgáz várható szerepe Földünk energiaellátásában. *Energiagazdálkodás* 52(2011), 6–8.

Peters, N.: *Turbulent Combustion.* Cambridge, University Press, 2000.

Pláveczky György–Vörös Ferenc: Biomassza, fa, energiafű, nád – összehasonlító gyulladási és égési vizsgálatai. VEIKI, Budapest. http://www.veiki.hu/dl/Biomassza_magyar_jav.pdf Letöltés: 2012.12.12.

Power generation accounts for about one-quarter of total emissions of carbon dioxide, the main culpri in global warming, *ScienceDaily* (May 24, 2007).

Raymo, M. E.–Ruddimann, W. F.: Tectonic Forcing of Late Cenozoic Climate. *Nature*, 359(1992), 117–122.

Reményi Károly: A konszenzus és az evidencia nem tudományos kategória (A fosszilis tüzelőanyagok és a globális felmelegedés), *Magyar Tudomány,* 2010/1, 44–98.

Reményi Károly: A tudomány az etika határán az energetikai környezetszennyezés bemutatásakor (néhány „média tudós" figyelmébe), *Magyar Tudomány,* 2011/8. 1006–1010.

Reményi Károly: Állásfoglalás. A szén-dioxid szerepe a klímaváltozásban, *Magyar Tudomány,* 2011/3, 354.

Reményi Károly: Koppenhága után. *Energiagazdálkodás,* 51(2010)/2, 15–17.

Reményi Károly: Szénkeverékek égésének vizsgálata derivatográffal I. és II. *Ipari energiagazdálkodás,* 10(1969)/1, 22–25.

Reményi Károly–Vörös Ferenc: A tűztéri por-cirkuláció növelési lehetőségének vizsgálata az Oroszlányi Erőmű OB 230 kazán modelljén, HibridFluid rendszerben, VEIKI-jelentés, 1997 augusztus, Budapest.

Reményi, K.–Kertész, V.–Vörös, L.–Horváth, F.: Dynamical behaviour of coal char particle combustion. *Combustion and Flame*, 76(1989), 311–323.

Report by the U. S. Climate Change Science Program press release 10 July 2007 from the Department of Energy.

Sahajwalla, V.–Eghlimi, A.–Farrell, K.: Numerical Simulation of Pulverised Coal Combustion, University of New Souths Wales, Sydney, Australia, International Conference CDF in Mineral and Metal Processing and Power Generation, CSIRO 1997. https://www.etde.org/etdeweb/details_open.jsp?osti_id=300871. Letöltés: 2012.12.12.

Sanders, J. P. H.–Gökalp, I.: *Flamlet based prediction and scaling laws NO-formation in turbulent hydrogen diffusion flames. Transport phenomena in combustion*, 1., Taylor & Francis, Washington DC, 1996.

Sawin, J. L.: Fossil Fuel Use Up. http://www.worldwatch.org/brain/media/pdf/pubs/vs/2003_fossil_fuel.pdf

Scherer, S.: *Photosynthese. Bedeutung und Entstehung – ein kritischer Überblick.* Wort und Wissen-Fachberichte, Bd. 1, Hänssler Verlag, Neuhausen–Stuttgart, 1983.

Schmidt, G.: Taking the Measure of the Greenhouse Effect. Science Briefs, October 2010. http://www.giss.nasa.gov/research/briefs/schmidt_05/. Letöltés: 2012.12.12.

Schoeninger, M. J.– Kohn, M. J.–Valley, J. W.: Tooth oxygen isotope ratios as paleoclimate monitors in arid ecosystems. In S. H. Ambrose–M. A. Katzenberg (eds): *Biogeochemical Approches to Paleodietary Analysis. Advances in Archeological and Museum Science 5.* New York, 2000, 117–140.

Schurath, U.–Naumann, K.-H.: Heterogeneous processes involving atmospheric particulate matter. *Pure & Applied Chemistry,* 70(1998)/7, 1353–1361. http://stage.iupac.org/publications/pac/1998/pdf/7007x1353.pdf. Letöltés: 2012.12.12.

Scotese, Ch. R.: Paleomap Project, by Monte Hieb. Last updated: March 21, 2009, http://www.geocraft.com/WVFossils/Carboniferous_climate.html

Segalstad, T. V.: The distribution of CO_2 between atmosphere, hydrosphere, and lithosphere; minimal influence from anthropogenic CO_2 on global „Greenhouse Effect". In Emsley, J. (ed.): *The Global Warming Debate. The Report of the European Science and Environment Forum.* Bourne Press Ltd., Bournemouth, Dorset, UK, 1996, 41–50.

Semenov, N. N.: Some problems relating to chain reactions and to the theory of combustion. Nobel Lecture, December 11, 1956. http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/1956/semenov-lecture.pdf. Letöltés: 2012.12.12.

Shigeyuki Ishidoya–Shuji Aoki–Takakiyo Nakazawa: A High Precision Measurements of the Atmospheric O_2/N_2 Ratio on a Mass Spectrometer. *Journal of the Meteorological Society of Japan,* 81(2003)/1, 127–140.

Spero, H. et al. (1997): Seawater carbonate chemistry and carbon and oxygen isotopes during experiments with planktonic foraminifera Orbulina universa and Globigerina bulloides, 1997. doi:10.1594/PANGAEA.721923.

Staley, D. O.–Jurica, G. M.: Effective atmospheric emissivity under clear skies. *Journal of Applied Meteorology,* 11(1972), 349–356

Steinfeld, J. I.–Francisco, J. S.– Hase, W. L.: *What factors influence the rate of a chemical reaction?* 10 November 2006, Kingsbury High Scool, Second Edition: Prentice Hall Upper Saddle River, New Jersey.

Stephan, E.: Stabile Isotope in fossilen Faunenfunden: Erforschung von Klima, Umwelt und Ernährung prähistorischer Tiere. In Hauptmann, A.–Pingel, V. (Hrsg.): *Archäometrie. Methoden und Anwendungsbeispiele naturwissenschaftlicher Verfahren in der Archäologie.* E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 2008, 46–66.

Stoellinger, M.–Roekaerts, D.–Naud, B.–Heinz, S.–Beishuizen, N.: Application of the transported PDF method in pulverized coal combustion. Proceedings of the European Combustion Meeting 2011. http://data.cas.manchester.ac.uk/database3/SAMPLE%20III/Dropbox%20stuff/ECM/ECM%202011%20Papers/284.pdf. Letöltés: 2012.12.12.

Stróbl Alajos: Megújuló energia a villamos-energiaellátásban. 2008. 05. 14-én, Budapesten, az Energiagazdálkodási Tudományos Egyesületben tartott előadás.

Survey of Energy Resources, World Energy Council, London, 2007.

Szabó György: *Mediterrán mítoszok és mondák. Mitológiai kislexikon.* Kriterion Könyvkiadó, Bukarest, 1973.

Szabolcs G.–Vörös L.: Széntüzelésű erőművek által okozott kén-dioxid-emisszió és a kén-lekötés vizsgálatáról , VEIKI-jelentés, Budapest, 1977.

Szarka László: Mozaikok az éghajlatkutatáshoz. *Magyar Tudomány,* 2010/5, 609–611.

Tajthy Tihamér: Az energiafelhasználáshoz kapcsolódó légköri környezetszennyezés, 2002. július, http://www.vet.bme.hu/okt/korny/nt/mernal/tananyag/Energiakornyezet.pdf. Letöltés: 2012.12.12.

Tarczay Klára–Lengyel Andrea: A hidegfrontok kapcsolata a légszennyezéssel, ELTE–TTK Kármán Környezeti Áramlások Laboratórium, TDK 2002. http://karman3.elte.hu/doc/tdk3.pdf. Letöltés 2012.12.12.

Tigges, K. D.: Babcock-Hitachi K. K. Europe Branch: Design of coal fired steam generators for low emissions of CO_2, SO_2, and NO_x. Existing power plants and new installations, WEC Regional Energy Forum – FOREN 2004, Neptun, 13–17 June, 2004.

Timkóné Józsa Judit: *Különböző szénfajták égésének vizsgálata holográfiás módszerekkel.* MTA MKKI, Budapest, 1984.

Turányi Tamás: Családi ház gázfogyasztása. http://garfield.chem.elte.hu/Turanyi/energia.html. Letöltés: 2012.12. 12.

Váczi Vincent: Eredményhirdetés Durban után – a Föld nem tapsol. http://energiaklub.hu/en/blog/eredmenyhirdetes-durban-utan-%E2%80%93-a-fold-nem-tapsol. Letöltés: 2011.12.11.

Váczi Vincent: Helyzetértékelés a durbani klímacsúcs első hete után. http://energiaklub.hu/blogcimke/klimacsucs. Letöltés: 2011.12.06

Vajda György: Energiaigények. *Magyar Tudomány,* 1999/9, 1091–1112.

Vajda György: *Energiaellátás ma és holnap.* MTA Társadalomkutató Központ, Budapest, 2004.

Vajnai Attila: Megvalósult és tervezett biomassza projektek Magyarországon, MVM. www.bioenergia2007.com/presentations/05-MVM_hu.pdf. Letöltés: 2012.12.12.

Varga-Haszonits Zoltán.: Az éghajlatváltozás mezőgazdasági hatásának elemzése, éghajlati scenáriók. *Agro-21 Füzetek,* 31(2003), 9–28.

Vascellari, M.–Cau, G.: Numerical Simulation of Pulverized Coal Oxy-Combustion with Exhaust Gas Recirculation. Department of Mechanical Engineering, University of Cagliari, Italy, Academia 2012.

Vécsi György: A Borsodi Erőmű átállítása biomassza tüzelésre. Előadás, MTA, 2005. április 12. http://www.enpol2000.hu/?q=node/113. Letöltés: 2012. 12.12.

Veres Gábor: Komplex természettudományos terület. Globális éghajlatváltozás. Observans Kft. Budapest, 2009. http://www.petriktiszk.hu/Lists/Hirdetmnyek/Attachments/42/TERM11_TK%20beliv.pdf

Vissy Károly: Meteorológiai iskolája. 2005. Szemelvények a meteorológiából. gata.uw.hu/doksik/metiskola.doc. Letöltés: 2012.12.12.

Vörös, F.–Kertész, V.–Reményi, K.: Coal-Particle burning. 11th Conference on Internal Combustion Engines and Combustion. India, Madras, 1998.

Walas, S. M.: *Reaction Kinetics.* University of Kansas, McGraw-Hill Companies, Inc. 1999.

Watson, S.: How Olympic Torches Work: http://entertainment.howstuffworks.com/olympic-torch5.htm Letöltés ideje: 2012.12.12.

Weltner, M.: Über die derivatografische Untersuchung des Extraktionvorganges von unbehandelten und thermisch vorbehandelten Steinkohlen. *Acta Chimica,* 31(1962), 449–472

Wet Flue Gas Desulfurization System. http://www.babcock.com/library/pdf/pch569.pdf. Letöltés: 2012.12.12.

Wigley Tom M. L.: Coal to gas: the influence of methane leakage. Climatic Change, 2011. http://www.usclimatenetwork.org/resource-database/report-coal-to-gas-the-influence-of-methane-leakage. Letöltés: 2012.12.12.

WMO–UNEP (2007): Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Fourth Essessment Report, 2007. World Meteorological Organisation–United Nations Environment Program

World Energy Council (2008): 2007 Survey of Energy Resources. World Energy Council, London http://www.worldenergy.org/publications/survey_of_energy_resources_2007/default.asp

Zágoni Miklós: Előzetes megjegyzések az IPCC AR5 WG1 First Order Draft-hoz, 2012. január 19.

Zeebe, R. E.: An explanation of the effect of seawater carbonate concentration on foraminiferal oxygen isotopes. *Geochimica et Cosmochimica Acta,* 63(1999), 13/14, 2001–2007.

Zumdahl S. S.: *Chemical Principles.* 5th edition. Houghton Mifflin Company, Boston, 2005.

A fosszilis tüzelőanyagok az energetikában vezető szerepet töltöttek be a múltban és fognak betölteni a jövőben is. Az emberiség rendelkezésére álló szénkészletek igen nagyok. A jelenlegi vagy azt valamelyest meghaladó felhasználási szintet figyelembe véve még több száz évig elegendőek. A fosszilis tüzelőanyagokból történő energiafejlesztés szénvegyületek elégetését jelenti. Ennek eredményeként az egyéb égéstermékek mellett jelentős szén-dioxid-kibocsátásra is sor kerül. A huszadik évszázad közepén az üvegházgázok hatásának mértéke lett komoly vita tárgya, de nagymértékben eltérnek a vélemények egymástól, számos esetben nem is mondhatók megalapozottnak. Elsősorban a szén-dioxid szerepének eltúlzására gondolunk. A témában a média közreműködésével egy, ennek igazolásán munkálkodó, erős nemzetközi tábor alakult ki. Az utóbbi években azonban a kijelentett evidenciák és konszenzusok megalapozottsága kérdésessé vált. Ennek az új felfogásnak képviselője és elméleti megalapozója e könyv szerzője is. A szén nem szennyezőanyag, hanem az élet alapját szolgáló szénciklus része. A CO_2-t elsődleges paraméterként felelőssé tenni a klíma alakulásáért tudományosan nem indokolt. A szén-dioxid-kibocsátás csökkentését célzó legfontosabb nagy nemzetközi értekezletek – Kiotó, Koppenhága, Cancun és Rio de Janeiro – kudarcai fel kell hogy ébresszék a tudományos lelkiismeretet az eddigi megállapítások felülvizsgálatára.

Akadémiai Kiadó ■ www.akademiaikiado.hu

9 789630 592796