

Reményi Károly
az MTA rendes tagja

PARADOXONOK A TÜZELÉSTECHNIKÁBAN

Elhangzott 1998. június 9-én

Mielőtt a szakmai témára rátérnék, az első gondolattal azokra kell emlékezni, akik segítettek az eredményeim elérésében. Elsősorban a család, sajnos szüleim és testvérem már nem lehet közöttünk. Különösen fontosak voltak azok az iskolák és pedagógusok, akik még gyermekkorban a tudás átadása mellett a nevelésemhez is alapvetően hozzájárultak. Egy



1. kép. A XIX. kerületi általános iskola

XIX. kerületi általános iskola (1. kép), a gimnázium alsó osztályai a X. kerületi Széchenyi István Gimnázium (2. kép) és a felsőbb gimnáziumi osztályok és az érettségi a IX. kerületi Fáy András Gimnáziumban (3. kép). Elsősorban emlékezetes tanárain ezen iskolákban: I. Sz. Általános Iskola: Telkes Alfrédné (tanító), Széchenyi István Gimnázium: Vági Károly (matematika–fizika), dr. Klenner Aladár (magyar–német), Fáy András Gimnázium: Strobel Ernő (matematika), Schág Mária (fizika).



2. kép. A X. kerületi Széchenyi István Gimnázium



3. kép. A IX. kerületi Fáy András Gimnázium

A tűz az emberré válás legfontosabb tényezője volt. Amikor az ősről rájött, hogy nemcsak a villámcsapás vagy a vulkán, vagy különleges esetben egy vízcsepp tud fennmaradó égési folyamatot előidézni, hanem például türelmes dörzsöléssel bizonyos anyagok lángra lobbanthatók, akkor kezdődhetett az emberi társadalom kialakulása. A tűz meleget és világságot biztosított és csökkentette a természettel szembeni kiszolgáltatottságot.

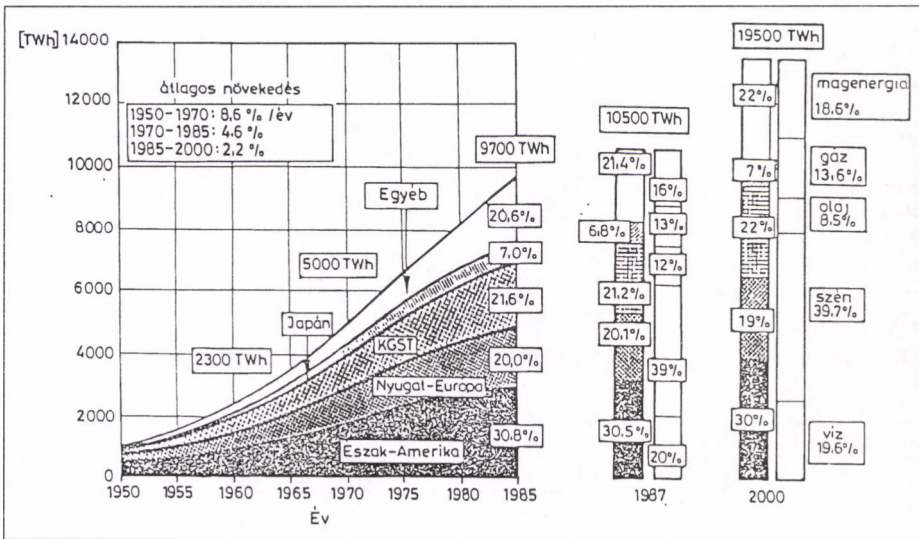
Az isteni tudásból lopott el az emberi ősről, amiért az istenek meg is haragudtak rá. Szegény Prométheuszra szörnyűséges szenvedést bocsátottak. Zeus azzal büntette, hogy egy sziklához láncoltatta és a máját egy saskeselyű szaggatta addig, amíg Héraklész le nem lőtte a madarat.

A mi májunktól a környezetvédők szaggatják, de mi nem azzal reagálunk, hogy lelőjük őket, hanem fejlesztjük a technológiánkat. A tűz isteni eredetét 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 versenyezhet.

A lírai hang után térjünk rá a komor valóságra.

Fejlesztések az energiaiparban

A világ és Magyarország energiaigényének nagyobb részét jelenleg is a fosszilis energiahordozókból, nevezetesen szénből, gázból és olajból fedezik (1. ábra). Ezen belül is jelentős részt képviselnek a konvencionális tüzelésű gőzkazánok



1. ábra. A világ energiatermelése és annak tüzelőanyagfajták szerinti megoszlása

és gőzturbinák alkotta energetikai blokkok. Az energetikai hatásfok növelését a Rankine-körfolyamat korlátozza, és egyre kisebb a lehetőség a hatékonyabb energiafejlesztésre. A rendelkezésre álló tüzelőanyag tekintetében is jelentős eltérések vannak, mivel míg a már ismert szénvagyon több száz évre elegendő, a szénhidrogének és a nukleáris energia jelenlegi alkalmazása mellett néhány évtizedet jósolnak. Természetesen a technika fejlődésével a kimerítési határok tapasztalat szerint kitolódnak, de ez minden energiahordozóra érvényes. Témánkat a fosszilis energiahordozókkal kapcsolatos problémák képezik, mivel az utóbbi évtizedek e területen alapvető változásokat hoztak, amely változások több ellentmondásos technikai igényt is támasztottak. Ezen paradoxonok nem elméleti jelleűek, hanem az energiafejlesztéssel szemben támasztott igények kielégítésekor felmerülő ellentétes 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

Az erőművi társaságok légszennyezőanyag-kibocsátása 1996-ban

Erőmű (telephely)	Kén-dioxid	Szén-monoxid	Nitrogén-oxidok	Szilárd	Szén-dioxid
	t/a				kt/a
Ajka	13 109	11 803	2 450	361	1 187
Inota	5 063	80	454	166	300
Inota GT	20	1	26	–	3
Bakonyi Erőmű Rt. összesen	18 192	11 884	2 930	527	1 490
Angyalföld	47	42	227	8	81
Kőbánya	935	49	586	–	215
Kelenföld	900	116	1 188	4	703
Kispest	1 029	34	595	34	253
Révész	–	16	169	–	85
Kelenföld GT 1*	5	0	6	–	1
Újpest	2	67	527	0	187
Budapesti Erőmű Rt. összesen	2 917	325	3 298	46	1 524
Dunamenti I.	4 522	158	970	300	357
Dunamenti II.	30 078	1 330	7 807	1 624	2 805
Dunamenti G1	33	1 059	953	–	699
Dunamenti G2	11	32	29	–	21
Dunamenti Erőmű Rt. összesen	34 644	2 580	9 759	1 924	3 882
Mátrai Erőmű Rt.	151 787	5 086	4 698	5 327	6 217
Komló	720	7	88	–	57
Pécs	28 407	1 537	2 973	1 395	1 098
Pécsi Erőmű Rt. összesen	29 127	1 544	3 060	1 395	1 155
Borsod	29 046	236	1 990	1 466	1 000
Tisza II.	11 342	574	3 789	–	1 944
Tiszapalkonya	35 495	551	3 465	3 537	1 042
Tiszai Erőmű Rt. összesen	75 883	1 362	9 243	5 003	3 985
Bánhida	15 149	29	1 595	1 946	534
Dorog	3 304	164	324	43	112
Oroszlány	91 479	110	4 514	863	1 891
Tatabánya	6 021	678	334	2 955	259
Vértesi Erőmű Rt. összesen	115 953	981	6 767	5 806	2 795
Békéscsaba	–	18	16	–	19
Kecskemét**	–	–	–	–	–
Szeged	–	8	18	–	21
Győr	617	20	75	20	47
Sopron	3	281	46	0	47
Székesfehérvár	1 847	0	161	8	99
Debrecen	752	53	119	62	187
Nyíregyháza	565	122	244	94	146
Áramszolgáltatók erőművei	3 783	502	681	183	566
Erőművek összesen	432 286	24 263	40 437	20 211	21 615

* Az inotai csúcs-gázturbinákéval azonos fajlagos kibocsátások alapján számítva ** Nincs adat

szén-dioxid- (CO_2) kibocsátás csökkentése került leginkább előtérbe, mivel az utóbbi évtizedekben a szilárd szennyezők kibocsátásának problémáját gyakorlatilag megoldották, de újabb és újabb szennyezőanyagok (szerves komponensek, nyomelemek stb.) kibocsátásának korlátozását írják elő. Környezetünk megóvása tehát a konzervatív tüzeléstechnikában fejlesztésekre serkentett, de új technológiák megjelenését is előmozdította.

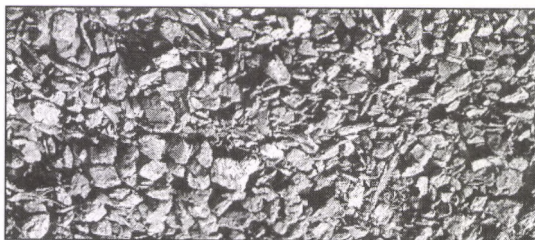
Magyarország környezet-szennyezésében jelentős szerepet játszik az energiatermelés, különösen az erőművek (2. és 3. táblázat). Különösen szénerőműveknél jelentős a környezetszennyezés problémája, mivel a nagy hamutartalom mellett jelentős kéntartalom is található (4. és 5. kép). A magyar szének között megtalálható a feketeszen, barnaszen és lignit. Az égési tulajdonságok összehasonlítását a 2. ábra szemlélteti.

A legfontosabb fejlesztések tehát alapvetően a környezet-szennyezés csökkentését, az energiahordozók hatékonyabb felhasználását célozták az energiafejlesztési folyamat egészének, illetve egyes legfontosabb részelemeinek a

3. táblázat

Megnevezés	1995	1996
Villamosenergia-igény, TWh (VER)	36,1	36,9
Villamosenergia-term., TWh (MVM)	33,2	34,2
SO_2 -kibocsátás, kt	435,0	432,3
NO_x -kibocsátás, kt	39,3	40,4
Szilárdanyag-kibocsátás, kt	20,6	20,2

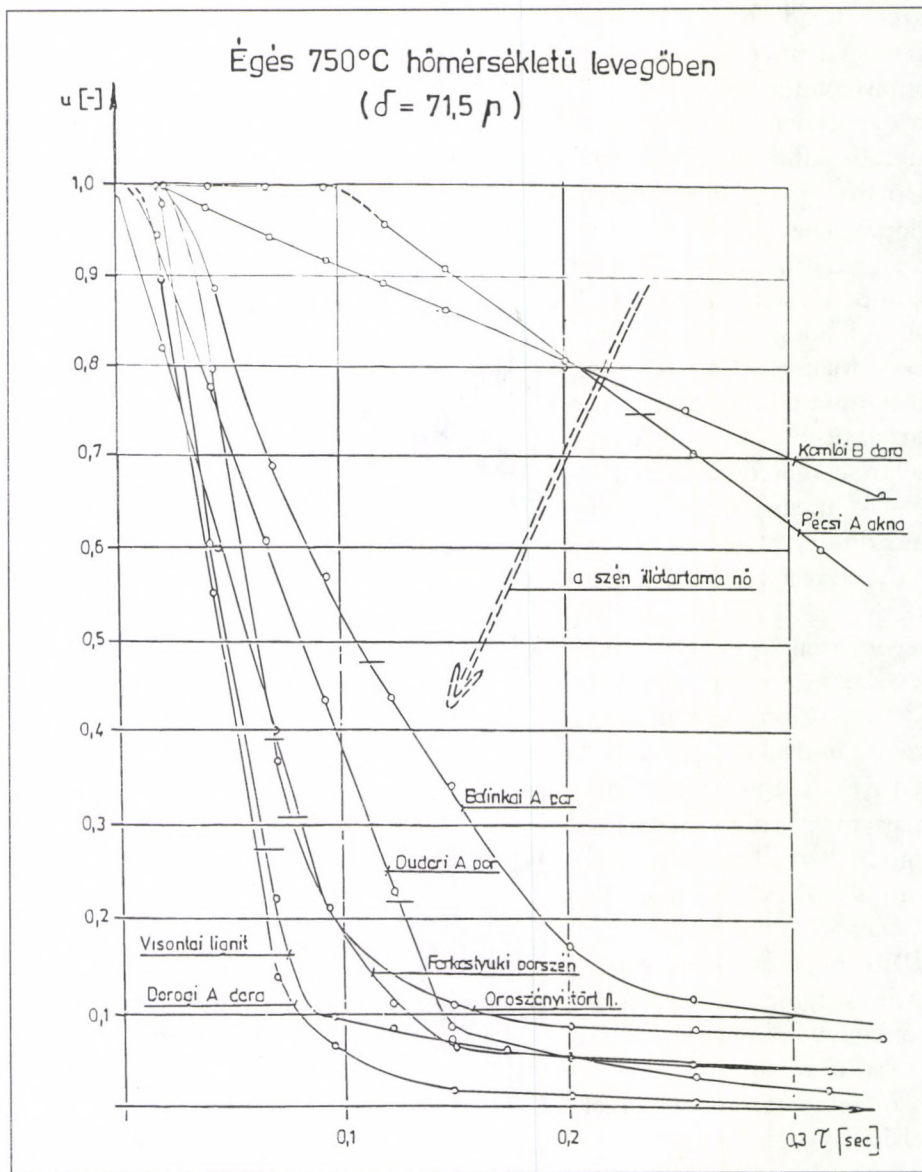
A Magyar Villamos Művek Közleményei, '97/3.



4. kép



5. kép



2. ábra

fejlesztésével. A szerteágazó fejlesztéseket a következő legfontosabb csoportokba lehet sorolni, figyelembe véve, hogy egyes eljárások különösen a szilárd energiahordozók hasznosítását érintik, míg mások általánosabban alkalmazha-

tók különböző tüzelőanyagokra. Az egyes eljárásoknál még különleges kombinációk is találhatóak, pl. nukleáris energia vagy a tüzelőanyag-cella alkalmazásával. Az utóbbi évtizedek legfontosabb fejlesztései:

1. Nagy teljesítményű szénportüzelésű kazánok és égők fejlesztései.
2. Fluidizációs tüzelés, gőzturbina-generátor blokkban alkalmazva.
3. Fluidizációs tüzelés gázturbinával és hőhasznosító gőzfejlesztővel és gőzturbinával kombinálva.
4. Szénelgázosítás, úgynevezett kombinált gáz-gőz körfolyamatban alkalmazva.
5. Az előbbi technológiák kombinációja, úgynevezett „topping cycle process” folyamattal.
6. Integrált vegyi és energiatechnológiai folyamatok kombinációja.

A fejlesztések tehát elsősorban a környezetszennyezés csökkentését és a hatásfoknövelést szolgálták. A legfontosabb környezetszennyező anyagok a következők:

A szilárd szennyezők

Az utóbbi évtizedekben a szilárd szennyező kibocsájtás csökkentése gyakorlatilag tetszőleges mértékben elérhető a következő eljárásokkal:

- villamos leválasztás,
- szövetszűrős leválasztás,
- ciklonok,
- kerámia-anyagú leválasztók,
- nedves leválasztás.

A technológiák biztosítják az 50 mg/Nm^3 alatti előírt értékeket, és szigorúbb rendszabályok csak valamely különösen veszélyes összetevő esetén indokolnak.

Kén-oxidok

A tüzelőanyagokban a kén legfontosabb előfordulási formái az organikus és a piritkén. A kén-dioxid, mint elsősorban az erőművi tüzelőanyagokban jelen lévő kén égési terméke, ma talán a 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 alacsony kéntartalmú olaj- és gáztüzelésre.

Különösen az utóbbi két évtizedben a kén-dioxid-szennyezés problémájára világszerte egyre nagyobb figyelmet fordítanak, 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 pl. a fluidágyas tüzelés vagy pedig gázosítás a kombinált gőz-gáz módszerrel együtt,
- magas kémények építése,
- a füstgázok kéntelenítése vagy semlegesítése (időszakosan vagy folyamatosan).

A nitrogén-oxidok

A nitrogén-oxidok a fosszilis tüzelőanyagok tüzelésekor a lángban és a magas hőmérsékletű égéstermékekben az égési levegő nitrogénmolekuláinak részleges oxidációjával és a tüzelőanyag nitrogéntartalmának vegyi átalakulásával keletkeznek. Általában NO és NO₂ keletkezik, éspedig az erőművekből emittált nitrogén-oxidokból kb. 95% NO és 5% NO₂.

A jelenlegi ismeretek szerint három különböző mechanizmus létezik:

- 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 N₂-né. Az 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.

A legfontosabb reakciókra vonatkozó tájékoztató számításokra a különböző képletek alkalmazhatók, amelyek alapján azok a tényezők is értékelhetők, amelyekkel a NO_x mennyiségek csökkenthetők.

A dinitrogén-oxid

A N_2O gáz jelentős szerepet játszik az üvegházhatás kialakításában. A N_2O hosszú élettartamú gáz, az atmoszférában kb. 130 évig marad meg. Az atmoszférában lévő N_2O -növekedést különböző tényezők befolyásolják, kisebb mértékben a széntüzelés. A NO_x -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_x szelektív katalitikus csökkentése nem befolyásolja a N_2O -emissziót. A szelektív nem katalitikus redukció kissé növeli a N_2O -emissziót. A jelenlegi fluidizációs széntüzelés nagyobb N_2O -emissziót eredményez, mint a konvencionális széntüzelések. A hibrid fluidtüzelés e szempontból is kedvező technológia.

A szén-dioxid

A leginkább követhető gázösszetevő a légkörben a CO_2 . Bár a CO_2 -háztartásban az emberi tevékenység százalékosan kis értékben szerepel, de növekedése az iparosítás kezdete óta jelentős értékű, 280 ppm-ről 350 ppm-re változott. Az ipar és ezen belül az energetika szerepe alapvető. Ugyancsak jelentős szerepe van annak, hogy az energia-előállításhoz milyen enregiahordozót és milyen körfolyamatot választunk.

Az energetikában a fosszilis tüzelőanyagok felhasználása igen jelentős, ami jelentős CO_2 -forrást is jelent. A népességnövekedés, a CO_2 -növekedés és a világ energiagigényének növekedése hasonló tendenciát mutat.

Az enregiahordozók között, mint CO_2 -források között is, jelentős különbségek vannak.

Nagy teljesítményű szénportüzelések

A szilárd, illómentes tüzelőanyagok égésmechanizmusa a heterogén kémiai reakciók törvényszerűségei szerint játszódik le. A szilárd fázisú tüzelőanyag és a gáz fázisú 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 a fenti általános kitétel. 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 és kémiai folyamatokat találunk. Ezek a részfolyamatok darabos vagy finom őrlmények 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 elpárolgatása,
- az illótartalom kigázosodása kokszképződés mellett,
- az illó égése a homogén kémiai reakciók szerint,
- a kokszyulladás és égése a heterogén reakciók szerint,
- salak és hamuképződés, esetleg hőcsere folyamat mellett.

Gondot okoz a természetes szénfajták égés közbeni viselkedése, ahol számtalan tényezőnek lehet kedvező vagy kedvezőtlen befolyása. Az általános értékmérőként használt fűtőérték vagy égésmeleg legfeljebb az energetikai értékeléshez 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. 1964–68 között azonban a részletesebb kísérleti vizsgálatok világosan rámutattak arra, hogy a kőszén kocszszemcséin belül nagy üregek vannak, és a pórusokon keresztül az oxigén be tud hatolni a széngömb belsőjébe.

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

A különböző minőségű kőszemek kokszzsemcséinek égését vizsgálva két fő típus különböztethető meg, a duzzadó és a nem duzzadó szemek kategóriája.

Nem duzzadó (gyengébb minőségű) szemek kokszzsemcséinek 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.

Duzzadó szemek kokszzsemcséinek közepes átmérője az égés során csökken, de a látszólagos sűrűség nő. Ez a növekedés azért is jelentkezhett, 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 hőmérséklet használták fel a fenti 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 hőmérsékletből 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-produkció csaknem biztossá válik. Ha viszont ez a helyzet, akkor a CO úgy ég el a szemcse határrétegében, azaz a homogén fázisban, hogy nem hat vissza a szemcsehőmérséklet alakulására.

A kísérletek során a gázmintában CO jelenlétét nem tudták kimutatni (0,01%). Ennek oka valószínűleg a CO csaknem tökéletes elégése a kokszzsemcse-felület közelében.

A reakciók sebessége az oxigén parciális nyomásával arányosnak adódott feketekőszénre és antracitra. A barnakőszén-kokszzsemcséinek 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 korábbi saroktüzeléseket úgy alakították ki, hogy az égők tengelyei egy a tüztér közepére képzelt, kb. 1 m átmérőjű kör érintőjeként helyezkedtek el. Így üzem közben a tüztérben egy örvény képződött, a tüzelőanyag és az égési levegő mielőbbi, jó keveredése mellett. E tüzelési módnál is van lehetőség a

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. Ezzel az égés első fokozatában léghiányos zónát létrehozva ennek ismert hatásaként az NO_x csökkenését lehet elérni.

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). Az oxigénszegény környezetben alacsony NO_x-képződés mellett folyik a pirolízist követő égés. Ezt azonban még a megfelelő kiegészítést biztosító szakasz kell kövesse. Az égési levegő adagolása megválasztásának azonban a szénfajta égési tulajdonsága is 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 az előző feltételeket. Az égők a következő legfontosabb nagyobb csoportokba sorolhatók:

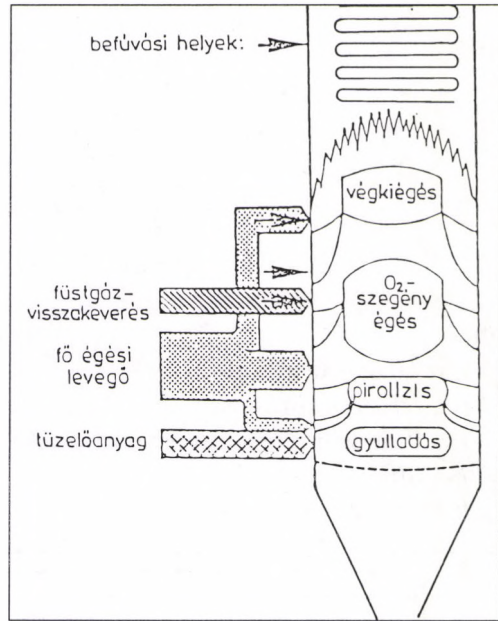
- többfokozatú levegőadagolás,
- többfokozatú tüzelőanyag-adagolás,
- füstgáz-recirkuláció.

Az égési levegőnek több fokozatra, primer, szekunder és terciér levegőre való osztásával a tüzelőanyag égésének feltételeit és ezzel a nitrogén-oxidok keletkezését tudjuk befolyásolni.

A tüzelési vázlatot a 3. 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 terciér levegővel szén esetében a sztöchiometrikus arány kb. 120%-ának megfelelő levegőmennyiséggel a teljes kiegészítést biztosítják.

Ezeknél az égőknel a levegő-adagolás 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 közvetlen 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.



3. ábra. Többfokozatú égés az égésilevegő-adagolás megosztásával

Fluidizációs tüzelés

Ha szilárd szemcsés halmazon gáz áramlik át, a sebesség növelésével a nyomásesés változását a 4. ábra mutatja (logaritmikus léptékekben).

Az áramlás különböző szakaszán a nyomásesés változását leíró összefüggések:

Első szakasz (rostélytüzelés):

$$\Delta p \sim \frac{u^2}{2g}, \log \Delta p \sim 2 \log u.$$

A jelleggörbe ferde egyenes.

Második szakasz (fluidizáció állandó nyomásesés mellett):

Az áramlás során, a sebesség egy bizonyos u_c értéket elérve, a réteg lazulni és terjedni kezd, a szemcsés halmaz kezd folyadékként viselkedni, mint ahonnan az elnevezés is származik. A nyomásváltozást az határozza meg, hogy lényegében a rétegben lévő állandó értékű anyagmennyiséget egyensúlyban kell tartani, azaz

$$\Delta p = p_s (1 - \varepsilon) h,$$

$$m = \text{áll.} = p_s (1 - \varepsilon) V = p_s (1 - \varepsilon) h F,$$

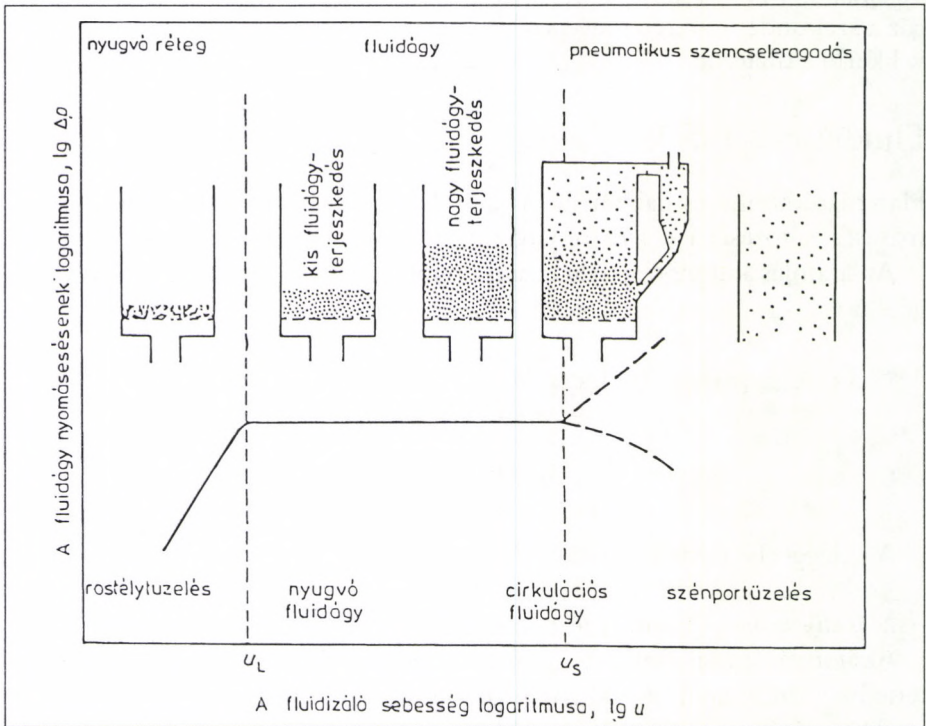
$$p_s (1 - \varepsilon) = \frac{m \dot{V}}{F h},$$

$$\Delta p = \frac{m h}{F h} = \frac{m}{F} = \text{áll.}$$

$$\log \Delta p = \log \text{áll.} = \text{áll.}$$

ahol

ε az átlagos űrtérfogat
 p_s a szemcse sűrűsége,
 V a fluidizált réteg térfogata,
 F a fluidizált réteg keresztmetszete,
 h a fluidizált réteg magassága.



4. ábra. Szemcsés halmoz állapotváltozása gázáramlás esetén;
 u_L a fluidizációs kezdősebesség, u a lebegési sebesség

A rétegben a nyomásesés állandó, tehát a sebesség függvényében a jelleggörbén vízszintes szakasz található.

Harmadik szakasz, cirkulációs fluidizáció (pneumatikus szállítás, szénpor-tüzelés, átáramlás, szénpor gázosítása):

A sebesség növekedésével elérve egy értéket, az u , lebegési sebesség értékét, amely felett a szemcsehalmból a gáz szemcséket ragad magával. Ha megfelelő utánpótlása van a szemcséknek, akkor a jelleggörbe az áramlási ellenálásra érvényes törvényszerűséget követi, azaz

$$\Delta p \sim \frac{u^2}{2g}, \log \Delta p \sim m \log u.$$

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 gázáramlás értéke felé tart.

Nyomás alatti fluidtüzelés

A nyomás növelése a fluidizációs tüzeléseknél is régóta igény a tüzeléstechnikában. Különösen előtérbe került ez a törekvés a gőz-gáz körfolyamatok mind szélesebb elterjedésével. A nyomás alatti tüzelés (Pressurized Fluidized Bed Combustion PFBC) alkalmazásánál alapvetően két irányban indult erőteljes fejlesztés, úgymint:

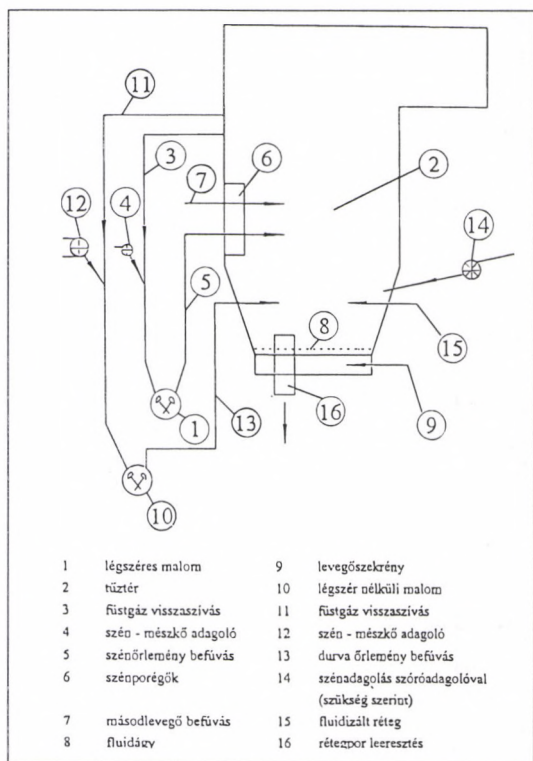
- a tüzelőanyag teljes égése utáni füstgáznak gázturbinára való vezetése,
- a fluidkazánban a tüzelőanyag elgázosítása és a gáznak a gázturbina-égetttestben történő eltüzelése.

Fluidkazán–gázturbina közvetlen kapcsolat

A PFBC-ben a tüzelőanyag teljes elégése után fejlődő füstgázok energiatartalmának közvetlen gázturbinában való hasznosítására közel párhuzamosan három terv született: az USA-ban a TIDD, Spanyolországban az ESCATRON és Svédországban a VARTAN. A tervek széles körű nemzetközi szakmai együttműködésben valósultak meg.

Magyarországi fejlesztések a fluidizációs technikában

A gyenge minőségű szenek környezetbarát technológiával történő energetikai hasznosítására született eljárások közül a fluidizációs tüzelés emelhető ki. Elterjedése az utóbbi évtizedekben mégsem volt olyan mértékű, mint az előzetes



5. ábra. Hibrid fluid tüzelési rendszer

képezik ki, majd felette a tüztérfalon kiképzett megfelelő nyílásokon további tüzelőanyag-beadagolásra van lehetőség. Új berendezésnél a kialakításban a tervezőnek szabad keze van, míg régi berendezéseknél a tüztér alsó részét és a korábbi szénőrő malmok egy részét alakítják át.

A megoldás legfontosabb újonságai:

- a szén kiegészéhez szükséges tartózkodási időt a tüztéri cirkulációval oldja meg, nincs szükség ciklonra,
- gyakorlatilag pulzációmentes üzemet biztosít (az Ajkai Erőműben BME-mérés),
- a konstrukció gyakorlatilag megegyezik a korábbi szénportüzelésű kazánokéval, ezzel tehát olyan egységteljesítmény érhető el, mint szénportüzeléseknél,
- a kazánszintben több magasságban elhelyezett szénadagolással a N_2O képződési mechanizmusába úgy avatkozik be, hogy annak elbomlása a normál cirkulációs tüzeléshez képest lényegesen nagyobb mértékben történjen.

feltételezésben prognosztizáltak. Ennek oka az energiaigények várakozás alatti növekedése mellett az árkérdésben és a meglévő berendezésekre való alkalmazásban jelentkező korlátozásokban határozható meg.

Magyarországon a Villamosenergia-ipari Kutató Intézetben a legkorszerűbb tüzeléstechnikai és égésméleti ismeretek alapján egy többfokozatú tüzelőanyag adagolású egytűzterű örvényes fluidtüzelés került kifejlesztésre, amely mind új berendezéseknél, mind régebbi berendezéseknél mérsékelt anyagi és pénzügyi ráfordítással alkalmazható (5. ábra).

Az eljárás lényege, hogy a tüztér alsó részét fluidizációs tüzelésre alkalmas ágyként

A szén elgázosítása

A szén cseppfolyósításánál lényegesen kiforrottabb és szélesebb körben alkalmazott eljárás a szén elgázosítása, ill. az erre kidolgozott technológiák felhasználása. Szénelgázosításon a szilárd tüzelőanyagok levegővel, levegő + vízgőzzel, oxigén + vízgőzzel történő átalakítását értjük.

Erőművi alkalmazás esetén elsősorban a levegő + vízgőzzel történő gázosítás jöhet szóba, mely esetben a szén kéntartalma kénhidrogénné alakul. Ez lényegesen egyszerűbben választható le a gázból, mint a szén közvetlen elégetése során keletkező füstgázban megjelenő kén-dioxid. A kénhidrogén-leválasztás azért egyszerűbb és hatékonyabb, mert a kéntelenítő gáz térfogata és az eltávolítandó kénhidrogén parciális nyomása közel két nagyságrenddel kisebb, mint a közvetlen széntüzelés esetén adódó füstgáz térfogata, és abban az SO_2 parciális nyomása.

A fejlett ipari államokban az utóbbi években egyre inkább előtérbe került a szénelgázosítás, amit elsősorban az a felismerés indokolt, hogy a rendelkezésre álló földgáz- és nyersolajkészletek nem kimeríthetetlenek.

Kombinált erőművek – a „topping ciklus” és a IGCC

A „topping ciklus” lényegében a „gőz-gáz” 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 fluidizációs elgázosítóban részben elgázosított szénből fejlesztett gáz és a gázturbina égőkamrájában, magas hőmérsékleten, innen a név, ez a „ciklus teteje”. Továbbá az elgázosítóból kikerülő kokszt cirkulációs fluidkazánban a gőzfolyamat számára gőzfejlesztésre szolgál. Ezzel az eljárással adalékanyaggal (mészke) 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.

Az energiafejlesztést és a metanolgyártást összekapcsoló rendszer is létezik. A rendszer rendkívül bonyolult, és gyakorlatilag minden probléma megoldását tűzi ki célul a legkorszerűbb technikai elemek alkalmazásával.

A tüzelőanyag-cellák szerepe az energetikában

A tüzelőanyagcella-típusok jövőben várható szerepét meghatározó legfontosabb szempontok:

- a távlati jelentőségét a hidrogénfejlesztési technológia, a cellák gyártástechnológiája és annak költségei döntően befolyásolják,
- a különböző típusok előnyeinek és hátrányainak kihasználása befolyásolja elterjedésüket,
- a kisebb teljesítmények (25–500 kW) várhatóan szélesebb körben gyorsan terjednek, a nagyobbakhoz lényeges gazdaságossági javulás szükséges,
- a kisebb rendszerek egyszerűbbek, a nagyobb rendszereknél a bonyolultabb kapcsolással jobb hatékonyság érhető el,
- a tüzelőanyagok, különösen a gáz árának növekedése előnyös helyzetbe hozza a hatékonyabb rendszereket,
- rendkívül alacsony NO_x -emisszió érhető el, 10 ppm alatti a PAFC-rendszernél, 1 ppm alatti a MCFC-rendszernél.

Gázturbinás kombinált erőművek magas hőmérsékletű tüzelőanyag-cellával

Az oxidkerámiás tüzelőanyag-cellák különösen alkalmasak lehetnek a jövő erőművi folyamataiban való felhasználásra. A magas hőmérsékletű oxidkerámiás tüzelőanyag-cella cellahűtését a levegő-, ill. tüzelőanyag-előmelegítési folyamatba bekapcsolva a körfolyamati hatásfok jelentősen növelhető az egyébként is magas cellahatásfok fölé. A gázturbinával kombinált erőmű megvalósítására a legalkalmasabb az oxidkerámiás tüzelőanyag-cella.

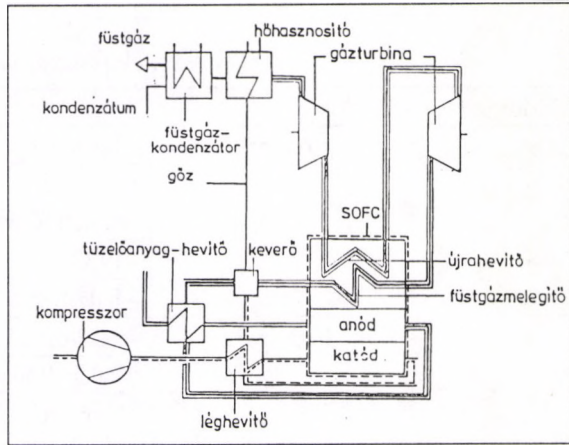
A jelenleg rendelkezésre álló cellatípusok:

- az alacsony hőmérsékletű cella (pl. kálilúgos) 80 °C-on üzemel,
- a közepes hőmérsékletű cella (pl. foszforsavas) 200 °C tartományban,
- a magas hőmérsékletű cellák (megolvasztott karbonátos) 650 °C és
- az oxidkerámiás cellák (szilárd oxidkerámia, Solid Oxid Fuel Cell SOFC) 1000 °C tartományban.

A cellák villamos hatásfoka 55–65%. A SOFC-cellahűtést levegő, ill. tüzelőanyag-felmelegítési folyamatba iktatva lehet biztosítani. A legkedvezőbb hatásfok $n = 1$ légfeslelnél, azaz sztöchiometrikus viszonyoknál érhető el. A fellépő hőfeszültségek uralása céljából a levegőt és a tüzelőanyagot kb. 850 °C-ra kell melegíteni, 1000 °C cellahőmérsékletnél.

Egy lehetséges erőművi kapcsolást mutat a 6. ábra, amelynél levegő- és tüzelőanyag-előmelegítést, gőzbeűvással gázturbinát és elgőzöltető előmelegí-

tőt is alkalmaznak. Az égési levegőt egy kompresszor sűríti, majd egy levegő-előmelegítőn keresztül vezetik a katódoldalra. A tüzelőanyag így tüzelőanyag-előmelegítőn keresztül jut a SOFC anódoldalára. Az anódból távozó gáz és a katódból távozó levegő a tüzelőanyag-, ill. a levegő-előmelegítőn keresztül áramolva lehűl. A tüzelőanyag és a levegő felmelegedve a hőhasznosító kazánban fejlesztett gőzzel keveredik.



6. ábra. Gázturbinás, tüzelőanyag-cellás erőmű kapcsolása

Ezt a fűstgázt ismét a SOFC-rendszerbe vezetik, és ott az integrált fűstgáz-előmelegítőben felhevül. Ez a forró gáz expandál a gázturbinában. A gázturbina után helyeznek el egy hőhasznosító kazánt és egy fűstgáz-kondenzátort, a szükséges tápvízmenyiség egy részének fedezésére.

Az elérhető hatásfokot a nyomásviszony, a légfeszültség-tényező és a cellahőmérséklet jelentősen befolyásolja. Magas hőmérsékletű celláknál a cellákra és a hőhasznosítókra számos kapcsolat elképzelhető.

Fejlesztések, paradoxonok

A tüzeléstechnikával szemben támasztott követelmények kielégítése során ellentmondások keletkeznek. E paradoxonok fontosabb részelemei találhatóak a 4. táblázatban. 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 részlemezét elemezzük a következőkben.

Az égési folyamat paradoxona

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.

Paradoxonok (összefoglalás)

Hőmérséklet-paradoxon	
előnyös:	- hőátadás
	- gyulladás
	- reakciósebesség
	- N ₂ O-bomlás
	- hatásfok-növekedés
hátrányos:	- salakosodás
	- kalcinálódás
	- termikus NO _x
	- kéntelenítés csökken
Adalékolás paradoxon (CaCO ₃)	
előnyös:	- SO ₂ -csökkentés
hátrányos:	- gyulladás
	- reakciósebesség (mészke CO ₂)
	- veszteség
	- többlet CO ₂
	- hatásfokcsökkenés
	- kalcinálódás romlás (szén égés CO ₂)
Jó keveredési paradoxon	
előnyös:	- gyulladás
	- reakciósebesség
	- alacsony CO
hátrányos:	- tüzelőanyag NO _x -képződés
Globális szennyezés paradoxon	
előnyös:	- SO ₂ -csökkenés
	- NO _x -csökkentés
hátrányos:	- CO ₂ -növekedés
	- NO ₂ -növekedés

A tüzelési folyamat legkritikusabb szakasza a tüztérbe 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 égőknel – 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 gyulladási sebesség változása,
- 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 göcöket képezve a láng tovaterjedése szempontjából kiindulási pontokat jelentenek.

A gyulladási elmélet lényege, hogy a V térfogatú, T_0 hőmérsékletű edényben levő éghető keverékben kémiai reakció folyik, amelynek sebessége:

$$\frac{dc}{d\tau} = f(p) \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)$$

A reakció lefolyásának eredményeképpen a V térfogatban egységnyi idő alatt felszabadult hőmennyiség:

$$\frac{dq_1}{d\tau} = F \frac{dc}{d\tau} V = FV f(p) \exp\left(-\frac{E}{RT}\right).$$

A reakció következtében felszabadult hőmennyiség hatására a T_0 hőmérséklet T -re növekszik. A hőelvonást a következő egyenlet fejezi ki:

$$\frac{dq_2}{d\tau} = A(T - T_0).$$

A tüzelőanyag gyulladása abban a pillanatban következik be, amikor a hőfelszabadulás és a hőelvonás egyensúlyba kerül. Ezért a gyulladási hőmérsékletet nem lehet fizikai vagy kémiai állandóként kezelni, hanem függ a körülményektől is.

A stabil égés akkor jöhet létre, ha a keverék gyulladása után a hőfejlődés meghaladja a hőelvonást az egyensúlyi állapot beálltáig. Ezen állapotban az ábrán a T_1 pont felel meg. E határesetben:

$$\left(\frac{dq_1}{d\tau}\right)_{T=T_1} = \left(\frac{dq_2}{d\tau}\right)_{T=T_1}$$

A hőfelszabadulás és hőelvonás egyenlőségét és a deriváltak egyenlőségét felírva:

$$FVf(p) \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) = A(T - T_0)$$

és

$$\frac{E}{RT^2} FVf(p) \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) = A,$$

az egyenletrendszer megoldva másodfokú egyenlet lesz:

$$\frac{RT^2}{E} = T - T_0$$

A $T = T_1 - T$ a gyulladási hőmérséklet értékére

$$T_{gy} = \frac{1 - \sqrt{1 - \frac{4RT_0}{E}}}{2\frac{R}{E}}$$

összefüggés adódik.

Szénporttüzeléskor 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 azonban a keverékben levő oxigén mennyisége az oxigénnel bejuttatott nagy mennyiségű nitrogén miatt nem a szén teljes elégéséhez szükséges értéken adja a legkedvezőbb viszonyokat, hanem ennél kisebbben. A tiszta oxigénben való tüzeléshez képest, a tökéletes égéshez szükséges oxigénmennyiség tartós monoton növekedés helyett – az illótartalomtól függően – az elméleti levegőmennyiségnél kisebb értéken maximum lép fel.

Régebbi szakkönyvekben található olyan megállapítás, hogy a szénporttüzeléskor bevezetett primer levegő mennyisége az illó égéshez szükséges levegőmennyiséggel egyezik meg. Más könyvekben az általában ennél nagyobb értéket adó illószázalékkal azonos százalékos arányban jelölik meg a primer levegő mennyiségét.

A teljes égésfolyamatot tekintve ezek a javaslatok mindenképpen felülvizsgálatra szorulnak. Ha a tüzelőanyag teljes elégésétől függetlenül vizsgáljuk a szénpor gyulladását, akkor a lángterjedési sebességeket figyelembe véve a primer levegőre vonatkozó korábbi következtetések adódnak.

A teljes égésfolyamatot vizsgálva a primer levegőadagolási viszonyt alapvetően más szemléletben kell meghatározni. 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 alkotórészek nagy sebességű égése játszódik le, az oxigént elfogyasztják és nem kielégítő mennyiségű primer levegő esetén a visszamaradt szilárd alkotók nem gyulladnak meg. A szénpor égésének kezdeti fázisában tehát az ún. kettős gyulladás elmélete vezet helyesebb eredményre. Ennek bevezetésével tehát a szénporsugár égésében alapvetően két indulási folyamat is fellép. Ha a primer levegő mennyiségét úgy állítják be, hogy az az illó égéséhez legyen elegendő, úgy a kedvező keveredési viszonyok miatt a gyorsan eléggő 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 szükségképpen megszakad, és esetleg csak az égéstermékek és a szén közötti gázosodási folyamatok léteznek. Ezek szerepe természetesen szintén jelentős az égésfolyamat további szakaszában. Mindenesetre ilyen körülmények között a szilárd maradék újragyulladásának szükségességével számolni kell. Itt jut

szerephez a szekunder levegő bejuttatásának hatásossága. Ismeretesek azok a nehézségek, amelyek a már magas hőmérsékletet elért égéstermékek és hidegebb közegek keverésekor fellépnek a nagymértékű viszkozitáskülönbségek miatt.

A bevezetett kettős vagy többszörös gyulladás új szemlélete tehát elsősorban a levegő adagolásának oldaláról jelent változást. A teljes égésfolyamaton belül szemlélve a gyulladást, a jelenlegi gyakorlatban szokásos levegőmennyiségnél többet szükséges a primer keverékkel bevinni. E javasolt irányzat megvalósításakor azonban lényegesen nagyobb a szerepe a levegő-előmelegítés vég hőmérsékletének. Alacsony levegő-előmelegítési hőmérsékleteken az illóégés szakaszának 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 tüztérben a keverék kellő hőmérsékletét biztosítani. A levegő hőmérsékletét növelve a maximális gyulladási sebességérték is a nagyobb levegőmennyiségek felé tolódik el, tehát a primer levegőmennyiség függ a levegő-előmelegítés vég hőmérsékletétől.

Tehát mind a gyulladási, mind az égési és hőátadási szempontok minél magasabb tüztéri hőmérsékletet igényelnek.

A tüztér méretének a szempontjából is kedvező a magas tüztér-hőmérséklet. A tüzelőanyagból felszabadított hő átadása a körfolyamat külön munkaközegének a tüztérben nagyrészt sugárzással történik, ami az abszolút hőmérséklet negyedik hatványával arányos. Ennek megfelelően magasabb tüztérhőmérsékletnél a tüztér nagy hamutartalmú szeneknél nehezen uralható ellentmondás az, hogy a tüztér elpiszkolódása lényeges lehet, ami a hőátadást rontja, továbbá azonos teljesítmény eléréséhez nagyobb méretű tüztérrel kell biztosítani. E probléma sok évtizedes múltra tekint vissza, számos tisztítási lehetőséget kidolgoztak.

$$\frac{T_L^4 - F_F^4}{T_{L0}^4 - T_G^4} = \frac{T_L^4 - (T_G + \Delta T_{cső} + \Delta T_{piszk})^4}{T_{L0}^4 - T_G^4},$$

ahol T_L a láng, T_F a fal, T_G a víz vagy a gőz hőmérséklete, $\Delta T_{cső}$ a cső falán, ΔT_{piszk} a lerakódott rétegen bekövetkező hőmérséklet-változás, és a 0 index a tiszta felületre vonatkozik.

A hővezetés egyenlete alapján a tüztéri lerakódásának vastagsága:

$$\delta_{piszk} = \frac{\lambda_{piszk} \Delta T_{piszk}}{q}$$

$$Q_T = \varepsilon c_s F [(T_L / 100)^4 - (T_F / 100)^4] \approx Q_E \approx m_g r,$$

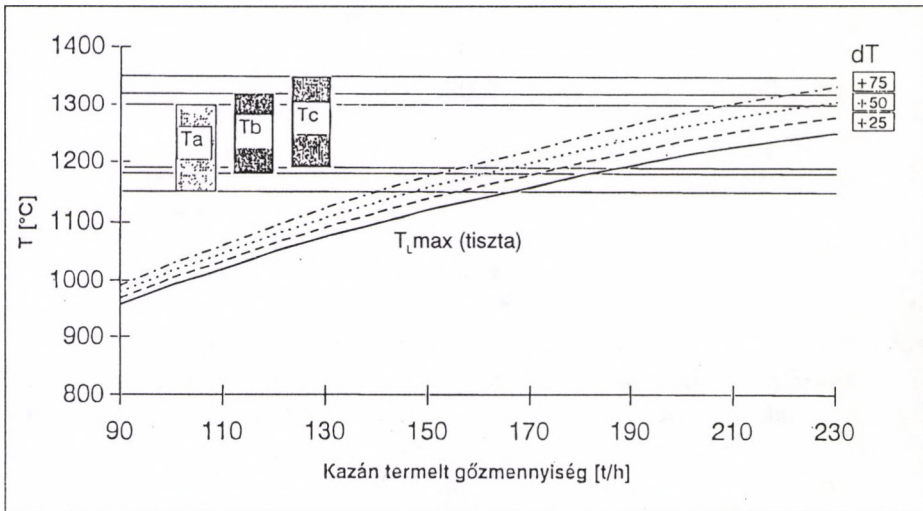
ahol ε a feketeségi fok, c_s a sugárzási tényező, F a felület, Q_T a tüztéroldali leadott, Q_E a kazán vízdoldali (elgőzölögtető) felvett hőteljesítmény, amelyek ideális esetben megegyeznek egymással, m_g az elgőzölögtetőből kilépő gőz tömegárama, r a víz párolgáshője az elgőzölögtető nyomásán.

A gyakorlatban elterjedten használják az elpizskolódási tényezőt

$$\xi = \frac{T_L^4 - T_f^4}{T_L^4 - T_G^4} = \frac{T_L^4 - (T_G + \Delta T_{cső} + \Delta T_{piszk})^4}{T_L^4 - T_G^4}$$

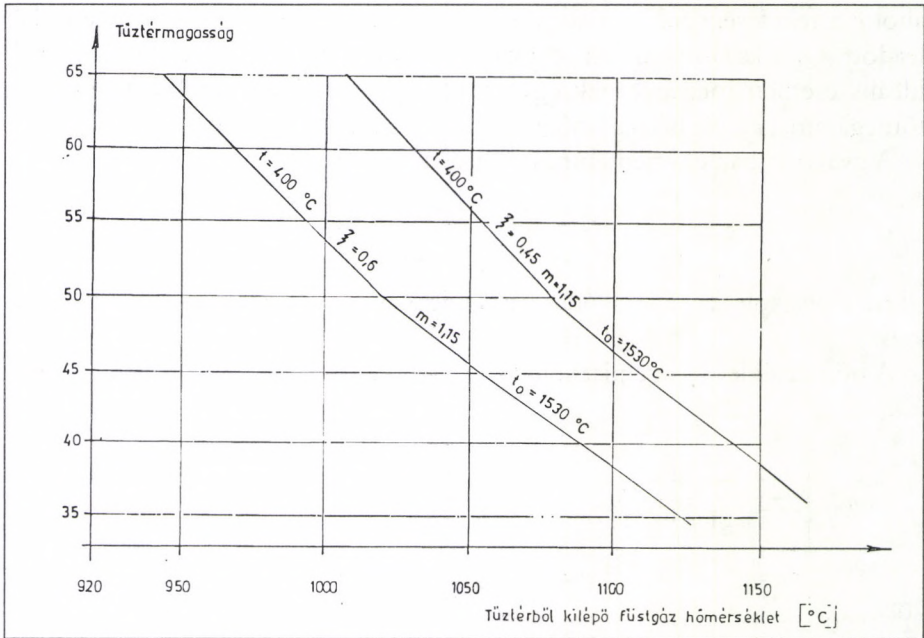
Az elpizskolódás, a lerakódás vastagságának növekedésével ξ értéke csökken.

A hőmérséklet és az elpizskolódás hatását szemlélteti a 7. és 8. ábra.



7. ábra. A maximális láng hőmérséklet a terhelés függvényében és a salak karakterisztikus hőmérsékletei; zsugorodási hőmérséklet (T_a): 850–1100 °C – lágyulási hőmérséklet (T_b): 1150–1300 °C – olvadási hőmérséklet (T_c): 1180–1320 °C – folyási hőmérséklet (T_d): 1190–1350 °C

Az utóbbi évtizedek környezetvédelmi szempontjainak előtérbe kerülése, azonban a minél magasabb hőmérsékleten jó tüzelőanyag–levegő keveredést biztosító tüzelés képletét jelentősen bonyolította, nyugodtan mondhatjuk, 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 szennye-



8. ábra

zők csökkentését befolyásolni. Alapvetően módosítja azonban a tüzelés korábbi szempontjait a gáznemű szennyezők (nevezetesen a kén-oxidok és nitrogén-oxidok) csökkentésének, ill. behatárolásának igénye. A tüzelőanyag kéntartalma régi problémája az energetikának. A tüzelőanyagból a füstgázba kerülő kén-oxidok leválasztására igen nagyszámú eljárást dolgoztak ki. Széles körben azonban a mészkő adalékanyaggal történő leválasztás nyert alkalmazást.

Az adalékanyagokkal történő kéntelenítési módszerek lényege az, hogy porított, bázikus hatású anyagokat fúvatnak ki, amelyek az égés során képződött savanyú kén-oxidokat többé-kevésbé megkötik.

Kezdetben, miután a mészkő adalékok nagyobb mértékben kötik meg a SO_3 -ot, mint a SO_2 -ot, és a SO_2 - SO_3 -konvenzió aránya az olajtüzeléseknél lényegesen nagyobb, mint a széntüzeléseknél, érthető, hogy ezeket a módszereket elsősorban olajtüzelésű kazánoknál alkalmazták.

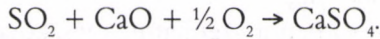
A későbbiekben kiderült, hogy ezek a megoldások más tüzelőanyagoknál is alkalmazhatók.

Az eljárás elve igen egyszerű. Ismeretes, hogy a természetes mészkő alkalmazása esetén két fő reakció zajlik le. A befűvott kalcium-karbonát kb. $700\text{--}900\text{ °C}$ hőmérsékleten gyorsan kalcium-oxidra és szén-dioxidra bomlik:

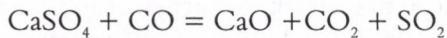


Ez az ún. kalcinálás a legfontosabb alapfeltétel mészkőadagolás esetén, mert a kéntelenítés gyakorlatilag csak ebben az aktivált állapotban lehetséges.

A kéntelenítési reakció, amely 800–1000 °C hőmérsékleti tartományban igen gyorsan zajlik le, az alábbi egyenlettel fejezhető ki:



Magas hőmérsékleten, redukáló környezetben



A fenti 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 pernyeválasztó előtt van elhelyezve, a füstgázhőmérséklet ezen a helyen 200 °C alatt van. A végtermék kalcium-szulfid, 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 mészkőrlemény finomsága,
- a befúvásnál lévő hőmérséklet,
- a tüztéri hőmérséklet-eloszlás,
- a tüzelőanyag kéntartalma.

Az adalékanyagos kéntelenítés szempontjából korszerű módszernek tekinthető a fluidizációs tüzelés. Ennek alapja az, hogy a megfelelő szemnyagúságra 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 konventív fűtőfelületekkel lehet elérni.

A fluidizációnak előnye a kénmegkötési lehetőség. A megfelelő fluidágmagasság tartása érdekében esetleg inert, nem éghető anyagokat is elhelyeznek. Ez az inert anyag lehet pl. mészkő vagy dolomit, amikor is a szén éghető-kén-tartalma felszabadulva mindjárt meg is kötődik az adalékanyagban.

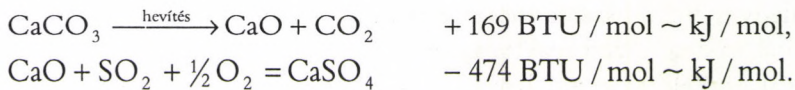
A fluidizációs tüzelésnél tehát a tüzelőanyagból felszabaduló SO₂, ill. SO₃ szulfátok formájában kötődik meg (túlnyomó részben CaSO₄, továbbá

MgSO₄, Na₂SO₄ stb.). Primeren keletkeznek szulfitok is (pl. CaSO₃, MgSO₃ 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:



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.

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 kénlekötése 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 tűztér-hőmérsékleten a kalcinálódási folyamat eredményeként túlégetett mész keletkezik,
- magas tűztérhőmérsékleten a CaSO₄ visszaalakulása lép fel,

- a keletkezett CO₂ 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.

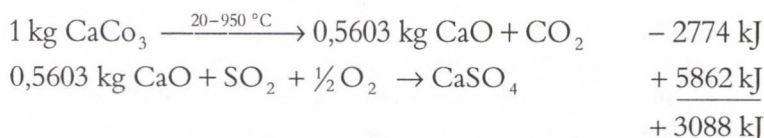
A szükséges adalékanyag-mennyiség függvényében az adalékolási paradoxon egyes elemei különböző súllyal esnek latba.

Az adalékanyag a tüzelőanyag hamutartalmához hasonlóan fejt ki kedvezőtlen hatását mind a gyulladásra, mind pedig az égésre. A nagyobb kéntartalmú szeneknél a mészkőigény jelentős, a hamu mennyiségével összemérhető értékű elhet. Példaként 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

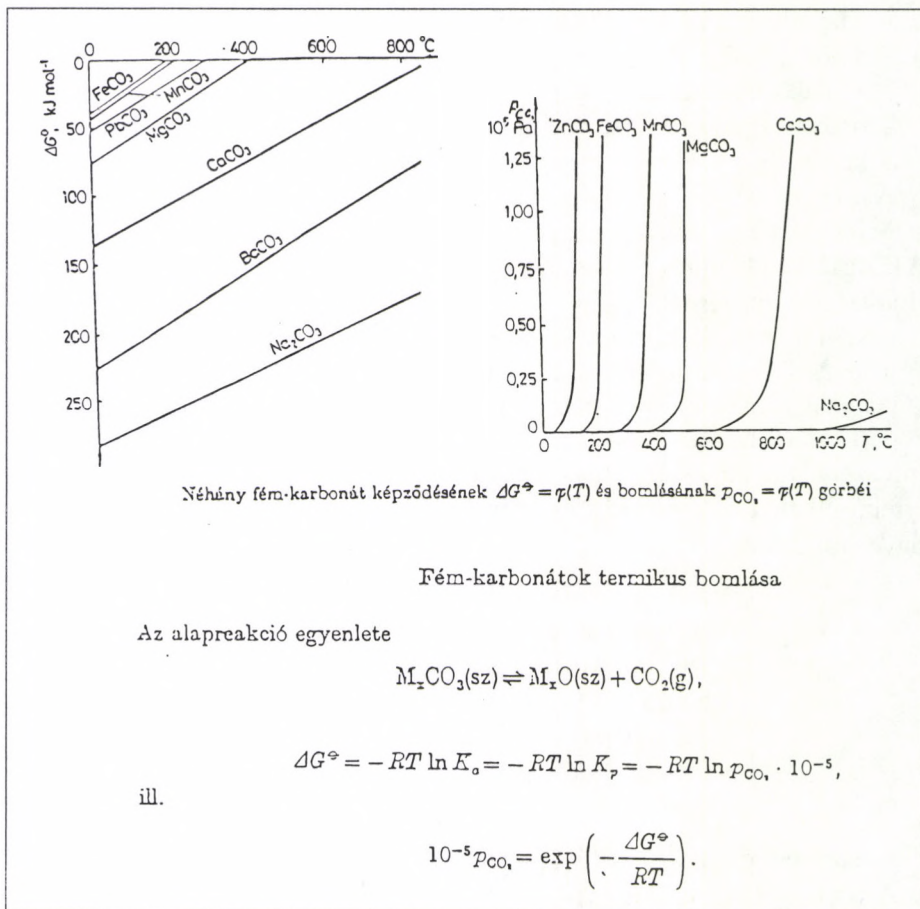
A hamutartalom növekedése meghaladja az eredeti 50%-át.

A kénlekötés kémiai reakciója endoterm és exoterm reakciókból áll. A felmelegítés és hőbomlás hőigénye



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 kénoxidokat. Ezzel a füstgáz harmatpontja

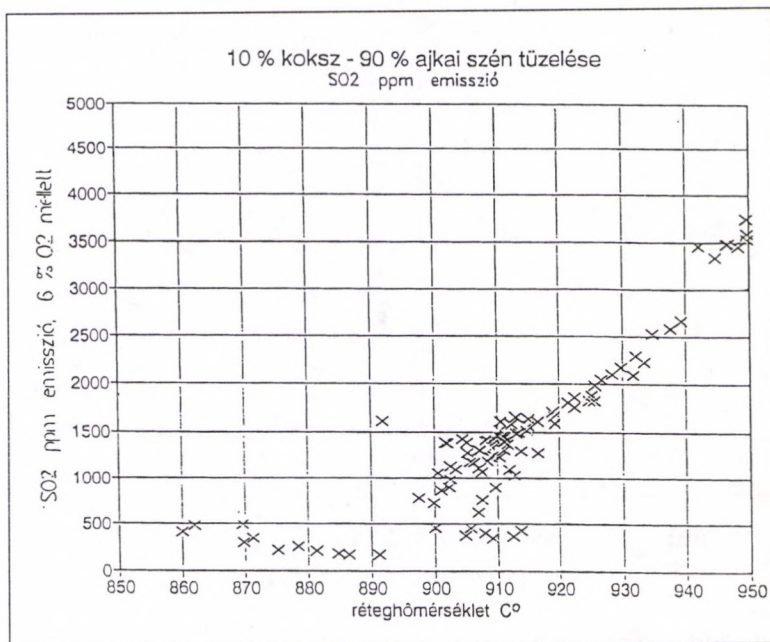


9. ábra

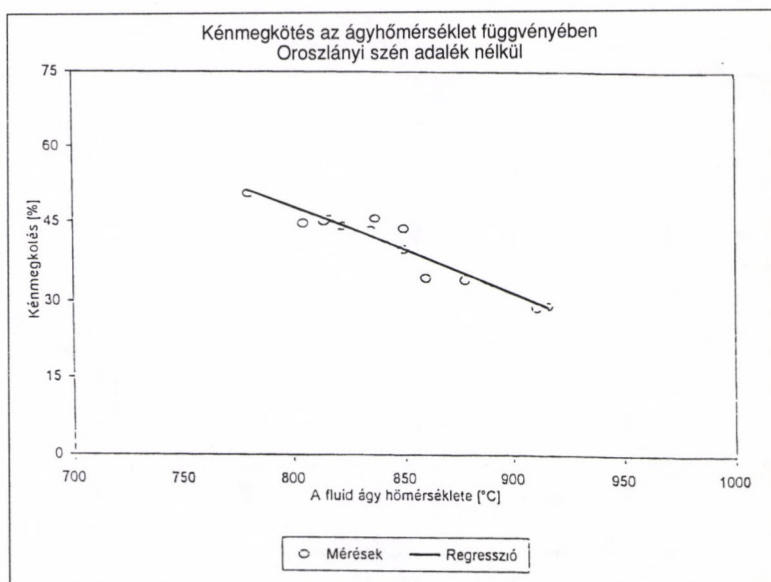
lecsökken, közel a vízhatmatponthoz, így lényegesen csökkenthető a távozó füstgáz-hőmérséklet és ezzel a füstgázveszteség is. Ez elérhető különleges, korrózióálló fűtőfelületek beépítése nélkül.

Problémát jelent azonban az, hogy a hatásos kénleválasztáshoz a kalcinálódás hőmérsékletét nagyon gondosan kell megválasztani. A 700–850 °C közötti hőmérséklet a legkedvezőbb a folyamat hatékonysága szempontjából. Ezt a fizika-kémiai hőbomlási függvények igazolják (9., 10., 11. ábra). Ugyancsak káros a magas tűztéri hőmérséklet a CaSO_4 stabilitására. A lekötött kén-dioxid a gipszből Ca keletkezése mellett ismét felszabadulhat.

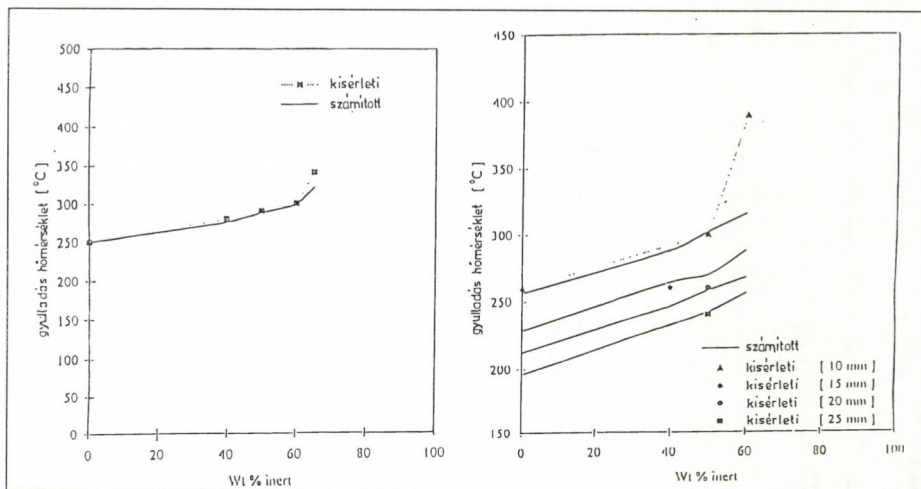




10. ábra

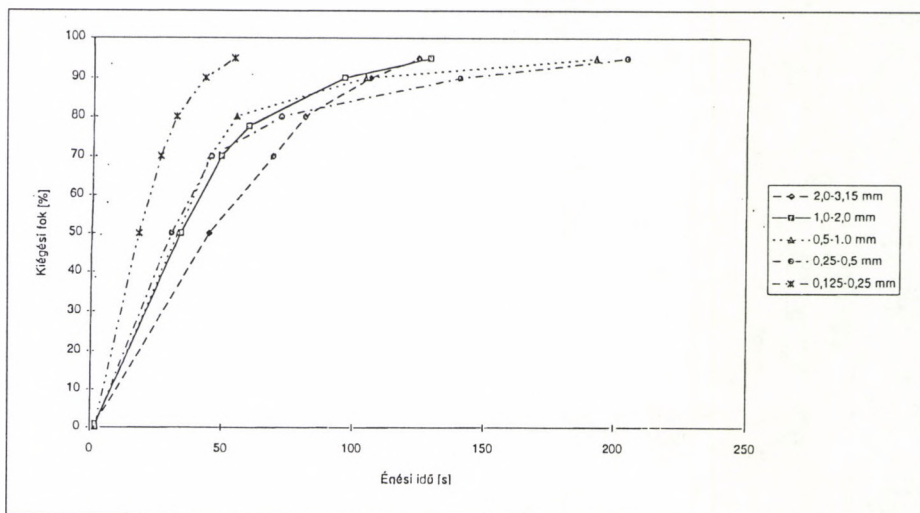


11. ábra



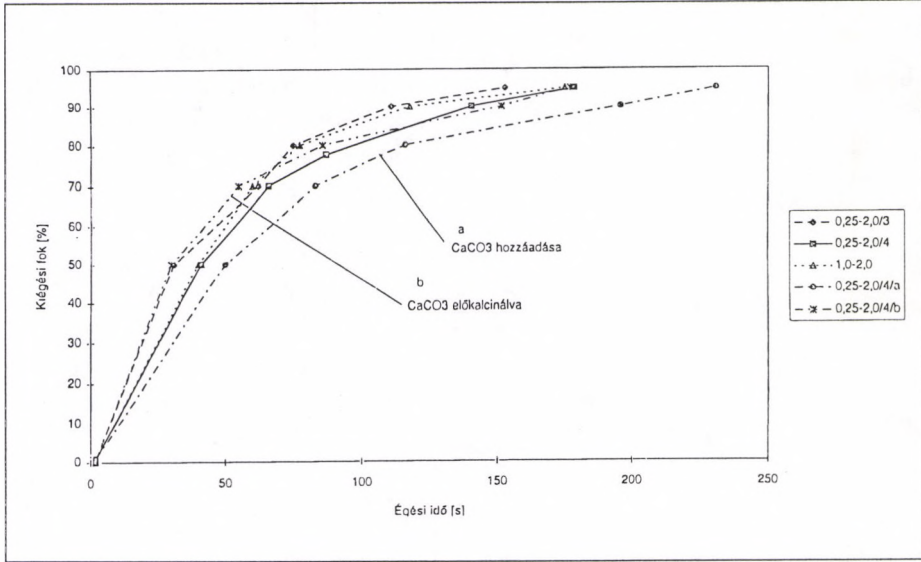
12. ábra. Szénporréteg gyulladási hőmérséklete dolomit-hozzáadással (szénfajta: Prince, USA)

Az adalékanyag mennyisége növeli a gyulladás hőmérsékletét (12. ábra). Érdekes új eleme az adalékolási paradoxonnak a szénből, ill. a mészkő kalcinálásból keletkezett CO_2 kölcsönhatása. A szénből keletkezett CO_2 rontja a

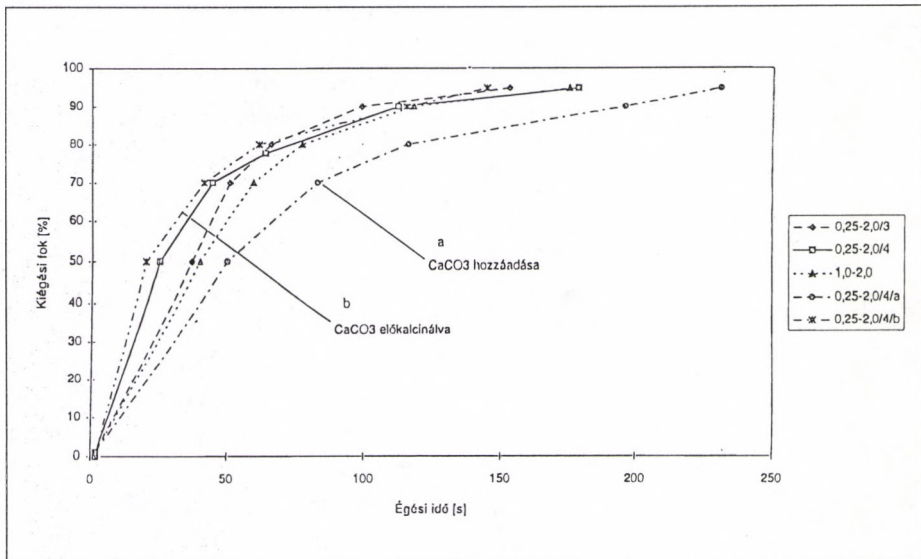


13. ábra. Az égési időtől függő kiegészítés (CO_2 -keletkezésből) monodiszperz szénhalmazoknál (oroszlányi szén)

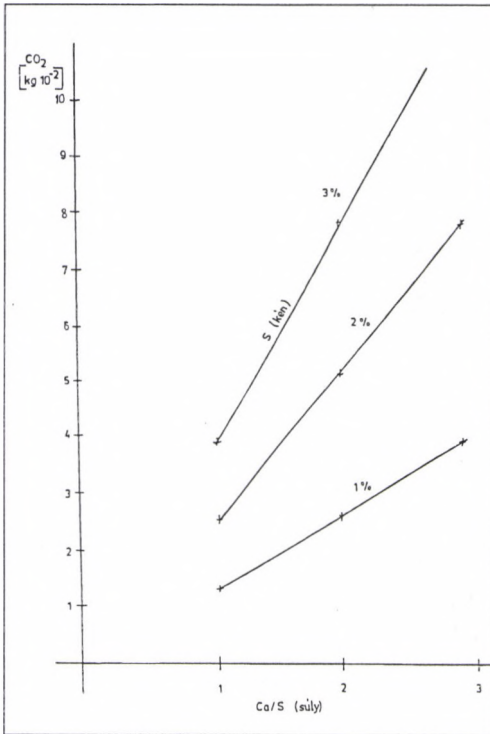
Paradoxonok a tüzeléstechnikában



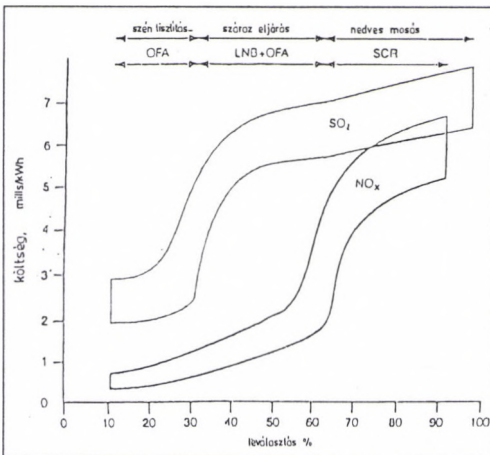
14. ábra. Az égési időtől függő kiegészés (O_2 -fogyásból) mono- és polidiszperz szénhalmazoknál (oroszlányi szén)



15. ábra. Az égési időtől függő kiegészés (CO_2 -keletkezésből) mono- és polidiszperz szénhalmazoknál (oroszlányi szén)



16. ábra



17. ábra. Az SO₂- és NO_x-leválasztás hatása a villamosenergia-költségekre

kalcinálódási folyamatot, míg a kalcinálódás során keletkezett CO₂ rontja az égési folyamatot. E kölcsönhatás jelentős tüzelés-technikai hátránya a tüzelés során végzett kénlekötésnek (13., 14., 15. ábra).

A kalcinálódásból keletkezett CO₂ többlet CO₂-t okoz (16. ábra).

A szennyezések csökkentése növeli a villamosenergia-költségeket (17. ábra).

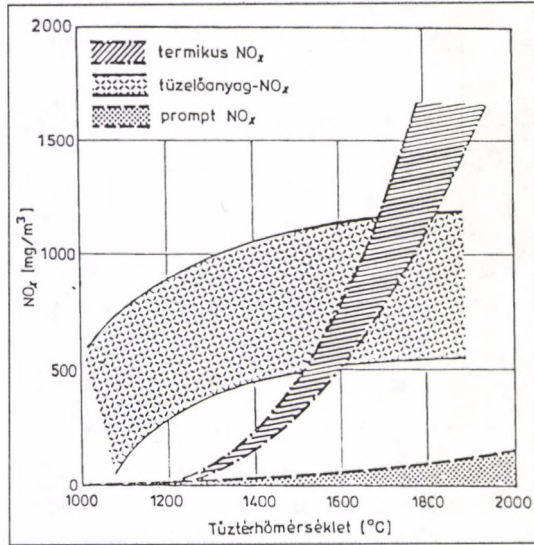
A keveredési folyamat paradoxona

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, mivel ez esetben a káros szennyezőanyagok keletkezésére is tekintettel kell lenni. Az oxigén intenzív keveredése a tüzelőanyaggal a különböző paramétereken keresztül (hőmérséklet, gáz és szilárd anyag koncentrációk stb.) leginkább a nitrogén-oxidok mennyiségét befolyásolja. E hatás is azonban több ellentmondást tartalmaz.

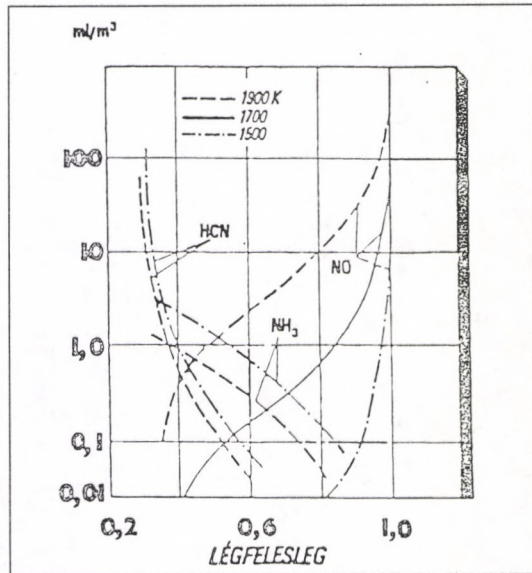
A konvencionális szénportüzelelésnél megfigyelték, hogy a szénporörlemény finomodásával a keletkezett nitrogén-oxidok mennyisége csökken.

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 (18., 19., 20., 21. ábra).

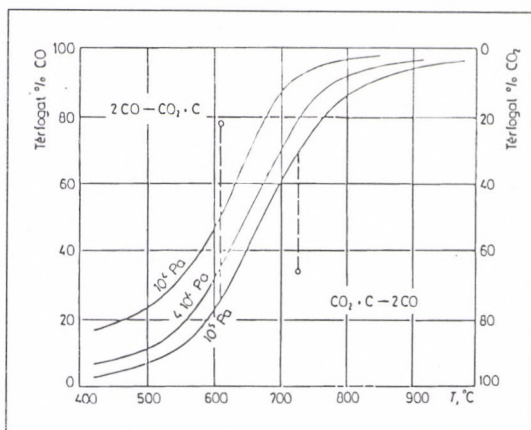
A finomabb szénporőrleménynél magasabb tüztérhőmérséklet keletkezik, de mégis alacsonyabb az NO_x mennyisége (22. ábra). Ezen ellentmondás magyarázatát a heterogén reakció folytán a tüzelőanyag-szemcse környezetében kialakult viszonyokban kell keresni. A léghiányos tüzelés a tüzelőanyag nitrogénből keletkező NO_x mennyiségét csökkenti. A szemcse és az égési levegő keveredése feltehetően a finomabb szén szemcse 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



18. ábra. A termikus, a tüzelőanyag- és prompt nitrogén-oxidok mennyiségének függése a hőmérséklettől



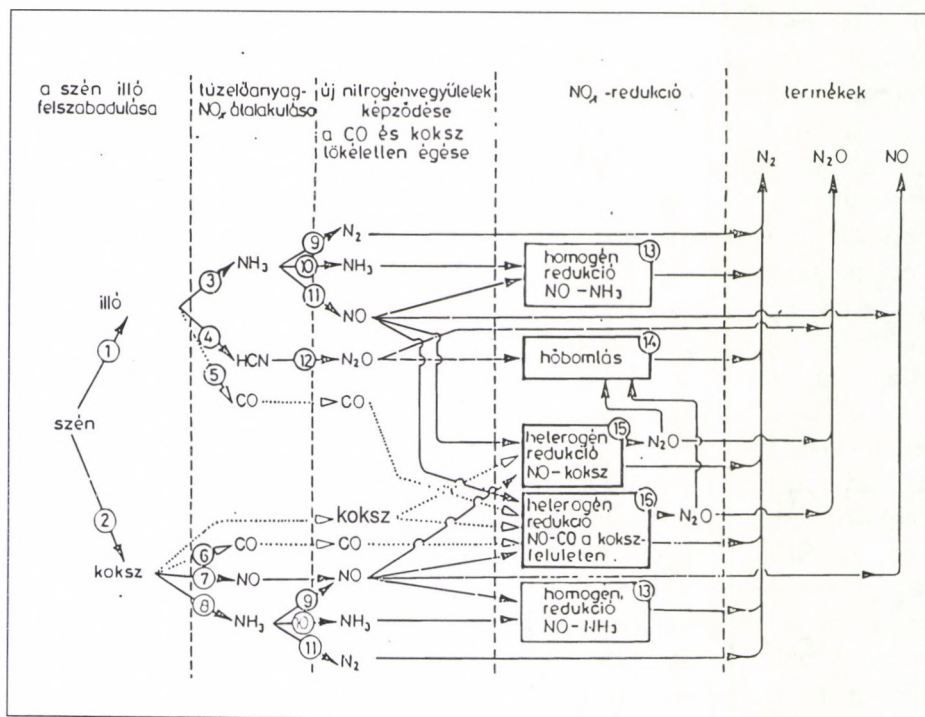
19. ábra. A légfelésleg-tényező változásakor keletkező fontosabb vegyületek



20. ábra. A generátorgáz (Boudouard)-egyensúly összetétel-hőmérséklet görbéje különböző nyomásokon

eljárással elsősorban a tüzelőanyag NO_x keletkezését tudjuk megakadályozni. E keveredédirányítás azonban több ellentmondást is okoz, eltekintve a hőmérséklet-csökkenés miatt reakció sebességcsökkenéstől és a tüztéri hőleadás fajlagos csökkenésétől.

A sztöchiometrikus oxigén-tüzelőanyag arány alatti érték mellett tökéletlen égés megy végbe és jelentős CO keletkezik, amelynek későbbi eltüzeléséről gondoskodni kell, mivel ez egyrészt hővesz-



21. ábra. A nitrogén-oxid keletkezésének folyamatábrája

teséget, másrészt egy másik kellemetlen környezetszennyezést okozna (23. ábra). 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 formában lekötött SO_2 visszaalakulását is okozhatja.

Az NO_x csökkentésével tehát a tüzelés más paramétereinek romlása léphet fel.

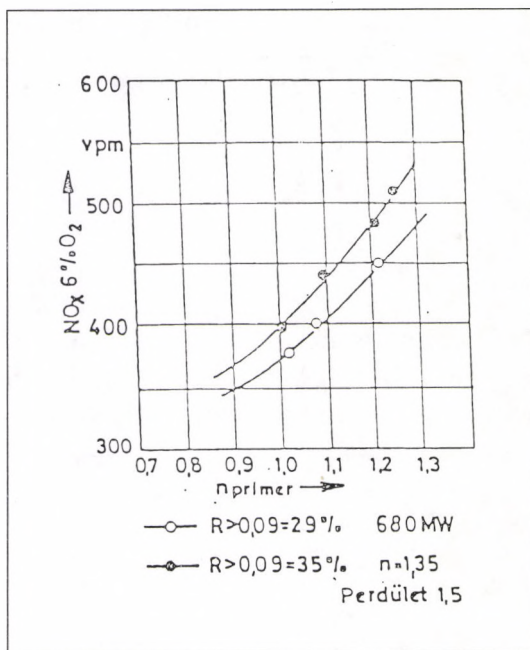
Globális paradoxon

A tüzeléstechnika fejlesztése bizonyos mértékben okozhat problémát a környezet globális szennyezésének területén is.

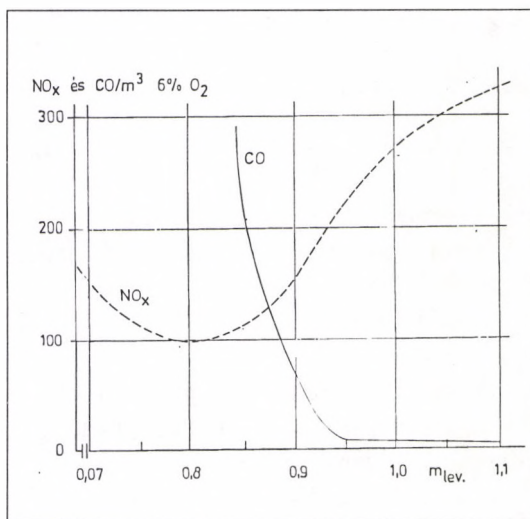
A légkör összetételének alakulásában jelentős szerepe van az emberi tevékenységnek, így az energetikának is. Különösen néhány gáz befolyásolja jelentősen az energiaáramlást (24. ábra), és ezeket gyújtónévvel üvegházhatású gázoknak nevezték el.

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 (CFCS).



22. ábra. A kiörlési finomság hatása szénportüzeléskor az NO_x -képződésre



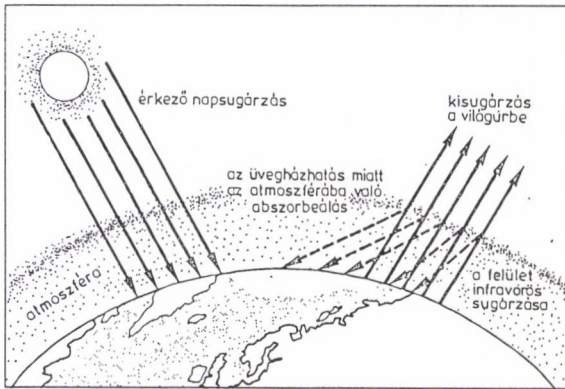
23. ábra

Ha a hatásukat egymással összevetjük, akkor a következő értékeket találjuk.

Üvegházhatású gáz	Tényező
Szén-dioxid	1
Metán	27
Nitrogén-oxid(N ₂ O)	165
Freon-12	17 700

A CO₂-ra az energetikával legszorosabb kapcsolatban lévő gáztermék, de a N₂O szerepe is növekszik.

Az új technológia önmagában is hozhat ellentmondást. Míg a szénportüzelésnél N₂O-képződéssel nem kellett számolni, az új szennyezőanyag a cirkulációs fluidizációs tüzelésnél



a tüzelőanyag nitrogénjéből a viszonylag alacsony hőmérsékleten és redukáló körülmények között képződni képes. E gáz üvegházhatását jellemző indexe a CO₂-nek kb. 165-szerese. E fejlesztési ellentmondást a technológia megválasztásával (másodlagos hőfelszabadítás) részben fel lehet oldani.

24. ábra. A Föld és a világűr sugárzási viszonyai

A keletkezett CO₂ mennyiségének csökkentésére a következő legfontosabb lehetőséget állnak rendelkezésre:

- energiahordozó megválasztása,
- az energiatermelés és -fogyasztás hatékonyságának növelése,
- a CO₂ lekötése,
- a CO₂ letárolása.

Az energiahordozó megválasztása technikailag és gazdaságilag jelentősen korlátozott lehetőség (25. ábra). E korlátok mellett egyéb szempontok is jelentős szerepet játszanak, mint pl. 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,

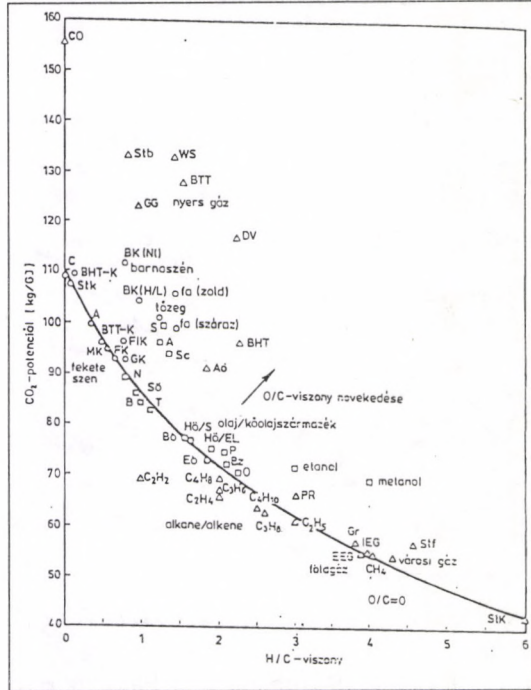
- IGCC + CO₂, integrált elgázosító kombinált ciklus,
- O₂/CO₂-tüzelés (szénpor, cirkulációs fluid, nyomás alatti fluid)
- „topping ciklus”,
- tüzelőanyag-cella (fuel cells)
- magnetohidrodinamikus folyamat.

b) A CO₂-leválasztásban:

- kémiai eljárás,
- fizikai eljárás,
- nyomásos adszorpció,
- membrános eljárás,
- kriogénteknika.

c) A CO₂-tárolásban:

- geológiai: felhagyott bányák, víztároló,
- mélyóceáni elhelyezés,
- biokémiai konverzió.



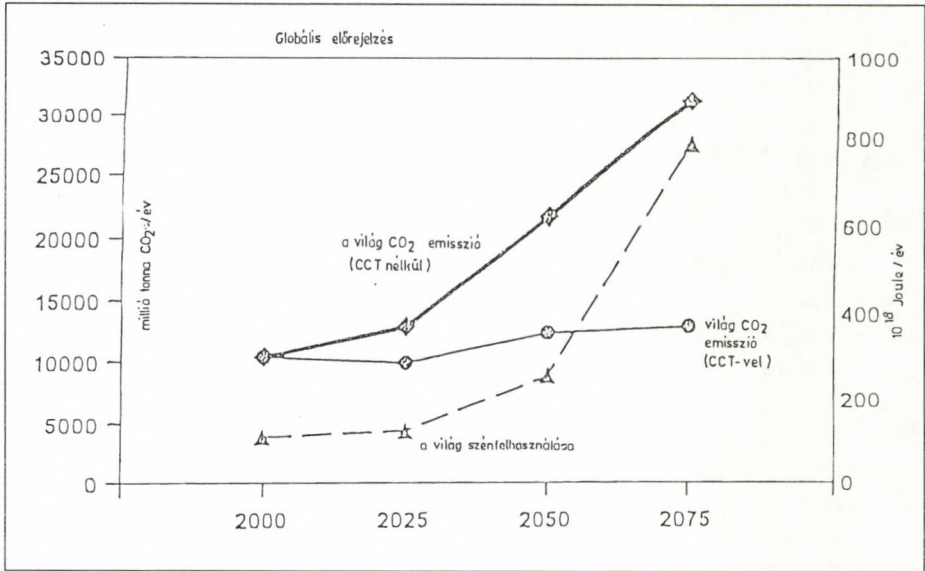
25. ábra. Az energiahordozók mint potenciális CO₂-források

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 konvencionális erőmű szokásos gőzfejlesztővel és gőzturbinával, nyomás alatti fluidizációs tüzeléssel megvalósított gáz-gőz körfolyamat.

A kombinált gáz-gőz ciklussal a következő előnyök érhető el:

- magas hatásfok és a tüzelőanyag lehető legjobb kihasználása,
- széles tartományban változó szénminőséget lehet hasznosítani,
- a környezetszennyezés mértékét lényegesen csökkenteni lehet,
- a vízigény és vízvesztés 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, amely a tisztítás után



26. ábra. Az üvegházhatás csökkenését segítő „tiszta szén” technológiai hatása

közvetlen a gázturbinára vezethető. A tiszta szén technológiákkal elérhető hatást mutatja a 26. ábra.

A szénelgázosítás legfontosabb reakciói:

Reakció:	Reakcióhő/DH [kJ/mol]
$C + H_2O = CO + H_2$ (vízgáz)	+135,1
$C + 2 H_2O = CO_2 + 2 H_2$	+96,2
$C + CO_2 = 2 CO$ (Boudouard)	+173,2
<i>Égési reakciók:</i>	
$C + \frac{1}{2} O_2 = CO$	-110,5
$C + O_2 = CO_2$	-393,7
<i>CO-konverzió:</i>	
$CO + H_2O = CO_2 + H_2$	-38,5
<i>Metánképződés:</i>	
$CO + 3 H_2 = CH_4 + H_2O$	-217,6
$C + 2 H_2 = CH_4$	-87,4

Az elgázosításkor keletkező gáz főbb éghető elemei a CO, H₂ és CH_x. 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 -kibocsátás növekedés csökkentése csak különleges intézkedésekkel valósítható meg. A gázturbina belépőhőmérséklet növekedése jelenlegi anyagtechnológia mellett 1400–1500 °C értékre, a termikus NO_x -képződés veszélyét rejti magában.

A szénelgázosítás során, különösen fluidizációs technika esetén a kémiai kénisztisztás előtt adalékanyagos, leginkább mészkő adalékos kénlekötést alkalmaznak. Ez a CO_2 -fejlődéssel hozzájárul a globális környezetszennyezéshez.

A fejlett technológiák alkalmazása azonban jelentős költséggel jár. Ezek összevetését mutatja az 5. táblázat.

5. táblázat

Fejlett energiafejlesztő technológiák költségei és hatékonysága

Technológia	Fajlagos beruházási költség \$/kW	Lehetséges emissziócsökkentés			Hatásfok %
		SO_2	NO_x	CO_2	
Szénporttüzelés emissziócsökkentés nélkül	1025	–	–	–	37,5
Szénporttüzelés emissziócsökkentéssel	900–1100	90–98	60	–	35–38 (36,3)
Atmoszférikus fluidtüzelés	900–1100	90	60	5	38–40
Nyomás alatti fluidtüzelés	1200–1500	90–95	80	30	40–42
IGCC (zöldmezős)	1000–1400	95–99	90	20–40	39–49
IGCC (retrofit)	850–1250	95–99	90	20–28	38–42
Kombinált – ciklus földgázra	725				47,5

Irodalom

- Reményi K.: *Új technológiák az energetikában*. Bp., Akadémiai Kiadó, 1995.
- Berecz E.: *Fizikai Kémia*. Bp., Tankönyvkiadó, 1991.
- Coal in Asia. *Pacific*, 1998. Feb. 1998. Mar.
- Prabprakar, D. et al.: Effect of Inerts On Layer Ignition Temperatures of Coal Dust. *Comb. and Flame*, 1998. 53.
- Balogh L.-né–Reményi K.: *A fluidizációs tüzelés és a magyar HibridFluid tüzelés továbbfejlesztése*. Budapest, OMFB, 1996–1998.
- Bérczi P.-né, et al.: *Környezetkímélő széntüzelés az Ajkai Hőerőműben*. Budapest, VEIKI Közlemények, 1992.
- Magyar Villamos Művek Közleményei, 1997/3.
- Vörös F.–Kertész V.–Reményi K.: *Coal-Particle Burning*. 11th Conf. on I. C. engines and Combustion. India, Madras, 1998.