



AZ ENERGETIKA ÚJABB EREDMÉNYEI

MŰSZAKI TUDOMÁNYOK

REMÉNYI KÁROLY

ÚJ TECHNOLÓGIÁK
AZ ENERGETIKÁBAN

AKADÉMIAI KIADÓ · BUDAPEST

MŰSZAKI TUDOMÁNYOK
AZ ENERGETIKA ÚJABB EREDMÉNYEI

3. KÖTET

TECHNOLÓGIÁK

AZ ENERGETIKÁBAN

RADONNYI LÁSZLO

TECHNOLÓGIÁK

KÖZÖRDŐZÖK

LEVAL ANDRÁS

RADONNYI LÁSZLO

BÉDE GÁBOR

BÜKI GERGEY

CEOM GYULA

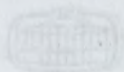
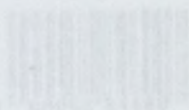
HALJL JÓZSEF

JÁROSZ MARTON

JÁSZAY TAMÁS

REMENYI KÁROLY

VALDA GYÖRGY



AKADÉMIAI KIADÓ BUDAPEST

MŰSZAKI TUDOMÁNYOK AZ ENERGETIKA ÚJABB EREDMÉNYEI

3. KÖTET

SZERKESZTI

RÁDONYI LÁSZLÓ

A SZERKESZTŐBIZOTTSÁG

elnöke: LÉVAI ANDRÁS
titkára: RÁDONYI LÁSZLÓ
tagjai: BEDE GÁBOR
BÜKI GERGELY
CSOM GYULA
HALZL JÓZSEF
JÁROSI MÁRTON
JÁSZAY TAMÁS
REMÉNYI KÁROLY
VAJDA GYÖRGY



AKADÉMIAI KIADÓ · BUDAPEST

111 907

REMÉNYI KÁROLY

ÚJ TECHNOLÓGIÁK AZ ENERGETIKÁBAN

KÜLÖNÖS TEKINTETTEL
A FOSSZILIS ENERGIAHORDOZÓK
KÖRNYEZETBARÁT HASZNOSÍTÁSÁRA

MTAK



AKADÉMIAI KIADÓ · BUDAPEST

Megjelent a Magyar Tudományos Akadémia támogatásával

508662

ÚJ TECHNOLÓGIÁK AZ ENERGETIKÁBAN

RÁDONYI LÁSZLÓ

MAGYAR

TUDOMÁNYOS AKADÉMIA

KÖNYVTÁRA

A FOSZTUS ENERGIÁRÓL
KÖRNYEZETBARTARTÁSI ÉS
KÖRNYEZETBARTARTÁSI

BEDE GÁBOR

BÓDI GERGELY

CSOM GYULA

HALZL JÓZSEF

JÁRÓSI MÁRTON

JÁSZAY TAMÁS

REMÉNYI KÁROLY

VAJDA GYÖRGY

ISBN 9630568470

Kiadja az Akadémiai Kiadó

1117 Budapest, Prielle Kornélia u. 19-35.

Első magyar nyelvű kiadás: 1995

© Reményi Károly, 1995

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

M. TUD. AKADÉMIA KÖNYVTÁRA

Könyvteltár 302.../19 36... SZ.

ELŐSZÓ

Az energiafejlesztési technológiák fejlesztése világszerte az alaptudományokkal, elsősorban a fizika, a kémia és a matematika fejlődésével szoros kölcsönhatásban történik. Az alaptudományok eredményei és módszerei mind gyorsabban és mind mélyebben hatolnak be az energetika gyakorlatába. Az energetikai folyamatokat befolyásoló legfontosabb feltételek mélyebb megismerése, az általános törvényszerűségek újabb részleteinek felderítése lehetőséget teremt a folyamatok befolyásolására, gazdaságosabb és a környezetet kevésbé szennyező technológiák kidolgozására és megvalósítására. Természetesen az új technológiák alkalmazásukat tekintve lényegesen különböző állapotban vannak. Megvalósításukat az össz-gazdaságosság határozza meg, azaz a jelenlegi technikai színvonalon jelentkező költségek a legjobb technológiák elterjedését is gátolhatják.

Mindezen általános megállapítások mellett az utóbbi évtizedekben mind a konvencionális technológiák fejlesztése, mind az új technológiák megjelenése az energetikában igen erőteljes volt. A környezetszennyezés-csökkentés alapvetően meghatározó igényének előtérbe kerülésével nem csökkent a minél gazdaságosabb energiahordozó-hasznosítás jelentősége, mivel ez utóbbi az előbbit is közvetlenül kedvezően befolyásolja. Az energetikában az új technológiák bevezetésének különösen a fosszilis energiahordozók felhasználásánál és ezek közül is a széntüzelésű erőműveknél van a legnagyobb jelentősége. Elterjedésük világszerte igen erőteljes, bár sajnálatos módon Magyarországon a könyv megjelenésének idősza-

kában még csak csíráit találjuk, illetve tanulmányozásuk van folyamatban. Jelen könyv ennek megfelelően is súlyozza a különböző témák tárgyalását.

A különböző témák tárgyalásakor az alapvető lehetőségeknél mindig három jelentősebb csoport fedezhető fel, bár a formai tagozódás helyesen témák szerint történik. A három csoport:

- üzemviteli lehetőségek,
- konstrukciós megoldások,
- a káros szennyezőanyagok leválasztása.

E könyvnek nem célja különösen mély elméleti részletek közlése, de fel kell figyelni a korábbi tüzeléstechnikai szempontok alapjaiban történő változás szükségességének tárgyalására. A mélyebb égéselméleti és tüzeléstechnikai ismeretek a gyulladási feltételek és a tűzvezetés (tüzelőanyag-előkészítés, tüzelőanyag-gazdálkodás, levegő-előmelegítés és -adagolás stb.) korábbi előírásait gyökeresen megváltoztatták. A környezetet szennyező égéstermék (elsősorban a SO_x , N_xO_x , CO stb.) csökkentése teljesen új, a korábbi elvekkel gyakorta ellentétes üzemvitelt, konstrukciót igényel. A konvencionális szénportüzeléseknél a többfokozatú levegő- és tüzelőanyag-adagolás, az új technológiák közül az erőteljesen terjedő fluidizációs tüzelés kedvező lehetőséget nyújt például a nitrogén-oxidok csökkentésére. Külön figyelemre méltó, hogy a fluidizációs tüzelés terén jelentős magyar szabadalom, ún. hibridfluid tüzelési eljárás is született, amely — megelőzve más eljárásokat — a kellemetlen, magas hőmérsékletű, elégtelent leválasztó ciklont is elkerüli, továbbá nagy teljesítményre építhető. Külön előnye az egyéb fluidizációs tüzelésekhez képest a N_2O -képződés szempontjából is kedvező technológia.

A különféle megoldások ismertetésénél a szerző külön figyelmet fordít arra, hogy az új technológiáknak igen gyenge minőségű szenekre is alkalmasaknak kell lenniük, mivel Magyarországon az energetikában kizárólag ilyent használnak, s világszerte egyre nagyobb mértékben kerülnek hasznosításra nagy hamu- és nedves-ségtartalmú szenek. A magyar szenek mindkét összetevőt jelentős mennyiségben tartalmazzák.

Figyelemre méltó, hogy a jelen, a közelebbi és a távolabbi jövő számba jöhető technológiáiról súlyuknak megfelelő képet ad. A jelen a konvencionális szénportüzetések fejlett változatai, a fluidizációs tüzelés, a kén- és nitrogén-oxidok leválasztása, a szénhidrogénre alapozott gáz-gőz körfolyamat különböző változatai, a távolabbi jövő a kombinált ciklusú tüzelőanyag-cellás körfolyamat és a CO_2 leválasztása.

A lokális környezetszennyezés mellett a könyv érinti a globális környezetszennyezés kérdéseit is. A mű megírásakor a szerző hasznosította közel négy évtizedes gyakorlati tapasztalatait, ezek a témák tárgyalása mellett a témák kiválasztásában és súlyozásában voltak segítségére. Sem a hazai, sem a nemzetközi irodalomban ilyen átfogó, de tömör mű nem áll rendelkezésre. A tárgyalt témák részben ipari mértékben, részben kísérleti léptékben megvalósított eljárások. A szerző olyanokat választott ki, amelyeket, bár Magyarországon csak részben és igen kis mértékben valósítottak meg vagy lehetett tanulmányozni, külföldi útja során volt alkalma megismerni és tanulmányozni.

Dr. Zettner Tamás
egyetemi tanár

a műszaki tudományok doktora

TARTALOM

1.	A konvencionális tüzelések fejlesztésének elméleti alapjai	15
1.1.	Az anyagkeverékek őrlési elméletének továbbfejlesztése	15
1.2.	A különféle tüzelőanyagok égésmechanizmusának főbb vonásai	20
1.2.1.	A gáz égése	24
1.2.2.	Az olaj égése	27
1.2.3.	A szén égése	30
1.3.	Az impulzusholográfia alkalmazása égésfolyamatok értékelésére	33
1.4.	A szén szemcse és különböző lángelemek égésének hullámjelenségei	38
	Irodalom az 1. fejezethez	49
2.	Széntüzelések	51
2.1.	Szénportüzelési rendszerek és a szénporégők fejlesztése	52
2.1.1.	Zárt ciklusú tüzelés	55
2.1.2.	Nyílt ciklusú tüzelés	57
2.2.	Tüzeléstechnikai fejlesztések a Mátrai Erőműben	57
2.2.1.	Félig nyílt ciklusú tüzelés a Gagarin Hőerőműben	62
2.3.	Szénporindító és támasztótüzelések	67
2.3.1.	Elméleti alapok, tüzelési megfontolások	69
2.3.2.	A szeparátoros örvényégő elvi kialakítása	74
2.3.3.	A szeparátoros örvényégő alkalmazása lignittüzelésű gőzkazán indításához	75

2.3.4.	Támasztótüzelés kialakítása szeparátoros örvényégővel a Tatabányai I. Hőerőműben	78
2.4.	Szemponatok a szénportüzelésű kazánok határfűtőértékének megállapításához	79
2.4.1.	A szénminőség szerepe	79
2.4.2.	A kopás és következményei	80
2.4.3.	Segédberendezések, szabályozás	81
2.4.4.	A tüzelés stabilitása	82
2.4.5.	Gazdaságossági korlátok	83
	Irodalom a 2. fejezethez	84
3.	Fluidizációs tüzelés	86
3.1.	Áramlástechnikai alapok	86
3.2.	A szénszemcse égése a fluidizált rétegben	96
3.3.	A fluidréteg számítása	106
3.4.	A fluidtüzelésű kazán indítása és leállítása	108
3.5.	Üzemi berendezések	116
3.6.	Magyarországi fejlesztések a fluidizációs technikában	125
3.6.1.	Üzemi megvalósítás a Tatabányai Hőerőműben	126
3.6.2.	Az Ajkai Hőerőmű kazánjainak átalakítása	128
3.6.3.	Mérési eredmények	134
3.7.	Nyomás alatti fluidtüzelés	135
3.8.	Hamuutóhűtő atmoszferikus fluidizációs berendezésnél	140
3.9.	Fluidtüzelési kísérletek kisberendezésen	141
3.9.1.	Az Ahlsrom 0,6 MW _t Pyroflow kísérleti berendezése	141
3.9.2.	Magyarországi (VEIKI) kísérleti berendezések a fluidizációs technikában	145
	Irodalom a 3. fejezethez	151
4.	Pernyeleválasztás	152
4.1.	Mechanikus leválasztók	152
4.2.	Elektrosztatikus leválasztás	153
4.3.	Szövetszűrők vagy zsákos porleválasztók	156
	Irodalom a 4. fejezethez	158

5. A kénszennyezés csökkentése	159
5.1. A kéntelenítési eljárások csoportosítása	161
5.2. A kén eltávolítása a primer energiahordozókból	161
5.2.1. A szén kéntelenítése	161
5.2.2. Az olaj kéntelenítése	163
5.2.3. A szén cseppfolyósítása	163
5.2.4. A szén elgázosítása	164
5.3. A szénhamu kénlekötése	164
5.4. Kéntelenítés fluidizációs tüzeléssel	170
5.5. Kéntelenítés adalékanyagokkal a tüztérben	175
5.6. Félszáraz mészkőbefűvások eljárások a kénlekötésre	176
5.6.1. NIRO-eljárás	176
5.6.2. Fläkt-eljárás	177
5.6.3. Tampella LIFAC-eljárás	179
5.7. A füstgáz-kéntelenítési eljárások csoportosítása	182
5.8. Száraz eljárások	185
5.8.1. Aktív szén adszorpció	185
5.8.2. Katalitikus oxidáció	187
5.8.3. Réz-oxidos kéntelenítés	188
5.9. Nedves eljárások	188
5.9.1. Meszes/mészköves eljárások	189
5.9.2. Magnézium-oxidos eljárások	195
5.9.3. Eljárások alkalikus szorbensekkel	197
5.9.4. Kettős alkalikus eljárások	199
5.9.5. Ammóniás vizes eljárások	200
5.9.6. Kénsavas abszorpciós eljárások	201
5.9.7. Karbonátolvadékos abszorpció	202
5.9.8. Kéntelenítés harmatpont feletti hőmérsékleten ammóniával	203
5.9.9. Kén-dioxid és nitrogén-oxid egyidejű eltávolítása füstgázokból elektronbesugárzással	203
5.9.10. A szén kéntelenítése gőz-metán keverékkel	204
Irodalom az 5. fejezethez	206

6.	A nitrogén-oxidok keletkezése és a csökkentési lehetőségek	208
6.1.	A nitrogén-oxidok keletkezésének mechanizmusai	208
6.1.1.	A termikus NO_x	209
6.1.2.	A tüzelőanyag- NO_x főbb egyenletei	210
6.1.3.	A prompt NO_x	216
6.2.	A keletkező nitrogén-oxidok mennyiségének csökkentése	216
6.3.	Üzemviteli lehetőségek a NO_x -emisszió csökkentésére	217
6.4.	Konstrukciós lehetőségek a NO_x -emisszió csökkentésére	223
6.4.1.	Saroktüzelés	223
6.4.2.	A tűztérben a többfokozatú égés megvalósítása	223
6.4.3.	Alacsony NO_x -képződésű égőkonstrukciók	230
6.5.	Nitrogén-oxid-leválasztás	235
6.5.1.	Szelektív katalitikus eljárás (SCR)	235
6.5.2.	Nem szelektív katalitikus leválasztás (NSCR)	240
6.5.3.	Szelektív nem katalitikus leválasztás	240
6.5.4.	Nedves eljárások	241
6.5.5.	Kombinált SO_x/NO_x -leválasztás	242
	Irodalom a 6. fejezethez	244
7.	A szén elgázosítása és a gáz-gőz körfolyamatban történő hasznosítása	246
7.1.	Szénelgázosítással létesített kombinált ciklus	250
7.1.1.	Fix réteges elgázosító	255
7.1.2.	Fluidizált réteges elgázosító	256
7.1.3.	Átáramlásos elgázosító rendszer	260
7.1.4.	A "Cool-Water" gáz-gőz erőmű	260
7.1.5.	"Folyékonyvas-fürdős" eljárás	269
7.2.	A gázturbinák fejlődése környezetvédelmi szempontból	269
7.3.	A DeNO_x rendszer alkalmazása kombinált ciklusnál	275
7.4.	Tüzelőanyag-cellák (fuel cells)	279
7.5.	Gázturbinás kombinált erőművek magas hőmérsékletű tüzelőanyag-cellával	282
	Irodalom a 7. fejezethez	285

8.	A klíma változása és az energetika	288
8.1.	A metán, az ózon és a freonok szerepe az üvegház-hatásban	291
8.2.	A CO ₂ hatása az "üvegház"-folyamatban	294
8.3.	A CO ₂ csökkentése	301
8.3.1.	Kombinált erőművek — A "topping ciklus" és az IGCC	302
8.4.	A CO ₂ leválasztása	307
8.5.	A CO ₂ elhelyezése	310
8.6.	A N ₂ O szerepe az üvegházhatásban	311
	Irodalom a 8. fejezethez	311

A technológiai folyamatok részére feldolgozásra kerülő alapanyagok közöttje nem monogén, hanem különböző anyagok keveréke. Rendszerint a nyersanyagok keverékéből adják az őrlőberendezésbe, és együttesen őrlés alatt is a kész őrlmény. Fontos tényező, hogy az őrlmény egyes szemcseméretei szerint frakciók a keverékkel külön részarányban tartalmazhat. A frakciók összetételük tekintetében magán a technológiai folyamatot jelentősen befolyásolják. Fontos példaként említhető a szénporításnál történő szén-őrlés esete. A szénőrléskor meg egyfajta szén csatlakozás is a szénfrakciók függően fontos keverék különböző komponensek együttes előfordulása van. Ha csak pl. a hamuképző elemeket és a szénfrakciókat egy-egy komponensként, vagyis feltételezve a szén őrlésénél a hamuképző elemek jelenlétét (ami szintén meg lehet alkotni) mind nagyobb mértékű feltárás, akkor is már kétféleképpen rendszerrel állunk szembe. Még bonyolultabb a helyzet, amikor különböző szénfrakciók együttes őrlése válik szükségessé. A gyakorlati más területéről is lehet példát felhozni, mint pl. a vegyiparban és a kohászatban a többkomponensű adalékanyagok előkészítése. Vizsgálatunk előzőleg célja a szénkeverékek őrlési folyamatának a feltérképezése volt.

Általában az anyagkeverékek aprítására vonatkozó ismeretek hiánya és elméleti megvalósíthatósága még nem megfelelő. Ha a közzétett adatok alapján feltételezzük, hogy a szénkeverékek aprítására vonatkozó vizsgálatunk fő célja az anyagkeverékek aprítására vonatkozó ismeretek feltérképezése volt.

1. A KONVENCIONÁLIS TÜZELÉSEK FEJLESZTÉSÉNEK ELMÉLETI ALAPJAI

1.1. Az anyagkeverékek őrlési elméletének továbbfejlesztése

A technológiai folyamatok részére feldolgozásra kerülő alapanyagaink többsége nem homogén, hanem különböző anyagok keveréke. Rendszerint a nyersanyagok keverékeit adják az őrlőberendezésbe, és együttesen őrlve alakul ki a kész őrlemény. Fontos kérdés, hogy az őrlemény egyes szemcseméret szerinti frakciói a komponenseket milyen részarányban tartalmazzák. A frakciók összetétele legtöbbször magát a technológiai folyamatot jelentősen befolyásolja. Fontos példaként említhető a szénportüzelésű kazánoknál a szénőrlés esete. A szénőrléskor még egyfajta szén esetében is a szénfajtától függően többé-kevésbé különvált komponensek együttes őrléséről van szó. Ha csak pl. a hamuképző alkatrészeket és a szenet tekintjük egy-egy komponensnek, vagyis feltételezzük a szén őrlésekor a hamuképző elegyrésznek (ami szintén még több alkotóból áll) mind nagyobb mértékű feltárását, akkor is már kétkomponensű rendszerrel állunk szemben. Még bonyolultabb a helyzet, amikor különböző szénfajták együttes őrlése válik szükségessé. A gyakorlat más területéről is lehet példát felhozni, mint pl. a vegyiparban és a kohászatban a többkomponensű adalékanyagok előkészítése. Vizsgálataink elsődleges célja a szénkeverékek őrlési viszonyainak a felderítése volt.

Általában az anyagkeverékek aprítására vonatkozó ismeretek kísérleti és elméleti megalapozottsága még nem megfelelő. Ez a körülmény szükségessé tette, hogy a szénkeverékek aprítási mechanizmus vizsgálatainak megkezdése előtt az anyagkeverékek aprítási folyamatának általánosítható törvényszerűségeit kutassuk.

A fizikai alaptörvény megismerése volt a feladat. Ezt homogén anyagok együttes őrlésével sikerült meghatározni, majd ennek alapján végeztünk kísérleteket különböző szenek keverékével [1]. Feladatul tűztük ki, hogy az egynemű anyagok aprítására ismeretes törvényszerűségek felhasználásával, kísérletek alapján a keverékek őrlésének elméleti alapjait vizsgáljuk. A következő kérdésekkel foglalkoztunk:

- Lehetséges-e zavartalan szuperpozícióval a keverékőrlemények kumulatív eloszlásgörbéinek meghatározása a komponensek eloszlásgörbéi alapján?
- Különböző szilárdságú anyagok keverékének együttőrlésekor a komponensek egymásra hatása milyen módon jut kifejezésre?
- A keverékőrleményben milyen a komponensek szemcseméret-eloszlásának jellege?
- A szemcseméret szerinti frakciók milyen tömegszázalék összetételében tartalmazzák az egyes komponenseket?

Kolmogorov és Rényi tisztán elméleti deduktív úton, valószínűségi számítási alapon kidolgozták a szemcsehalmazok lognormális eloszlásának elméletét. A magyar irodalomban részletes publikációja van e témakörnek [2–5]. E feltételezések alapján levezették a szemcseeloszlás-függvényt és ebből a felület- és súlyeloszlás-függvényeket:

$$N(x) = \Phi\left(\frac{\ln x - \ln a}{b}\right),$$

$$F(x) = \Phi\left(\frac{\ln x - \ln a - ab^2}{b}\right),$$

$$D(x) = 1 - R(x) = \Phi\left(\frac{\ln x - \ln a - 3b^2}{b}\right).$$

Ezeket a függvényeket közös alakra hozták:

$$y = \Phi\left[\ln\left(\frac{x}{d}\right)^m\right],$$

ahol Φ a Gauss-féle hibafüggvény, és a súly-, felület- és szemcse-szám-eloszlás esetén:

$$d_s = a e^{3b^2}, \quad d_f = a e^{2b^2}, \quad d_N = a, \quad m = \frac{1}{b}.$$

A Fáy és Zselev [4, 5] által kidolgozott rendszerben a szemcse-számeloszlás, a felületeloszlás és súlyeloszlás $1/b$ iránytangensű párhuzamos egyenesekkel ábrázolhatók. Az őrlemények valóságos szemcse-szerkezete a lognormális diagramhálón felfelé hajló görbét adott. Ennek viselkedését Békéssy javaslatára egy felső levágással értelmezték. Ezt egy redukciós faktorral vették figyelembe. Ez alapján a valóságos és az elméleti súlyeloszlás közötti kapcsolat:

$$D^*(x) = \frac{D(x)}{D(x_{\max})} = \frac{1}{\lambda} D(x),$$

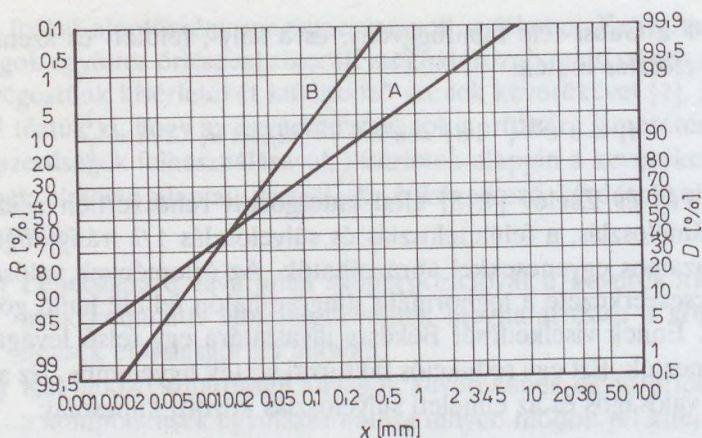
ahol $D^*(x)$ a valóságos súlyeloszlás jelleggörbéje.

A kísérleti vizsgálatok elvégzésének legfontosabb célja a kétkomponensű keverékek őrlési mechanizmusának elemzése volt. Modellanyagként őrlhetőségben egymástól erősen eltérő és egymástól őrleményben jól elkülöníthető mészkövet és kőszót választottunk (a két anyag keménysége közötti különbség nem túl nagy).

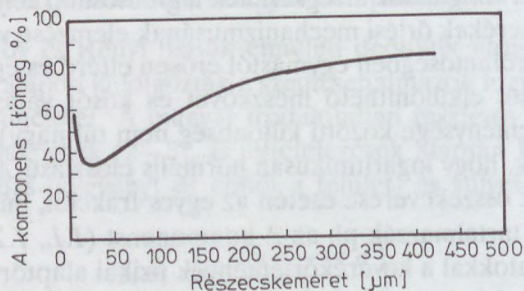
Vizsgáltuk, hogy logaritmikusan normális eloszlású A és B szemcse-halmazok összekeverése esetén az egyes frakciók milyen tömegszázalékban tartalmazzák pl. az A komponenst (1.1., 1.2. ábra).

A vizsgálatokkal a keverékőrlemények fizikai alaptörvényét sikerült megtalálni és igazolni. (A homogén anyagok keverékének őrleményében a komponensek szemcseméreteloszlás-görbéi követik az állandó értékű redukciós tényezővel renormált lognormális eloszlást, illetve a Rosin – Rammler-eloszlást. Ezt kísérletileg igazoltuk. Ennek elméleti magyarázata, hogy az őrlési végtermék összetételét a kiindulási szemcseméret és az őrlőberendezés jellemzőin kívül a valószínűségi változó ("aprítási fok") szemcseméret szerinti függése alapvetően befolyásolja.)

Részletes kísérleteket végeztünk hazai szénkeverékeinkkel is. Egymástól tulajdonságokban távol álló szénfajták keverékeit is vizsgáltuk. A hazai erőműépítésben a lignitbázis döntő szerepet játszik.

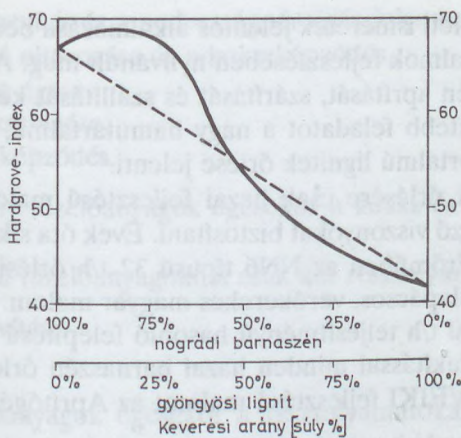


1.1. ábra. A és B, két logaritmikusan normális eloszlású szemcsehalmaz [1]

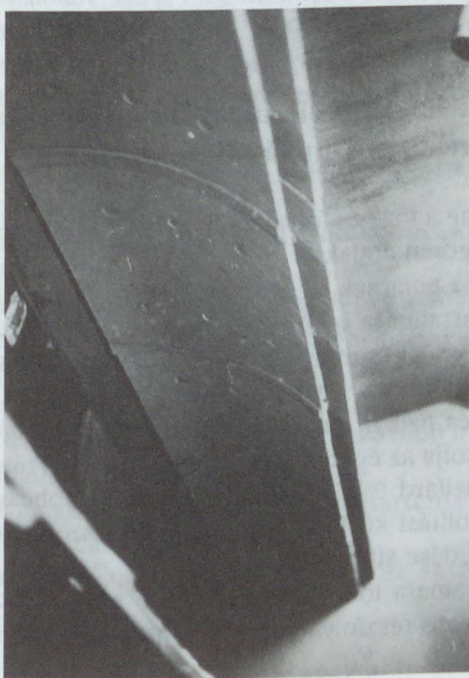


1.2. ábra. Az 1.1. ábra szerinti halmazok keverékében a komponensek eloszlása [1]

Amennyiben az egy lelőhelyre épített erőmű lignitigénye a közvetlen mellette elhelyezkedő bánya termelési teljesítményét meghaladja, úgy valamely közel eső barnaszénbányából kell a hiányzó mennyiséget fedezni. Szénkeverék tüzelésével előreláthatólag számolni lehet, ezért két szén keverékével sokoldalú vizsgálatokat végeztünk (1.3. ábra).



1.3. ábra. A Hardgrove őrlhetőségi tényező változása szénkeverékek esetén [1]



1.4. ábra. Éles elválasztást biztosító malomlégszér [2]

Az aprításelméleti ismeretek jelentős alkalmazása berendezések, azaz a szénőrlő malmok fejlesztésében nyilvánult meg. A malomberendezésnek a szén aprítását, szárítását és szállítását kell biztosítania. A legösszetettebb feladatot a nagy hamutartalmú, nedvességtartalmú és xylittartalmú lignitek őrlése jelenti.

Hazai szeneink őrlésére csak hazai fejlesztésű malomberendezéssel lehet kedvező viszonyokat biztosítani. Évek óta sikeresen üzemel a Bánhidai Erőműben az NN6 típusú 32 t/h őrlési teljesítményű, kombinált kalapácsos, verőkerekes magyar malom. Elkészült a prototípusa egy 50 t/h teljesítményű hasonló felépítésű malomnak, amely kisebb átalakítással minden hazai barnaszén őrlésére alkalmassá tehető. A VEIKI fejlesztésű malmot az Aprítógépgyár gyártotta.

A berendezésnél a forgórész újszerű axiális előtörővel is kiegészült. A szérelőberendezés is élesebb osztályozást biztosító hazai szabadalom alapján került kivitelezésre (1.4. ábra) [2]. A légszűrben az élesebb leválasztást a porban sűrűbb áramot leválasztó lemez biztosítja.

1.2. A különféle tüzelőanyagok égésmechanizmusának főbb vonásai

A tüzelőanyag a tüzelés folyamán a nyers állapottól a végső égéstermékig lényegesen átalakul.

Ez vonatkozik nemcsak az éghető részekre, hanem a tüzelőanyag ásványianyag-tartalmára is. A tüzelőberendezésben végbemenő folyamatok mennyiségi és minőségi jellemzői nemcsak a tüzelőberendezés konstrukciójától és a tüzelőanyag jellemzőitől függenek, hanem a kémiai és fizikai tényezők egész sorától is. Így pl. az égést erősen befolyásolja az égőtér hőmérséklete, szilárd tüzelőanyag esetén az oxigén szilárd felülethez való jutásának sebessége, az égéstermékek eltávolítási körülményei, a hamu összetétele és a tüztérben való viselkedése stb.

Az égés folyamata több részre osztható fel. Szilárd tüzelőanyag esetén a következő részfolyamatok különböztethetők meg:

- a felhevítés és a nedvességpárolgás folyamata,
- az illó eltávoztása és a kokszképződés,
- az illó égése,
- a koksztégése,
- salakképződés.

Folyékony tüzelőanyagok égésekor a kokszt és a salak egyszerre képződik.

Gáznemű tüzelőanyagoknál csak két részfolyamat található:

- felhevítés,
- égés.

A tüzelőanyagok égésekor a részfolyamatokat nem lehet egymástól elkülöníteni, és egymás után lejátszódónak elképzelni, hanem azok egymást átfedik, bizonyos szakaszokon párhuzamosan folynak le.

Így pl. a teljes nedvességtartalom még nem távozott el, amikor már az illó felszabadulása is megindul, és a tüzelőanyag már a gyulladási hőmérsékletre melegedett. A szilárd koksztégése ugyancsak jelentős szakaszokon párhuzamosan folyik az illó égésével.

A folyamatok mértéke, időtartama erősen függ a tüzelőanyag tulajdonságaitól.

Nagyon nedves tüzelőanyagoknál (tőzeg, lignit) a száradás folyamata jelentős részt igényel.

Az egyes folyamatok lejátszódását igen befolyásolja a tüzelőberendezés konstrukciója.

A tüzelőanyag a tüzelőberendezésbe lépve felhevül. Ennek következtében a tüzelőanyag nedvességtartalma párolgással csökken, a tüzelőanyag kiszárad. A nedvességtartalom párolgásának sebessége kissé változik.

Minél nedvesebb a tüzelőanyag, annál hosszabb a felhevülés időtartama a gyulladási hőmérsékletig.

A tüzelőanyag szárítási és felhevülési időtartama ezenkívül függ a környezet hőmérsékletétől is.

A folyékony tüzelőanyagokat, a pakurát, az anyag viszkozitásá-

tól függően, a jó porlasztási viszonyok megteremtése miatt, előbb kb. 90 – 180 °C hőmérsékletre felmelegítik.

A szilárd tüzelőanyagok rostélytüzeléskor általában a környezet hőmérsékletén kerülnek a tüzelőberendezésbe.

Szénporttüzeléskor a tüzelés rendszerétől és a szén tulajdonságaitól függően kb. 70 – 400 °C hőmérsékleten kerül a tüzelőanyag a tűztérbe.

Mesterséges gázoknál az alapvető éghető a szén-monoxid, amely könnyen oxidálódik, tehát a gáz előmelegítése szükséges.

A fluidizációs tüzelés teljesen új, külön tárgyalást igénylő eljárás.

Földgáznál az alapvető összetevő a metán, amelyet az égőhöz vezetés előtt kb. 600 °C-ra is fel lehet melegíteni, ha a szokásosnál magasabb tűztérhőmérsékletre van igény.

Az égő előtti gáz-előmelegítés növeli a tűztér hőmérsékletét, és így az elégésre is több idő marad. A metán bomlására több idő áll rendelkezésre, és a koromrészekké keletkezésének valószínűsége csökken.

Általában minél magasabb hőmérsékleten lép be a tüzelőanyag a tűztérbe, annál kevesebb hőmennyiség és idő szükséges a gyulladási hőmérsékletre való felmelegedésére.

A gyulladás folyamata függ a tüzelőanyag tulajdonságaitól, a környezettől, a légfeleslegtől és még számos fizikai körülménytől.

Szén esetében igen jelentős az illótartalomnak a gyulladásra való befolyása. A különböző szénfajtáknál az illó összetétele más és más. Ez már befolyásolja az illó felszabadulásának hőmérsékletét is.

A legalacsonyabb hőmérsékleten a nagy molekulájú szénhidrogének gőzei gyulladnak (250 – 400 °C). A kigázosodás után, kb. 500 °C felett gyullad a félkoks és utána a koks. Utoljára gyullad a hidrogén, a szén-monoxid és a metán.

A szénnek gyulladáspontig való felmelegítéséhez szükséges hőmennyiséget a nedvesség elpárologtatására, a szén felmelegítésére és az égési levegő felmelegítésére kell fordítani.

A gyulladáshő jelentős részét teszi ki a levegő felmelegítéséhez szükséges hőmennyiség. Ez egyben rámutat a légfelesleg-tényező jelentős szerepére is a gyulladás folyamatában.

Az illó égése már alacsony hőmérsékleten megkezdődik, de ekkor az égés még lassú és láng nélküli. A hőmérséklet emelkedésével, bizonyos meghatározott hőmérséklet elérése után, az égés sebessége hirtelen megemelkedik úgy, hogy a fejlődött hőmennyiség jelentősen meghaladja a környezet által elvont hőmennyiséget. Tulajdonképpen ezt nevezik gyulladási hőmérsékletnek.

Az illó égése a kutatások szerint ún. láncreakcióként megy végbe, ennek bonyolult elméletével a könyv részletesen nem foglalkozik.

Mind olajtüzeléskor, mind gáztüzeléskor a tüzelőanyagot minél kisebb légfesleg-tényezővel kell eltüzelni. E követelmény megvalósításához a következő legfontosabb intézkedések megtétele szükséges:

- megfelelően kell a tüzelőanyagot előkészíteni;
- az égő olyan legyen, hogy a tüzelőanyag és az égési levegő megfelelő keveredése létrejöhessen, olajtüzeléskor finom porlasztást kell elérni;
- a berendezés mérés- és szabályozástechnikája gyors és pontos legyen;
- a berendezést és az égőteret megfelelően kell illeszteni.

A tüzelőanyag megfelelő előkészítése olajtüzeléskor gyakorlatilag a szükséges magas előmelegítési hőmérséklet biztosítását jelenti, ami olajonként változik. Általában az olaj porlasztásához 2–4 °E viszkozitást írnak elő, de a gyakorlat azt mutatta, hogy az alsó határ közelében, 2–3 °E esetén kedvezőek a porlasztási viszonyok.

A gáz különösebb előkészítést nem igényel, előmelegítést ritkán alkalmaznak. Lényeges azonban a gáz- és levegőnyomás összehangolása.

Az égőkkel a megfelelően finom porlasztás elérése elsőrendű követelmény. A nyomásos porlasztású olajégők — bár a gázporlasztású égők régebbi múltra tekintenek vissza — egyszerűségük és kis önfogyasztású igényük miatt jelenleg is elterjedtek. Igen jó nyomásos porlasztásokat fejlesztettek ki. A gőzporlasztásos égőkkel azonban finomabb porlasztás érhető el, és az utóbbi időben különösen a kis légfesleggel való üzemeltetéssel kapcsolatban nagyon elter-

jedtek. A gőzporlasztásos égők előnye a mechanikus porlasztókkal szemben az, hogy a gőz az olajjal keveredve azt tovább felmelegíti és kedvezőbb viszonyokat teremt a porlasztáshoz. A gőzporlasztásos égők kedvezőbbek a szénkiválás és koromképződés szempontjából is. A lángba keveredett gőz kedvező feltételt teremt a kivált szén elgázosításához (vízgázreakció), és így a tapasztalatok szerint a koromképződés kisebb mértékű.

1.2.1. A gáz égése

A földgáz tüzelőanyag égése, az egyéb tüzelőanyagokhoz hasonlóan, a tüzelőanyag oxidációja kellő hőmérsékleten az égést tápláló levegő oxigénjével, melynek során a hőtermelő berendezésben hasznosítható hő szabadul fel. A földgáz annyiban tér el a szokásos tüzelőanyagoktól, hogy

- halmazállapota gáz alakú, tehát más tüzelőanyagokhoz viszonyítva könnyebb az égést tápláló levegővel való molekuláris elegy előállítás,
- a láng az esetek döntő részében meghatározott felületen vagy síkon (égőkilépés) képződik.

A gáz halmazállapotú tüzelőanyagok felhasználása során mindig fontos követelmény volt, hogy a különböző forrásból származó, illetve különböző módon előállított éghető gázok a felhasználó berendezés üzemeltetésekor hasonló módon viselkedjenek, azaz legyenek egymással cserélhetők.

A háztartási-kommunális felhasználásban, illetve az ipari felhasználások nagy részénél a cserélhetőséghez a fő követelmények a következők:

- A láng kellő stabilitása, ne forduljon elő a láng leszakadása vagy visszagyulladás.
- Az égés tökéletessége, ne keletkezzen CO, illetve fontos szempont a NO_x -emisszió is.
- A berendezés teljesítménye ne térjen el a névleges teljesítménytől.

- Megfelelő legyen a lángsugarak közötti átgyulladás, ne legyen zajos az égés.

Egyes különleges termikus alkalmazásoknál fontos lehet:

- A meghatározott lángalak és lánghőmérséklet állandósága.
- A kezelt, gyártott termék nem tekinthető mindig inert anyagnak az adott égéstermék-atmoszférában. Előfordulhat oxidáció, redukció, a fémek hidrogéntartalmának változása. Ilyen esetekben különösen fontos lehet a gázösszetétel állandósága.

A földgáz alapanyagként történő felhasználásakor a kémiai összetétel elsőrendű tényezővé válhat. (Ilyenek általában a vegyipari felhasználások.)

A gázégők számos fajtája és felépítési módja ismeretes, de az égők közül a részleges előkeverésű atmoszférikus égők azok, amelyek használata a háztartási, a kommunális és az ipari felhasználásokban a legelterjedtebb. Ezért, és mivel az ilyen égőknél tapasztalható jelenségek jelentős része más égőtípusokra is jellemző, célszerű az ilyen égők viselkedésének áttekintése a gázminőség változásának függvényében.

Az égők hőterhelése

Az égők hőterhelését, a gázadagoló rendszeren kiömlő energiaáramot adott nyomáson a gáz-térfogatáram és a fűtőérték szorzata adja, a cserélhetőség egyik jellemzője a hőterhelés állandósága különböző gázminőségekkel is.

Az elsődleges, tehát az égés határfelülete előtt a gázhoz hozzákevert levegő állandó aránya

Bizonyos egyszerűsítésekkel és elhanyagolásokkal az elsődleges levegőhányad az

$$n = \frac{\sqrt{d}}{V_a} \sqrt{\frac{S}{s}}$$

összefüggéssel jellemezhető, ahol

$$n = \frac{\text{elsődleges levegőmennyiség}}{\text{elméleti levegőszükséglet}},$$

V_a a tökéletes égéshez szükséges elméleti levegőmennyiség,

S a keverőberendezés (injektor) torkának felülete,

s a fúvóka keresztmetszete.

Az összefüggés alapján látható, hogy az elsődleges levegőhányad szoros összefüggésben van a használt gáz relatív sűrűségével.

Az égők lángjának viselkedése

Ezzel kapcsolatban fontos, hogy a láng alakja és struktúrája jól meghatározott és változatlan legyen, és stabilan, azaz leszakadás és visszagyulladás nélkül égjen az e célra rendelt síkon vagy felületen. A lángalak és a láng stabilitása elsősorban az alkalmazott gáz összetételétől, az égő kialakításától függ. Azonos gázcsaládon belül inert alkotók (CO_2 , N_2) megjelenésével csökken a gáz égési sebessége, csökken a visszagyulladás veszélye, de nő a lángleszakadás valószínűsége.

Azonos gázcsaládon belül döntő jelentőségű jellemző az adott gáz ún. Wobbe-száma, mely a gáz égéshőjének és a gáz levegőhöz viszonyított relatív sűrűsége négyzetgyökének hányadosa:

$$W_o = \frac{Hf}{\sqrt{r}} \quad [\text{MJ}/\text{m}^3],$$

ahol

$$r = \frac{\rho_{\text{földgáz}}}{\rho_{\text{levegő}}}.$$

A W_o szám közvetlenül jellemző egy adott berendezés hőterhelésének változására a gázösszetétel ingadozásának függvényében, ugyanakkor egy gázcsaládon belül segítséget nyújt a gázminőség-változás tüzeléstechnikai hatásainak megítélésére azért, mert megközelítően azonos W_o szám egyes alkotók szélsőséges értékei mellett már nem állítható be.

A W_o szám információt nyújt az égők elsődleges levegőarányának alakulására is, csökkenő W_o szám növekvő levegőviszonyt eredményez és fordítva.

1.2.2. Az olaj égése

A folyékony tüzelőanyagok égésének vizsgálatakor megállapítottuk, hogy azok a gőzfázisba való átmenet után kezdenek égni. Ezt alátámasztja az a tény, hogy a gyulladási hőmérséklet a forráspontnál mindig magasabb érték. Általában az olaj égésekor a következő fázisok különböztethetők meg:

- a tüzelőanyag felmelegedése és elpárolgása,
- a termikus bomlás és oxidáció,
- az éghető keverék képződése,
- a gyulladás és a gázfázis tulajdonságai szerinti elégés.

Az egyes fázisok egymást térben és időben átfedik.

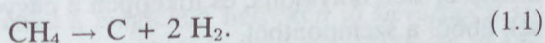
A lángban és az égéstermékekben a kiváló szén két formában található:

- a korom és az éghető gázok bomlásából keletkező elemi szén;
- a kokszt az alacsony forráspontú, könnyen illó alkotók eltávolítása után a termikus krakkolás folyamatát követően visszamaradt szénhidrogén és hamu.

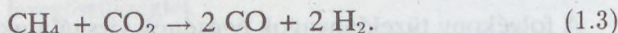
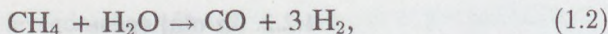
A kormot és a kokszt olajtüzelés esetén sokszor tévesen azonos terméknek tekintik.

A szabad szén kiválásának egyik oka lehet a tüzelési folyamat tökéletlensége. Az égéstermékek és a még meglévő elégetlen éghető gázok adott körülmények között szén kiválása mellett bomlanak. E reakciók közül legfontosabb a metánnak, a szén-dioxidnak és a szén-monoxidnak a disszociációja.

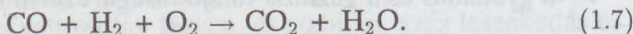
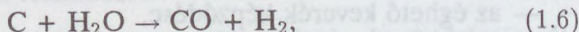
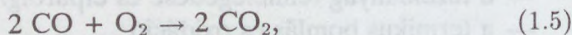
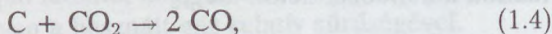
A metánbomlást jellemző reakció:



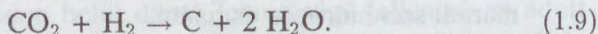
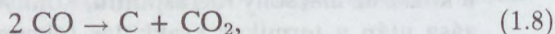
Ebben a reakcióban a metán koromképződés közben bomlik, és a korom égésekor látható tartományban erősen sugárzó láng keletkezik. A lángban más metánreakciók is lejátszódhatnak, amelyek közvetlen szénkiválással nem járnak, de a feltételét megteremthetik. Ilyenek pl.:



A szabad szén jelenlétében, a lángban még a következő reakciók lejátszódása is lehetséges:



A lángban lévő CH_4 , CO és CO_2 redukáló atmoszférában, a körülményektől függő mértékben a már bemutatott (1.1) és a következő két egyenlet szerint, koromkiválás mellett bomlik:



Az (1.1), (1.8) és (1.9) reakciótípusokat léghiányos reakcióknak is nevezik. Az átalakult anyagmennyiség erősen függ a hőmérséklettől. E koromképződési folyamatok feltétele tehát, hogy a magas hőmérsékleten disszociáció következtében keletkező éghető gázok, elégésük előtt, léghiányos helyre kerüljenek. A szénkiválás másik fő oka a tüzelőanyagcseppeknek az égési feltételektől és a tüzelőanyagfajtától függő kokszolódási folyamata. A kokszolódást a porlasztás erősen bolyásolja, és főképpen a nagyobb cseppek veszélyesebbek ebből a szempontból.

A lángban levő koromszemcsék mennyisége az égőtől való távolságon kívül a C/H viszonytól is erősen függ. Az éghető veszteségek elkerülése céljából tehát annál nagyobb gondot kell fordítani a megfelelő tüzelési körülmények megteremtésére, minél nagyobb a C/H viszony.

Az olajtüzeléskor főleg olyan körülményeket kell megteremteni, hogy a lángban nagyobb mennyiségben koromszemcsék ne kép-

zódhessenek, továbbá a keletkező szemcsék még eléghessenek. Az előbbieken tárgyalakon kívül az olajlángban a koromképződés egyik sajátos folyamatának magyarázata nyerhető, a krakkolódási és az égési folyamat lejátszódása egymáshoz viszonyított sebességének a vizsgálatával. Ilyen irányú kísérleteket Fritsch végzett és közölt [7, 8].

A krakkreakció és az égési reakció időállandója a hőmérséklettől függ, és az időállandók változása különbözik egymástól. Alacsony hőmérsékleten a krakkreakció időállandója nagyobb, az égési reakció időállandója kisebb, tehát az előbbi lassabban játszódik le, mint az utóbbi. A hőmérséklet növekedésével a krakkreakció időállandója jobban csökken, mint az égési reakcióé, tehát adott hőmérsékleten metszik egymást, azaz egymáshoz viszonyított elhelyezkedésük megváltozik. Az égésfolyamat lassúbb lesz a krakkfolyamatnál. E hőmérséklet-tartományban a szénhidrogének az égés folyamán intenzíven bomlanak, és a szabaddá váló szénrészecskék méretét minél kisebb értékre kell korlátozni, továbbá elégésükről gondoskodni kell.

Az elméleti megfontolások és az ismertetett vizsgálatok tehát azt mutatták, hogy a jó olajtüzeléskor — amikor alacsony légfeleslegértéket is kell tartani — a legfontosabb intézkedések a következők:

- A tüzelőanyagot megfelelően elő kell készíteni, elsősorban fel kell melegíteni a porlasztási igényeknek megfelelő hőmérsékletre. A porlasztási hőmérséklet szintén a koromképződés szempontjából jelentős. Az olaj viszkozitásától erősen függ a porlasztás finomsága, ami viszont a füstgázban levő koromrészecskék mennyiségét befolyásolja.
- Az égőberendezéssel a megfelelő helyeken jó keveredési viszonyokat kell elérni, hogy kiegészés után a léghiányos zónák elkerülhetők legyenek.
- A tűztér méreteit úgy kell megválasztani, hogy az a lángfronthoz jól illeszkedjék. Különösen a tűztérfalak közelében nagy a hőmérsékletesés, és a koromképződés veszélye is itt nagyobb.
- A részterhelés esetén különös figyelemmel kell lenni a tü-

zelésre, hogy ebben az állapotban is jó legyen a keveredés és a porlasztás.

- Gyorsan és biztosan érzékelő és működő szabályozó- és mérőberendezéseket kell alkalmazni.

A jó tüzelés alapját elsősorban a megfelelő porlasztást biztosító égő képezi. Leginkább két égőtípus, a nyomásporlasztású és a segédközege (gőz- vagy levegőporlasztású) égők használatosak.

A folyékony tüzelőanyag cseppek formájában ég el. A folyamat igen összetett, jelentős szerepe van a hőcserének, az anyagcserének, valamint a tüzelőanyag és a környezet között létrejövő kémiai folyamatoknak. E bonyolult, nehezen kezelhető differenciálegyenletrendszerrel leírható folyamatot gyakran a részfolyamatok leírásával teszik egyszerűbben kezelhetővé. A csepp eléégésének mértékét a dimenzió nélküli párolgási idő, a turbulens keveredés ideje és a kémiai reakció ideje függvényében állapítják meg:

$$\eta_b = f\left(\frac{\tau_m}{\tau_t}, \frac{\tau_p}{\tau_t}, \frac{\tau_k}{\tau_t}\right).$$

1.2.3. A szén égése

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 tűterekben 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 kizárólagos-

san döntő lehet. A szilárd tüzelőanyagok heterogén égési folyamánál 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 folyamat sebességében vannak nagyságrendi különbségek. Ennek folytán a szenek égésénél az alábbi részfolyamatokat kell figyelembe vennünk:

- a szénszemcse felmelegedése, a felületi és hidroszkopikus nedvesség elpárolgatatása,
- az illótartalom kigázosodása kokszképződés mellett,
- az illó égése a homogén kémiai reakciók szerint,
- a kokszy gyulladása és égése a heterogén reakciók szerint,
- salak és hamuképződés, esetleg hőcsere-folyamat mellett.

A részfolyamatok pontos hőmérlege, a levegőszükséglet és a hőmérsékleti viszonyok számításokkal és tüzelési kísérletekkel jól tisztázhatók. A salaktulajdonságok miatt legtöbbször a tüzelőberendezések megtervezéséhez előzetes tüzelési kísérletekre van szükség. A tüzeléstechnikában a gyakorlati tüzelési vizsgálatok mellett a tüzelőanyag laboratóriumi vizsgálati módszereinek egész sora megtalálható. A laborvizsgálatok, melyek legegyszerűbb formája az immediát, valamint elementár analízis, a fűtőérték-meghatározás, a salak- és hamuérték megállapítása stb. A tüzelőanyagok általános viselkedése tüzterekben majd minden esetben megköveteli a nagy berendezésekben lebonyolítható tüzelési kísérleteket és ezzel kapcsolatos egyéb áramlástechnikai vizsgálatokat.

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 égésmechanizmusával nagyon sokan foglalkoztak, nagyértékű kutatóeszközök felhasználásával, kísérleti és

matematikai modelleket alkottak, és sokban gazdagították a reakciókinetika elméletét [9–12].

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 feketekőszén kokszzemcséin belül nagy üregek vannak, és a pórusokon keresztül az oxigén be tud hatolni a széngömb belsejébe.

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

A különböző minőségű kőszén kokszzemcséinek égését függőleges csökemencében vizsgálva két fő típus különböztethető meg, a duzzadó és a nem duzzadó szenek kategóriája.

Nem duzzadó (gyengébb minőségű) szenek kokszzemcséinek átmérője és látszólagos tömegűrsége 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 szenek kokszzemcséinek 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 hőmérleget használták fel a fenti kérdés eldöntésére. Ha ugyanis a reakciótermék CO_2 , úgy a reakcióhő 33000 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-produkció csaknem biztossá válik. Ha viszont ez a helyzet, akkor a CO úgy ég el a szemcse határ-rétegében, 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 elégetése a kokszzemcse-felület közelében.

R. J. Hamor, I. W. Smith és R. J. Tyler [13] barnaszén kokszt égését vizsgálta 630 – 2200 K hőmérséklet-intervallumban. Eredményeiket összevetették más típusú szenekre vonatkozó adatokkal.

104 μm közepes méretű barnaszénen 1600 K hőmérséklet mellett részlegesen kiégettek abból a célból, hogy kokszzemcséket nyerjenek, és azok égését vertikális csőkemencében elkülönítetten vizsgálhassák.

A reakciók sebessége az oxigén parciális nyomásával arányosnak adódott feketekőszénre és antracitra. A barnakőszén-kokszt égését vizsgálva a mérési pontok szórása lecsökken, ha feltételezik azt, hogy a reakció sebessége az oxigén parciális nyomásának négyzetgyökével arányos.

1.3. Az impulzusholográfia alkalmazása égésfolyamatok értékelésére

Az impulzusholográfiának a gáznemű, folyékony és szilárd tüzelőanyagok égésfolyamatának vizsgálatára való alkalmasságát több közlemény tartalmazza, amelyek közül fontosabbaként az irodalomjegyzékben [14 – 16] sorszám alatt felsoroltak említhetők. A [14] irodalommal gyakorlatilag egy időben végeztek vizsgálatokat a Vilamosenergia-ipari Kutató Intézetben szénszemcsék égésére. A következőkben a vizsgálatához alkalmazott berendezésről, a vizsgálat körülményeiről és az égésméletről az eddig közölték alapján általánosítható eredményekről lehet beszámolni.

Az impulzusholográfia alkalmazásának ismertetése előtt essék szó a kőszén szemcsék égésének kísérleti vizsgálatára alkalmas ejtőcsöves kísérleti berendezésről (1.5. ábra). A berendezés sokoldalúan alkalmas az égésfolyamat térbeni és időbeni lefolyásának tanulmányozására, így az egyes égő szénporszemcsék impulzusholográfiával 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 ejtőcsöves kísérletek során impulzusholográfiát alkalmaztunk.

Ezzel az új módszerrel a szemcsék körüli termikus határréteg szerkezetének felderítését lehet elérni.

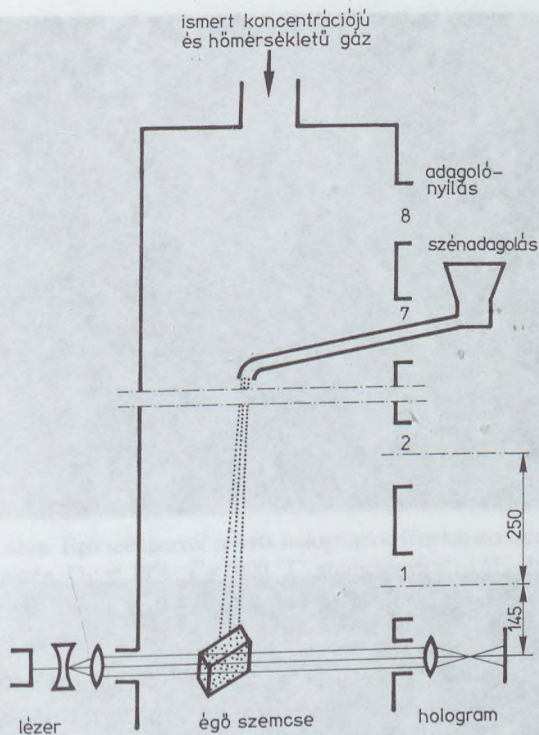
A hologramokat a Magyar Tudományos Akadémia Műszaki Kémiai Kutató Intézete (MTA MÜKKI) Holográfiai Laboratóriumának munkatársai készítették.

Az első vizsgálatokhoz oroszlányi és balinkai szén különböző frakcióit használtuk. (Oroszlányiból $63 < d < 80 \mu\text{m}$ és $125 < d < 160 \mu\text{m}$; balinkaiból $63 < d < 80 \mu\text{m}$ frakciókat).

Az ejtőcsövet a kísérletekhez 1000°C és 750°C hőmérsékletre fűtöttük.

A hologramfelvételeket az ejtőcsövön létesített átellenes nyíláson keresztül vezetett lézersugár és a berendezést megkerülő referenciasugár alkalmazása mellett készítettük.

Az alkalmazott holografikus vizsgálati módszer azon alapul, hogy egy impulzus-rubínlézer 20 ns felvillanási idejű, 5–10 MW teljesítményű, kettős óriásimpulzusával a vizsgálónyílás előtt elhaladó égő szemcséket megvilágítjuk, és leképezzük 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

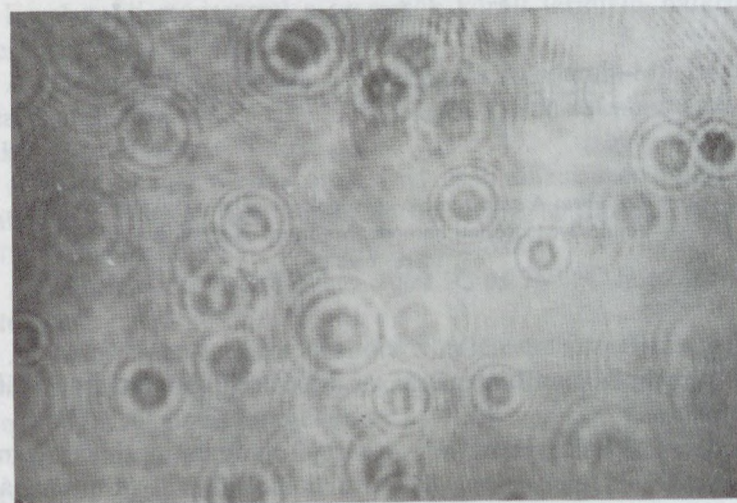
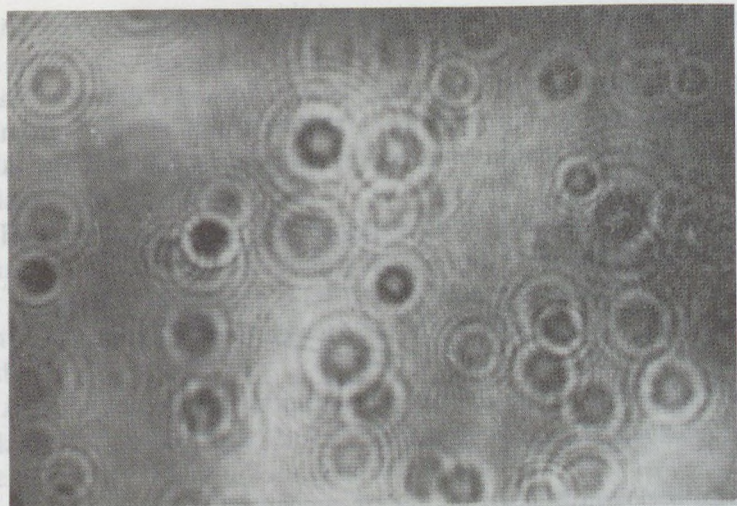


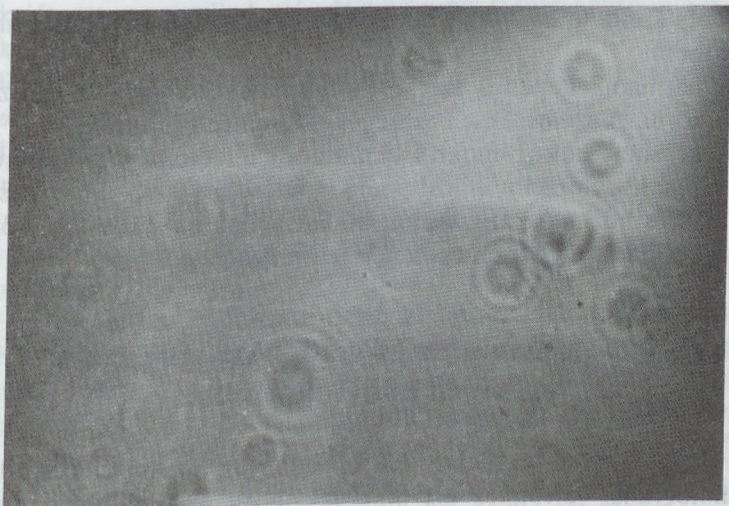
1.5. ábra. A szén szemcse égésének vizsgálatára alkalmas ejtőcsöves kísérleti berendezés vázlata és a holográfiás mérés elve [3]

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" valóságként háromdimenziósan rekonstruálható belőle, ha állandóan sugárzó gázlézerrel átvilágítjuk.

A kettős impulzus (időkéselem 150 – 200 ns) két állapotot rögzít ugyanarra a hologramra. A hologramon tehát két állapot szu-





1.6. ábra. Égő szénporról felvett hologramos fényképsorozat [4]
(Feketeszen, $O_2 = 10\%$, $T = 1000^\circ\text{C}$, szemcseméret: $125 - 160\ \mu\text{m}$)

perponálódik. Ha a két állapotban nincs semmi különbség, akkor rekonstruálva a "tárgy" úgy jelenik meg, mintha egyszer holografáltak volna, kétszer olyan hosszú időtartamú lézerimpulzussal.

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, feltételeztük, hogy a szén-porszemcse körüli termikus határréteg szerkezetére vonatkozóan a hologramokból többletinformáció nyerhető.

A példaképpen bemutatott fényképsorozat (1.6. ábra) durva feketeszenről (1000°C) készített hologramok helyreállítása után készült. A fényképsorozat első képe a vizsgálatok céljaira biztosított nyílás fölött közvetlenül betáplált szénport mutatja. A szemcsék egy része ég.

A második képen láthatóan több szénporszemcse ég már; körülöttük egy-egy burok látszik. A kép az illóégés stádiumában készült a szemcsékről. A két ferde csík a vizsgált szemcsék előtt le-

vő többi szemcse hatása. A burok az illóégés zónájának, lángjának tekinthető.

A harmadik képen a szemcséket interferenciagyűrűk sorozata veszi körül. A szemcsék a kokségés 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.

1.4. A szénszemcse és különböző lángelemek égésének hullámjelenségei

A szénszemcséről, illetve más tüzelőanyag lángjairól készült lézerholográfiás felvételek azt mutatják, hogy a szemcséből, illetve lángelemekből többé-kevésbé szabályos vagy eltorzult gömbhullámok terjednek tovább. Az egyszerűség és számszerű eredmények meghatározása céljából a bemutatott felvételeket alkalmazzuk, ezzel nem zárva ki általános alkalmazhatóságát. A jelenség létét a VEIKI jelentések és az irodalomban felsorolt művekben közölt felvételek bizonyítják. Bizonyítják azzal, hogy az égés előtti fázisban készült felvételeken interferenciagyűrűk nincsenek, míg a gyulladást követően az interferenciagyűrűk megjelennek [17–20]. 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 reakcióteréből.

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 reakcióterben 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 fiziko-kémiai 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 időaránya-it figyelembe kell venni.

A tüzelőanyag égése egyszerűsítve a következőppen 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 felemészteti. Folyamatos utántáplálását (diffúzió) a lecsökkent koncentráció ellenére akadályozza az, hogy a reakcióterben erős hőmérséklet-emelkedés 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 lökészerű 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 hideg lángokra a kémiai folyamatok periodikus jellegét, különböző szerzőkre hivatkozva, már Kondratyev V. N. is ismerteteti [21]. E könyv hivatkozik Gervart és Frank-Kamenyckij

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 stationárius állapotot figyelembe vevő modellek alkalmatlanok.

A reakcióterben nem áll fenn egyensúlyi állapot. Olyan, differenciálegyenletekkel leírt 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 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 változók 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. Töre-

kednünk kell azonban arra, hogy a lényegyet meghatározó domináns fiziko-kémiai folyamatot ragadjuk meg, a lényegtelen folyamatoktól eltekintsünk. Természetesen az, hogy mikor mi a lényeges, 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 fiziko-kémiai folyamat

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 [21]. A reakciót tekinthetjük koncentrálnak, de a térbeliséget is figyelembe vehetjük.

A szükséges időfelbontás

Egy szilárd szemcse égését a hőmérséklet – idő függvény írja le. Egy statikus modell nem veszi figyelembe sem a kezdeti tranzienst, sem pedig az esetleges oszcillációt. Finom időfelbontásra van szükség annak érdekében, hogy kiderítsük a hőmérséklet valódi időfüggését, a fellépő oszcillációt. A jó közelítéssel időben állandó oszcillációt a dinamikus stabilitás állapotának is nevezhetjük.

Termokinetikai oszcillátor

A legegyszerűbb modell, amely a szénszemcse égése dinamikus folyamatának lényegét képes leírni, egy két állapotváltozós, koncentrált termokinetikai modell. Az egyik változó a termikus határ-réteg átlaghőmérséklete (T), a másik pedig ugyanitt az átlagos O_2 -koncentráció (C). A modell

- egy-egy lépésből álló elsőrendű egzoterm reakciót,
 - a hőcsere különböző formáinak koncentrált hatását, végül
 - az anyagtranszport különböző formáinak koncentrált hatását
- képes figyelembe venni.

A modell hajlamos az oszcillációra, ezért termokinetikai oszcillátornak neveztük el. Az oszcilláció azonban nem törvényszerűen lép fel. A modell konkrét felépítése és a paraméterek (fizikai és kémiai jellemzők) tényleges értékei döntenek el, hogy a dinamikus és statikus stabilitás állapota megegyezik-e vagy valóban létrejön az oszcilláció.

A szénszemcse égésénél a kémiai reakcióknak önmagukban is van oszcillációt okozó hatása.

A reakciótérben és környezetében azonban bonyolult idő- és helyfüggő kémiai termikus, diffúziós folyamatok zajlanak le. Célszerű azonban ezen összetett rendszeren belüli csatolást olyan módon egyszerűsíteni, hogy egyrészt egy koncentrált modellel a reakciótér dinamikus viselkedését írjuk le, a koncentrált modellben a térbeli külső hatásokat is koncentráltan lehet figyelembe venni, másrészt a koncentrált modell egy térbeli modell peremfeltételén ható gerjesztésként szerepel. A két modell közötti csatolás matematikailag egyirányú: a koncentrált modell független a térbelitől. Egyetlen szemcse égésénél ez a közelítés jogosnak látszik. A több egyensúlyi helyzet (és közöttük nyilván instabil állapot) létezése oszcillációra vezethet.

Régóta ismeretes, hogy az égés szélső esetben diffúzió-, illetve reakciókontrollált lehet, attól függően, hogy melyik az a jelenség, amely mellett a másik végtelen gyorsnak tekinthető. Oszcilláció esetén a diffúzió és a reakció sebessége változik: periodikusan változik, hogy melyik kontrollálja az egész folyamatot! A vezérlésnek ezt a változását egyébként az időtől függő modell automatikusan nyomon követi, ezt a modellbe külön nem kell beépíteni.

Reakció-diffúziós folyamatok

A reakció-diffúzió egyenlet általános alakja:

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = \mathbf{D} \Delta \mathbf{u} + f(\mathbf{u}), \quad (1.10)$$

ahol

$\mathbf{u}$ n -elemű vektorváltozó (valamennyi elem egy-egy diffundáló komponenszt reprezentál),

D $n \times n$ -es mátrix és

Δ a Laplace-operátor,

f a reakciókat és kölcsönhatásokat írja le.

Az ilyen egyenletek kémiai folyamatokat (pl. kémiai reaktorok működését, égést), biológiai szervezeteket és egyéb műszaki vagy tudományos rendszereket modelleznek.

A reakció-diffúziós rendszerekben fellépő hullámterjedési jelenségek vizsgálatában sok fontos eredmény éppen az égés elméletével kapcsolatban született. E munkában a szinguláris perturbációs technikával értek el eredményeket.

A reakció-diffúziós egyenletekben a nemlinearitásnak fontos szerepe van.

Feltűnő a nagyfokú bizonytalanság a jelenségek lényegének feltárásában. Chang [22] 22 homogén reakciót javasol, Young [23] 10 reakcióról beszél. Ezzel szemben az izotermikus kinetikájú, egyetlen elemi lépésből álló modell is oszcillál. Az oszcilláció (határciklus) elméleti kimutatása igen nehéz. Több módszerrel is próbálkoztak, de nem jártak sikerrel (pl. Ljapunov második módszerével, átlagolási technikával, perturbációs technikával, Fourier-típusú analízissel). A bifurkációs technika [amely mellesleg nem új, mert Poincarétól (1885!) származtatható] azonban sikeresnek bizonyult.

A nagyszámú irodalom részletes elemzése és hasznosítása alapján kiderült, hogy bizonyos kiegészítésekkel a termokinetikai oszcillátor a jelenségek hű leírására képes, így lényegesen több, mint egy elvi modell. Ezért lehetséges volt a paraméterek konkrét fizikai tartalommal való megtöltése, számszerűsítése.

Egy olyan átfogó égésmodellből kell kiindulnunk, amely a hő- és anyagtranszport valamennyi jelenségét figyelembe veszi. A ma rendelkezésre álló elméleti matematikai és számítástechnikai módszerek nem alkalmasak egy ilyen modell vizsgálatára. Ezért az irodalom alapján elméletileg és kísérletileg megalapozott, ésszerű egyszerűsítést kell végrehajtanunk. Ezen egyszerűsítés nem érinti a jelenség lényegét.

A kialakított, egyszerűsített modell:

$$\begin{aligned}\dot{T} &= -\beta T + \frac{\beta}{\mu} C e^T, \\ \dot{C} &= 1 - C + C e^{T-\lambda},\end{aligned}\quad (1.11)$$

ahol az egyes betűk jelentése:

T_s a szemcse felületének dimenziótlan hőmérséklete,

$$T = \gamma \frac{T_s - T_g}{T_g}, \quad (1.12)$$

T_s a szemcse felületének hőmérséklete [K],

T_g a gáz átlaghőmérséklete [K],

γ dimenziótlan jellemző,

$$\gamma = 1,7976 \cdot 10^4 / T_g, \quad (1.13)$$

C dimenziótlan O_2 -koncentráció,

$$C = p_s / p_g, \quad (1.14)$$

p_s az O_2 parciális nyomása a szemcse felszínén [bar],

p_g az O_2 parciális nyomása a szemcsétől távol a gázban [bar],

β a hűlésre jellemző dimenziótlan állandó,

$$\beta = 0,276 \frac{\rho_g \kappa^3}{\rho}, \quad (1.15)$$

ρ_g a gáz sűrűsége T_g hőmérsékleten [g/cm^3],

$$\rho_g = \frac{0,35}{T_g} \quad (1.16)$$

ρ a szénszemcsére jellemző állandó [$J/cm^3 K$],

$$\rho \leq \rho_{sz} c_p,$$

ρ_{sz} a szemcse sűrűsége [g/cm³],

c_p a szemcse fajhője [J/g K],

κ a határréteg külső átmérőjének és a szemcse átmérőjének a hányadosa,

$$\kappa = 2 \dots 10, \quad (1.17)$$

λ a Damköhler-szám negatív logaritmus (most nem a hővezető képességet jelöljük e betűvel!),

$$\lambda = \gamma - 16,72 - \ln a, \quad (1.18)$$

a a szemcse sugara [cm],

μ dimenziótlan jellemző,

$$\mu = 1,7592 \cdot 10^{-7} \frac{e^\gamma}{a \gamma^2 p_g}. \quad (1.19)$$

Az (1.11) oszcillátor által gerjesztett gömbhullámok hullámhossza:

$$l = 3,6a\kappa^{3/2} \quad [\text{cm}], \quad (1.20)$$

terjedési sebessége:

$$w = 2,5 \cdot 10^{-3} \frac{1}{a \rho_g \kappa^{3/2}} \quad [\text{cm/s}]. \quad (1.21)$$

l és w ismeretében ω is számítható. l és w azonban az $\omega=2$ feltételezéssel számítható. Modellünk vizsgálata ezt a feltételezést ugyan indokolja (a legfontosabb tartományban $\omega = 0,5 \dots 3$), mégis l -re és w -re csak tájékoztató értéket ad. ω -t helyesebb a tényleges ω_0 -ból, az időlépték segítségével számolni:

$$\omega = \omega_0 b_2 = 0,0062 T_g / a^2 \kappa^3. \quad (1.22)$$

A legfontosabb képleteket gyűjtsük össze (ezeknél γ -t és ρ_g -t (1.13) és (1.16) segítségével küszöböljük ki):

$$\beta = 0,1\kappa^3/T_g,$$

$$\lambda = \frac{17974}{T_g} - 16,7 - \ln \alpha,$$

$$\mu = 5,44 \cdot 10^{-16} \frac{T_g^2 \exp(17974/T_g)}{ap_g},$$

$$l = 3,6a\kappa^{3/2} \quad [\text{cm}],$$

$$w = 7,1 \cdot 10^{-3} \frac{T_g}{a\kappa^{3/2}} \quad [\text{cm/s}],$$

$$\omega = 6,2 \cdot 10^{-3} \frac{\omega_0 T_g}{a^2 \kappa^3} \quad [1/\text{s}].$$

Elemezni lehet ezeket a képleteket az oszcilláció szempontjából.

Modellünk elemzésével meghatároztuk λ -nak és μ -nek azt a *reális* tartományát, ahol oszcilláció jön létre. Ennek a tartománynak a meghatározása meglehetősen egyértelmű feladat, mert ezen kívül vagy nincs oszcilláció, vagy pedig a kritikus β érték (β_0) irreálisan nagy. A kiszámolt értékeket az ω_0 frekvenciával együtt az 1.1. táblázat tartalmazza.

Kísérletek és eredmények

A szemcse égésekor fellépő oszcilláció, hullámjelenség kimutatására kétféle alapvető kísérletet végeztünk. Felvételeket készítettünk lézerholográfiával, illetve a szemcse hőmérsékletét mértük nagyérzékenyséű optikai műszerrel, oszcillográfós regisztrálással.

Field [24, 25] alkalmazta elsőként, 1962-ben az ún. ejtőcsöves módszert több szénszemcse égésének tanulmányozására. Egy elektromosan fűtött csökmencébe azonos hőmérsékletű levegőt vagy gázt áramoltatva folyamatosan adagolt szénszemcséket, majd adott idő után összegyűjtve a maradékot, meghatározta a kiégés mértékét. A beadagolás és összegyűjtés közötti időt változtatva a szén teljes kiégéséig, eredményül az ún. kiégési görbéket kapjuk, amelyek tükrözik az adott szén égési tulajdonságait különböző feltételek esetén.

Az égő szemcséről felvett holográfiás fényképek az 1.6. ábrán voltak láthatók. Véleményünk szerint ezeken interferenciagyűrűket

1.1. táblázat

λ	μ	β_0	ω_0
0	0,4 (0,2 ...0,3)	8,4	8,4
0,5	0,65 (0,4 ...0,8)	5,4	4,6
1	0,9 (0,7 ...1,1)	3,6	3,2
1,5	1,35 (1 ...1,4)	2,5	1,5
2	1,83 (1,5 ...1,83)	1,8	0,7
2,1	1,95 (1,75...1,95)	1,7	0,56
2,2	2,06 (2 ...2,06)	1,7	0,97
2,3	2,18 (2,16...2,18)	1,8	1,34
2,4	2,33 (2,1 ...2,33)	1,8	1,5

látunk, amelyek amiatt jönnek létre, hogy az égő szemcse által gerjesztett térhullámok w sebességgel haladnak, így a két lézerimpulzus a $200 \mu\text{s}$ idő elteltével különböző térállapottal találkozik. w értékére az alábbi nagyságrendi becslés adható [26].

Legyen $T_g=1300 \text{ K}$, $a=0,005 \text{ cm}$, $K=10$, akkor $w \approx 58 \text{ cm/s}$. Az ehhez tartozó l hullámhossz: $l \approx 0,57 \text{ cm}$. Ez azt jelenti, hogy a tér egy-egy pontja között a $200 \mu\text{s}$ idő elteltével kb. $0,01 \text{ K}$ hőmérséklet-változás lehetséges, ha az oszcilláció hőmérséklet-ingadozásának amplitúdója 100 K . l a szemcsemérettel, w viszont annak reciprokéval arányos.

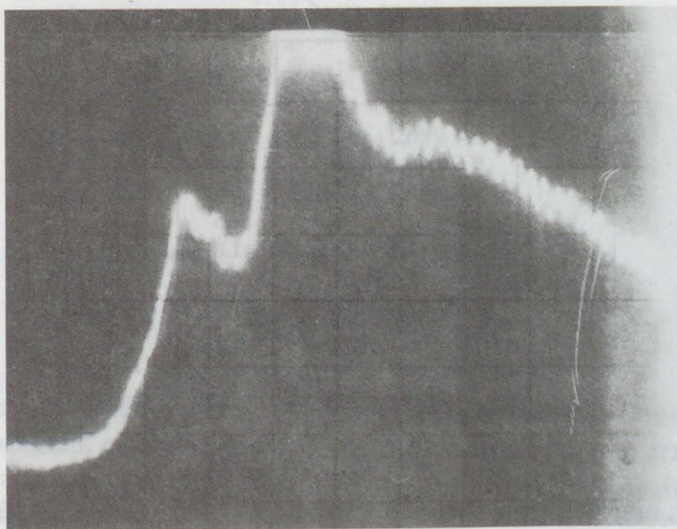
Optikai hőmérséklet-oszcillogramok

Az oszcilloszkóp ernyőjén megjelent, a szemcse gyulladási és kiegészítő folyamatát tükröző oszcillogramok azonos paraméterek és szemcsehalmazok esetén túlnyomórészt meglepően hasonlóak.

A nagy számban, több paraméter mellett felvett kiegészítő oszcillogramok közül barnaszénfajtára jellegzeteset az 1.7. ábra mutat.

Az eredmények a következők:

- Elsősorban nagy illótartalmú szenek (lignit és barnaszén) a $0,25 \text{ mm}$ -nél nagyobb szemcsék esetében a szemcse gyulladása után kialvási és újragyulladási jelenség játszódik le, ami a



1.7. ábra. Szén szemcse égéséről optikai hőmérsékletméréssel felvett oszcillogram [4]

fás szerkezetű szemcsék esetén korábban, a bitumenes szerkezetű szemcsék esetén később figyelhető meg.

- Az égés további részében, a kokszzmaradvány kiégése során az érzékelt sugárzásintenzitás váltokozva csökken, illetve növekszik, ami fluktuáló égésre enged következtetni.

A jelenségek magyarázata: az első esetben a nagy illótartalmú szemcséből a nagy hőmérséklet hatására nagy sebességgel távoznak az illóanyagok vagy a kigázosodás során keletkező éghető gázok, majd a szemcse felületén meggyulladnak, részleges vagy teljes lángburok alakul ki a szemcse körül. A kiáramlási sebesség viszont nagyobb lehet, mint az illóanyagok égési sebessége, így a szemcse felületétől a láng eltávolodik, majd leszakad.

Irodalom az 1. fejezethez

1. REMÉNYI, K.: The Theory of Grindability and the Comminution of binary Mixtures. Akadémiai Kiadó, Budapest, 1974.
2. BEKE, B.: Aprításelmélet (Theory of size reduction). Akadémiai Kiadó, Budapest, 1963.
3. BASSA, G.: A porszénégetés elméletének gyakorlati alkalmazása (Practical application of the theory of pulverized-coal firing). Mérnöki Továbbképző Intézet, Budapest, 1961.
4. FÁY Gy. — ZSELEV B.: Az aprításelmélet alapjairól (On the theoretical bases of size reduction). Energia és Atomtechnika XIII (1960) 12.
5. FÁY Gy. — ZSELEV B.: A Kolmogorov-féle aprításelmélet kiterjesztése különböző fajsúlyú anyagok keverékének őrlésére (Extending of the size-reduction theory of Kolmogorov to the grinding of mixtures of different density). Energia és Atomtechnika XIV (1961) 12.
6. REMÉNYI, K. — VÖRÖS, L. — HORVÁTH, F. — VOLTAY, G.: Rational power-station utilisation of high ash and moisture content Hungarian brown coals in purpose built firing equipment. 13th Congress of the WEC, Cannes, 1986.
7. GRIMM, W.: Sauergetranke Russflocken in Feuerungabgasen — ihre Entstehung und Verhütung. VGB, 1963, February.
8. FRITSCH, W. H.: Zweistoffbrenner. Verlag A. W. Gentner KG, Stuttgart, 1964.
9. MON, E. — AMUNDSON, N. R.: Diffusion and Reaction in a Stagnant Boundary Layer about a Carbon Particle. 2. Ind. Ing. Chem. Fund. 17 (1978).
10. MORTON, W. — GOODMAN, M. G.: Transients and Oscillations in Heterogenous Catalysis. In: Modelling of Chemical Reaction System. Proc. of an International Workshop, Heidelberg, Sept. 1980. Springer-Verlag, 1981, pp. 253 — 260.
11. PETERS, H.: Large Activation Energy Asymptotics and Turbulent Combustion. In: Modelling of Chemical Reaction System. Proc. of an International Workshop, Heidelberg, Sept. 1980. Springer-Verlag, 1981, pp. 226 — 234.
12. REMÉNYI, K.: Analysis of ignition problems concerning stability of burners in pulverized coal combustion systems. Acta Technica Acad. Sci. Hung. 59/1-2 (1972).
13. HAMOR, R. J. — SMITH, I. W. — TYLER, R. J.: Combustion and Flame 21 (1973) 153 — 162.
14. REMÉNYI, K. — KERTÉSZ, V. — VÖRÖS, L. — HORVÁTH, F.: Dynamical behaviour of coal char particle combustion. Combustion and Flame, No. 76. June 1989, Elsevier, New York.
15. REMÉNYI, K. — KERTÉSZ, V. — VÖRÖS, F.: Coal-particle burning. Wave phenomena. The Eleventh National Conference on I.C. Engines and Combustion. Madras, India, dec. 11 — 15. 1989.
16. REMÉNYI, K.: Combustion Stability. Akadémiai Kiadó, Budapest, 1980.
17. REMÉNYI, K. — HORVÁTH, F.: Impulzusholográfia alkalmazása barnakőszén szemcsék égésfolyamatainak vizsgálatánál. Energiagazdálkodás, 1979, július.

18. HORVÁTH F.: Barnakőszén szemcsék égésének matematikai modellje az illó és a kokszt égés fázisában. VEIKI kutatási jelentés. 11-98-103-2, Budapest, 1972.
19. REMÉNYI K.: Általánosítható tüzeléstechnikai eredmények. Energia és Atomtechnika XXIX (1976) I. szám, 1–3.
20. REMÉNYI K. — HORVÁTH F.: Impulzusholográfia alkalmazása barnakőszén szemcsék égésfolyamatainak vizsgálatánál. Energiagazdálkodás, 1979. július.
21. KONDRATIEV, V. N.: Kinetika himicheskikh gazovih reaktsii. Izd. Akademii Nauk SSSR, Moskva, 1958.
22. CHANG, T. Z. — WALSH, P. M. — SAROFIM, A. F. — BEER, J. M.: Carbon monoxide burnout in fluidized coal combustion. Oxid. Commun. 5/3-4 (1983) 263–80.
23. YOUNG, C. H.: On the Explosion, Glow and Oscillation Phenomena in the Oxidation of Carbon Monoxide. Combustion and Flame 23 (1974) 97–108.
24. FIELD, M. A. — GILL, D. W. — MORGAN, B. B. — HAWKSLEY, P. G. W.: Combustion of pulverised fuel. B CURA Mon. Bull. 31 (1967) 193–218.
25. FIELD M. A.: Rate of combustion of size-graded fractions of char from a low-rank coal between 1200 K and 2000 K. Combustion and Flame 13 (1969) 237–252.
26. PALÓCZ M.: Holografikus interferometria és fényképezés alkalmazása a tüzeléstechnikai kutatásban (Application of holographic interferometry and photography in the research of firing technique).

2. SZÉNTÜZELÉSEK

Annak eldöntésére, hogy az adott szénfajta jó hatásfokú eltüzelésére milyen berendezés alkalmas, a szénjellemzőket nemcsak önmagukban, hanem több vonatkozásban is értékelni kell. Az értékelésnél figyelembe veendő szénjellemzők a következők:

- fűtőérték,
- összes és éghető illótartalom,
- nedvességtartalom,
- hamu,
- hamuösszetétel,
- szemcsézet,
- sülőképesség.

A fűtőérték nagysága önmagában ugyan nem döntő, mert rostélyon elvben minden szénfajta eltüzelhető, de értéke alapvetően meghatározza a tüzelőberendezés típusát, méreteit és elhelyezésének lehetséges módját (belső, alsó vagy előtűztűzelés).

A felhasználásra kerülő szén szemcsézetével szembeni követelmények rostélytípusonként eltérőek lehetnek, de egységes kíváncsom a homogén, adott szemcsehatárokon belüli szemnagyságra való osztályozottság. Az előkészítés ezenkívül a minőség szerinti szétválasztást és a meddőtlenítést is megköveteli. Mechanikus rostélyokon rendszerint a rostált darafrakciót tüzelik, ritkább esetben diószenet vagy brikettet. A szemcsehatár felfelé való eltolása növeli a gyúlási késedelmet, az egyes szemcsék égési idejét, tehát csökkenti a megengedhető rostélysebességet és rendszerint a berendezéssel elérhe-

tő teljesítményt is. Alapvető követelmény az osztályozás élessége, a pormentesség. A rostélyra kerülő 0–3 mm-es anyag növeli a rétegellenállást, a levegőelosztási egyenlőtlenséget, rontja a tüzelési hatásfokot.

A szén eltüzelésével kapcsolatban összefoglalóan az alábbi általános megjegyzéseket tehetjük.

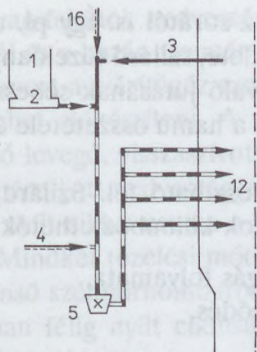
- A hazai szenek energetikai hasznosításának műszaki feltételei megteremthetők. A fluidizációs tüzelés megbízható aprószén-tüzelési móddá válik, gazdaságilag is elérhető.
- A darabos, osztályozott vagy minőségileg feljavított brikettált tüzelőanyagok még hosszú távon is a háztartások igényeinek kielégítésére szolgálnak.
- A tüzeléstechnika fejlődése reményeket kelt a környezetkímélő energetikai felhasználás megteremtésére.
- A szén eltüzelése ipari méretekben elsősorban gőz- és forróvíz-termelésre hasznosítható.
- Ipari vagy nagyobb kommunális kazánok tüzelőanyagaként a jövőben számításba vehető a központi szénelőkészítő művekben előállított és száraz por alakban kiszállított tüzelőanyag felhasználása is.

2.1. Szénportüzelési rendszerek és a szénporégők fejlesztése

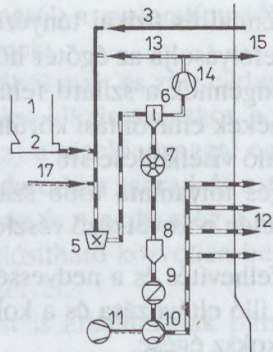
Az égők elrendezésére számos lehetőség kínálkozik. Az elrendezés megválasztása azonban alapvetően megszabja a berendezésben kialakuló áramlási, hőfelszabadulási és üzemi viszonyokat. A jelenleg használatos legfontosabb elrendezések a 2.1. ábrán láthatók [3].

A tüzelőanyag a tüzelés folyamán a nyers állapottól a végső égéstermékig lényegesen átalakul.

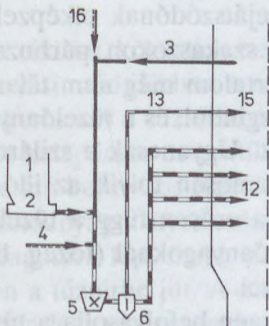
Ez vonatkozik nemcsak az éghető részekre, hanem a tüzelőanyag ásványianyag-tartalmára is. A tüzelőberendezésben végbemenő folyamatok mennyiségi és minőségi jellemzői nemcsak a tüzelőberendezés konstrukciójától és a tüzelőanyag jellemzőitől függnek, ha-



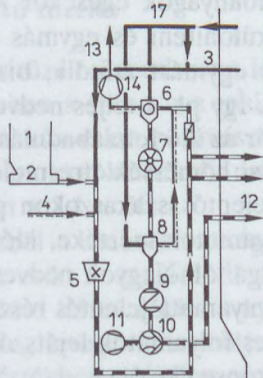
a)



c)



b)



d)

2.1. ábra. Szénportüzelési rendszerek kapcsolási vázlata (EVT) [3]:

- a) közvetlen befűvés páraleválasztás nélkül,
- b) közvetlen befűvés páraleválasztással,
- c) közvetett befűvés páraleválasztással,
- d) félig nyílt ciklusú tüzelés páraleválasztással

1- nyersszén, 2- szénadagoló, 3- füstgáz, 4- hideg levegő,
 5- malom, 6- leválasztó, 7- cellás adagoló, 8- közbenső bunker,
 9- adagoló, 10- szállítófűvóka, 11- meleglevegő-fűvó, 12- szénporégő,
 15- 13- pára, 14- ventilátor, páraégő, 16- meleg levegő,
 17- hideg füstgáz

nem a kémiai és fizikai tényezők egész sorától is. Így pl. az égést erősen befolyásolja az égőtér hőmérséklete, szilárd tüzelőanyag esetén az oxigénnek a szilárd felülethez való jutásának sebessége, az égéstermékek eltávolítási körülményei, a hamu összetétele és a tüztérben való viselkedése stb.

Az égés folyamata több szakaszra osztható fel. Szilárd tüzelőanyag esetén a következő részfolyamatok különböztethetők meg:

- a felhevítés és a nedvességpárologás folyamata,
- az illó eltávozása és a kokszképződés,
- a koksztégése,
- salakképződés.

A tüzelőanyagok égésekor a részfolyamatokat nem lehet egymástól elkülöníteni és egymás után lejátszódónak elképzelni, hanem azok egymást átfedik, bizonyos szakaszokon párhuzamosan folynak le. Így pl. a teljes nedvességtartalom még nem távozott el, amikor már az illó felszabadulása is megindul, és a tüzelőanyag már a gyulladás hőmérsékletre melegedett. Ugyancsak a szilárd koksztégése is jelentős szakaszokon párhuzamosan folyik az illó égésével. A folyamatok mértéke, időtartama erősen függ a tüzelőanyag tulajdonságaitól. Nagyon nedves tüzelőanyagoknál (tőzeg, lignit) a száradás folyamata jelentős részt igényel.

Az egyes folyamatok lejátszódását igen befolyásolja a tüzelőberendezés konstrukciója.

A szénpor-előkészítő rendszerek két fő csoportját különböztetik meg aszerint, hogy milyen rendszerű a szén előkészítése.

A központi szénelőkészítő rendszer az egész erőmű több kazánberendezése részére külön üzemben készíti elő a szénport.

Az egyedi szénelőkészítő rendszernél minden kazánberendezésnek saját aprító és előkészítő berendezése van.

A központi rendszert csak kisebb teljesítmények esetén, régebben alkalmazták, de a szénpor tárolásának és szállításának problémái miatt gyakorlatilag teljesen kiszorultak. Az egyedi szénelőkészítő rendszer egyszerűbb, olcsóbb, üzembiztosabb és kisebb üzemeltetési költséget igényel.

Az egyedi szénelőkészítő rendszer felépítése és berendezései a

tüzelőanyag-fajtától, nedvességtartalmától, a malomtípustól, a tűztértípustól és a kazán üzemétől függenek.

A szénport a szárítógáz szempontjából nyílt és zárt ciklusú séma szerint lehet előkészíteni. A zárt ciklus alkalmazásakor a szárítógáz (forró levegő, visszaszívott füstgáz) a tüzelőanyaggal együtt, az abból kipárolgott nedvességgel a rendszerben marad és a tűztérbe kerül. A nyílt ciklus esetén a szárítógáz és a nedvesség a szabadba távozik. Mindkét tüzelési mód megvalósítható közvetlen befúvással és közbenső szénporhombáros rendszerrel.

Újabban félig nyílt ciklusú tüzelést is alkalmaznak párasztévtálasztással kombinálva.

2.1.1. Zárt ciklusú tüzelés

A zárt ciklusú, közvetlen befúvásos tüzelési rendszer a legegyszerűbb tüzelési mód. Ebben a rendszerben a szénpor a malomból az égőkön keresztül a tűztérbe kerül. A közvetlen befúvásos tüzelési rendszert kalapácsos és ventilátormalmokkal valósítják meg.

Közvetlen befúvásos tüzelést mutat a 2.1.a. ábra.

A tüzelőanyag a nyersszénbunkerből a szénmennyiséget szabályozó adagolóra lép, majd malomba esik. A malomból a szénpor közvetlen a tűztérbe jut. A malom előtti hőmérséklet a nyomóventilátor után leágasztatott meleg és hideg levegővel szabályozható. A malomban szükséges áramlást kismértékben a malom ventilációja vagy kalapácsos malomnál külön nyomóventilátor biztosítja.

Ezzel a tüzelési rendszerrel barnaszén 30–40%, tőzeget 55% nedvességtartalomig lehet eltüzélni.

A kazán teljesítménye a malmok teljesítményszabályozásával, azaz a malomban adott nyersszén mennyiségével szabályozható. Ha nagyobb őrlési finomságot követelnek, akkor a malomra légszért szerelnek fel.

Ha a nagy nedvességtartalmú szénnek zárt ciklusú rendszerben való tüzelésénél a teljes szárítógáz-szénpor keveréket közvetlenül a tűztérbe juttatják, szénveszteség ugyan nincs, de a keverékben lévő nagy páratartalom rendkívül kedvezőtlenül befolyásolja a gyulladási viszonyokat, emellett a berendezés méretei is megnövekszenek.

szenek. Éppen ezért nagy nedvességtartalmú szénknél ezt a módszert úgy is alkalmazzák, hogy a malom után a szénporvezetékben két részre választják a szárítógáz-szénpor áramot, mégpedig a nagyobb szénszemcséket tartalmazó, kisebb nedvességtartalmú áramra, amely a szénpor mennyiségnek kb. 80%-át tartalmazza, és ezt a részt a tüztér alsó részén fűjják be a fő égőkön keresztül, viszonylag kedvező gyulladási feltételek mellett.

A másik részt, amely nagy páratartalmú és a szénpornak kb. 20%-át tartalmazza, a tüztér felső részén mellékégőkön keresztül fűjják a tüztérbe. Ennek következtében ez a felső részen befűjt áram a gyulladási feltételeket kevésbé befolyásolja, és a szénvesztéseket, amely a nyílt ciklusú rendszernél van, teljes egészében elkerüljük. Minthogy azonban a pára mégis bejut a tüztérbe, az ezzel járó hátrányok lényegileg megmaradnak (2.1.b. ábra).

A félig nyílt ciklusú tüzelésű kazán tüzelési rendszerének vázlata a 2.1.d. ábrán látható. A malom után beépített fix szétválasztó berendezés a gáz-pára áramot megosztja. A mennyiség kb. 2/3 része, amiben a szénmennyiség 1/3 része van, a páraciklonba, onnan nyomásfokozó ventilátoron át a pára-elektrofilterbe kerül. A ciklon leválasztási foka 80% körül van, a pára-elektrofilter pedig a megmaradó szénpor 99,9%-át leválasztja. A tisztított gáz a pára-elektrofilterből a szabadba kerül, a leválasztott szénpor pedig cellás adagolón és gyorsító venturifúvókán keresztül ventilátor által szállított levegő továbbításával a főégők alatt elhelyezett páraégőkhöz jut. A malom által szállított mennyiség fennmaradó 1/3 része a szénmennyiség 2/3 részét közvetlenül a főégőkbe juttatja. A páraégőkön bejuttatott, finom kiörlésű és nagymértékben szárított szénpor ideális tartós támasztólángot ad a főégők számára. A malom utáni hőmérsékletet recirkulációs ventilátor által szállított hideg füstgázzal szabályozzák, így az inert gázállapotot minden üzemállapotban a CO_2 -gáz adja.

Az ismertetett rendszerrel nagyon stabil lángot, pulzálásmentes tüzet és kedvező részterhelési tulajdonságokat lehetett elérni. A kazán 3600 kJ/kg fűtőértéknél még olajtámasztás nélkül tud 50% részterhelést vinni.

2.1.2. Nyílt ciklusú tüzelés

A teljesen nyílt ciklusú tüzelés egyik igen gazdaságos megoldásánál a szenet a távozó füstgázok szárítják, ami után a szabadba távozik.

A tüzelőanyag a nyersszénbunkerből az adagolón keresztül a malomaknába kerül. A malomaknába a teljes távozó füstgázmennyiség áramlik, amit előzőleg a pernyétől megtisztítottak. A malomban őrlődik, szárad a tüzelőanyag. A szárító gázárammal a légszérből kilépő kész por a porleválasztóba kerül, ahol leválik, és a szárítógáz a vízgőzzel a szabadba távozik.

A leválasztott szénpor a szénporbunkerbe jut, ahonnan a szénporadagolón keresztül a primer levegővel az égőkhöz, majd a tűztérbe kerül.

Ebben a rendszerben a távozó füstgázok hőmérsékletét 70–80 °C-ra le lehet csökkenteni, így a füstgázzal távozó hőveszteség igen lecsökken. Nagyon nedves tüzelőanyagoknál a kazánból kilépő gáz hőmérséklete — ami a malomban szárít — 250–350 °C. Ezzel a kazán utófűtő felületei lecsökkennek, és így a beruházási költség is csökken. A tűztérbe száraz tüzelőanyag kerül, az égési viszonyok javulnak. A nyílt ciklusú tüzeléskor azonban igen lényeges a szénporleválasztás hatásfoka, és nagyobb legyen, mint 98%.

2.2. Tüzeléstechnikai fejlesztések a Mátrai Erőműben

A szénülés kezdeti (biokémiai) szakaszában lévő, pannonkorú lágy barnakőszeneinkre — mint a visontai lignit is — a nagy szervesetlen ásványianyag-tartalom jellemző. A szervesetlen ásványok jelentős hányadát az agyagásványok, s ezek közül is a speciális tulajdonságokkal rendelkező montmorillonit képezi. Ez a tény ligniteink értékét kedvezőtlenül befolyásolja, felhasználási lehetőségeinek körét csökkenti.

A visontai lignit külfejtéses bányából származó tüzelőanyag. A minőségét és tüzeléstechnikai viselkedését döntő mértékben meg-

határozza a lignitlepek réteges geológiai elhelyezkedése, mely viszonylag magas és ingadozó hamutartalom formájában mutatkozik. A lignitlepek vastagsága 2-3 méter és 10–15 méter között ingadozik. Gyakori a vastagabb telepek több rétegre való szétválása. Jóllehet, ha az egyes fejtésre alkalmas lignitfalat közelebbről vizsgáljuk, szembeötlik, hogy a látszólag egységes telepek önmagukban is rétegesek. Az éghető részeket tartalmazó rétegek vastagsága 0,2–0,3 m-től 1–2 m-ig változik, ezeket a képződményeket esetenként 0,2–1 m-es köztes meddő rétegek választják el egymástól. Az éghető rész rendkívül szálás, fás, xilites szerkezetű, nehezen őrlhető anizotrop anyag.

A visontai lignitre jellemző a magas hamutartalom mellett a magas nedvességtartalom is. Ez szintén a bányaművelési technológiával függ össze.

A lignit az erőműbe törőműn át érkezik, szemcsemérete 0–40 mm. A visontai lignit főbb anyagjellemzői:

Alsó fűtőérték: $H_i = 6196 \text{ kJ/kg}$ (5200–7100 kJ/kg).

Elemi analízis:

nedvesség	$n = 48,7\%$ (42–49%),
hamu	$h = 20,2\%$ (18–35%),
kén	$S = 0,8\%$,
hidrogén	$H = 1,7\%$,
carbon	$C = 19,7\%$,
nitrogén	$N = 0,4\%$,
oxigén	$O = 8,5\%$.

Hamujellemzők:

SiO_2 -tartalom	64,0%,
Al_2O_3 -tartalom	21,0%,
TEUNE-szám	7,6%.

Leitz-vizsgálattal meghatározott hőmérsékletek (oxidáló atmoszféra/redukáló atmoszféra):

zsugorodáspont	940/ 940 °C,
lágyláspont	1140/1100 °C,

olvadáspont
folyáspont

1240/1130 °C,
1280/1160 °C.

A GHV 320 t/h és 620 t/h kazánjai 4-4, illetve 8-8 azonos típusú tüzelőkörrel, illetve 2-2 db utóégető rostéllyal rendelkeznek. Tüzelőköreink közvetlen befűvások zárt ciklusúak. Minden tüzelőkör 1 db nyersszéntároló hombárból, kaparóláncos adagolóból, ventilátor-malomból, páraszétválasztóval ellátott szénporvezetékéből, sugáregőből és forró füstgázt visszaszívó aknából áll [6].

A tüzelőrendszer a nyugatnémet EVT licenc alapján készült. Ezen belül az N 170.50 típusú ventilátor-malmot az VT cég tervei alapján teljes egészében a Dunai Vasmű gyártotta.

A kazánok üzemeltetésének kezdetekor legnagyobb problémát a tüzeléstechnikai illesztés hiánya okozta.

A rajnai barnaszenek tüzelésére kifejlesztett rendszer a visontai lignit felhasználásakor nem vált be.

A pára- és főégők csatornáinak porkoncentráció-mérései kimutatták, hogy az eredeti páraszétválasztó működése sem gáz-, sem porszétválasztás szempontjából nem kielégítő.

A páraszétválasztót 20/40°-os lapátokkal látták el és a merülő-csővet rövidítették (2.2. ábra). A páraszétválasztó fő jellemzői:

— gázsétválasztás:

páraégő 40–45%,

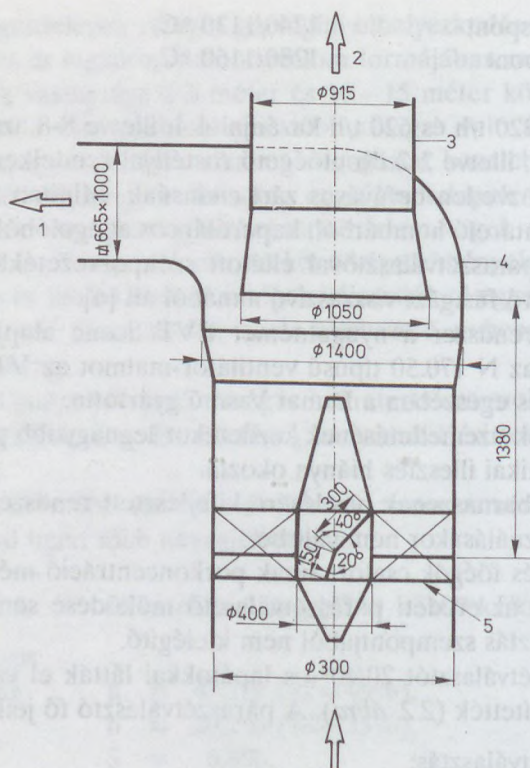
főégő 55–60%;

— porszétválasztás:

páraégő 5%,

főégő 95%.

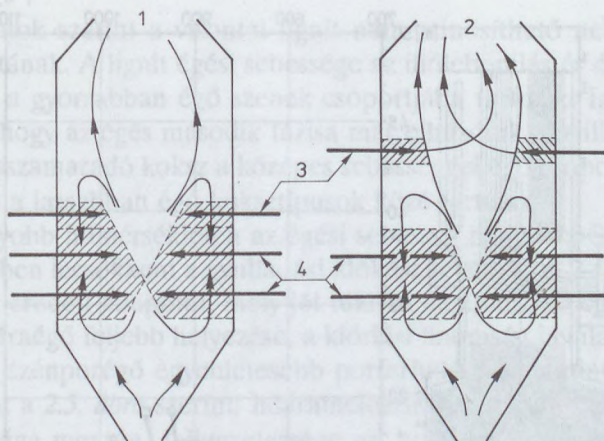
Az EVT, a kazán tervezője, a páraégőt a főégő fölé, de közvetlen mellé helyezte, a páraégő befűvási iránya párhuzamos volt a főégő-kével. Abban az esetben (pl. Yallourn), ha a páraégőt a főégőktől távolabb, magasabban helyezik el, akkor a páraégő megdöntésével ütközteti a páraégő és a főégők sugarát. Ebből egyértelműen az tűnik ki, hogy igyekeznek a páraégő sugarát minél előbb bekeverni a fő sugarba. Így a páraégő alkalmazásának hatása csak közvetlenül



2.2. ábra. A páraszétválasztó továbbfejlesztett változata 20/40°-os lapátokkal [6]

1- főégő felé, 2- páraégő felé, 3- merülő cső,
4- porkoncentrátor fej; 5- perdítő lapátok

a főégők előtti térrészben érvényesülhet. Ezzel a páraégő-elhelyezéssel a nehezen gyulladó nedves és durva lignit lángját nem lehet a főégőkhöz közel stabilizálni. Lényegében így a páraszétválasztó alkalmazásával gondosan különválasztott ballasztós páraegő a tűztérben a gyulladás előtt a főégők közegével újra összekeveredik. A páraszétválasztás lángstabilizáló hatása nem vagy csak erősen csökkentett mértékben érvényesül.



2.3. ábra. A tűztéri áramlás vázlata [6]

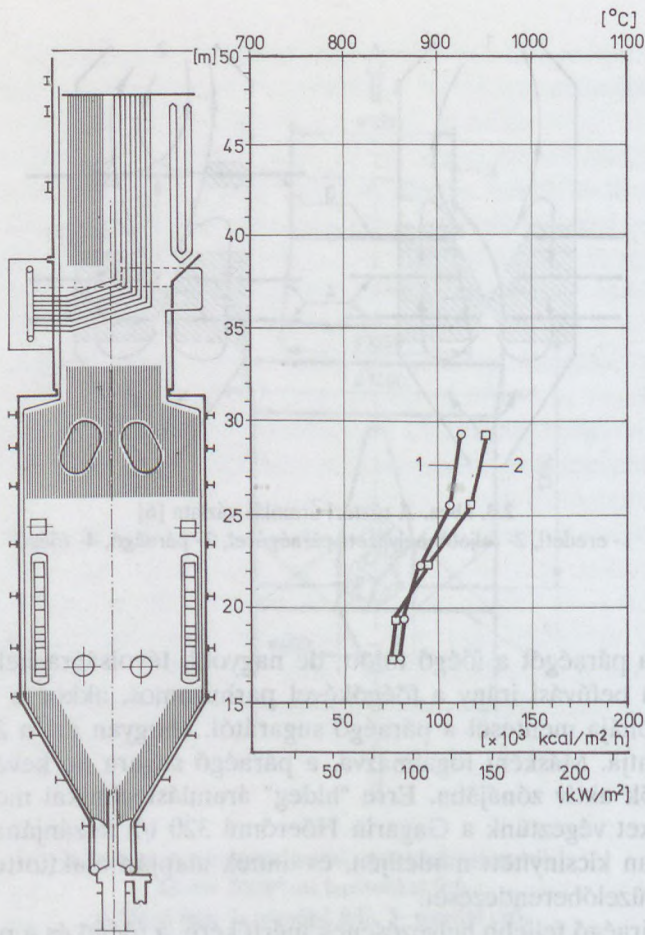
1- eredeti, 2- feljebb helyezett páraégővel, 3- páraégő, 4- főégő

Ha a páraégőt a főégő fölött, de nagyobb távolságra helyezzük el, és a befúvási irány a főégőkével párhuzamos, akkor a főégők aktív zónája mentesül a páraégő sugarától, ahogyan ezt a 2.3. ábra mutatja. Másként fogalmazva, a páraégő sugara ne keveredjen a főégők aktív zónájába. Erre "hideg" áramlástechnikai modellkísérleteket végeztünk a Gagarin Hőerőmű 320 t/h kazánjának 1:15 arányban kicsinyített modelljén, és ennek alapján alakítottuk át a kazán tüzelőberendezését.

A páraégő feljebb helyezésének mértékére, a főégő és a páraégő középvonaltávolságára, a modell alapján 4,5 m bizonyult megfelelőnek. Kazánszerkezeti okokból végül is ez 5,43 m lett a végleges megoldásnál.

A következő előnyök származnak abból, ha a főégők aktív zónáját mentesítjük a párasugár bekeveredésétől:

- az aktív zónában felszabadult hőmennyiségnek kevesebb gázt kell felmelegítenie, tehát ebben a zónában nő a hőmérséklet;
- az aktív zónában kevesebb gázhoz keveredik a szekunder levegő, tehát az oxigénkoncentráció nő.



2.4. ábra. Tüztéri hőfluxuseloszlás a rekonstrukció előtt [6]
1- hőfluxus, 2- hőmérséklet

Mind a hőmérséklet-emelkedés, mind az oxigénkoncentráció növekedése az égés feltételeit javítja, nő az égési sebesség.

Különböző hazai szénfajtákkal azonos feltételek (szemcseméret, gázhőmérséklet, oxigénkoncentráció) mellett végzett égésssebesség-

vizsgálatok szerint a visontai lignit nem minősíthető nehezen égő szénfajtának. A lignit égési sebessége az illólebomlás és égés szakaszában a gyorsabban égő szenek csoportjába tartozik. Igaz ugyanakkor, hogy az égés második fázisa már elhúzódik. Az illólebomlás után visszamaradó koksza a közepes sebességgel égő csoportba, ezen belül is a lassabban égő koksztípusok közé tartozik.

Nagyobb hőmérsékleten az égési sebesség nagyobb. Számottevő mértékben lecsökkent a gyulladási időkéselem is. A 2.4. ábra adja meg az eredeti állapotot, mely jól tükrözi az elhúzódó égést.

A páraégő feljebb helyezése, a kiörlési finomság javulása, a felső és alsó szénporégő egyenletesebb porterhelése, valamint a gyújtóboltozat a 2.5. ábra szerinti hőárameloszlást eredményezte a tüztér magassága mentén. Jellegzetessége az, hogy az aktív zóna felett a hőáramértéke elér egy maximális értéket, majd a tüztérkilépés irányában monoton csökken.

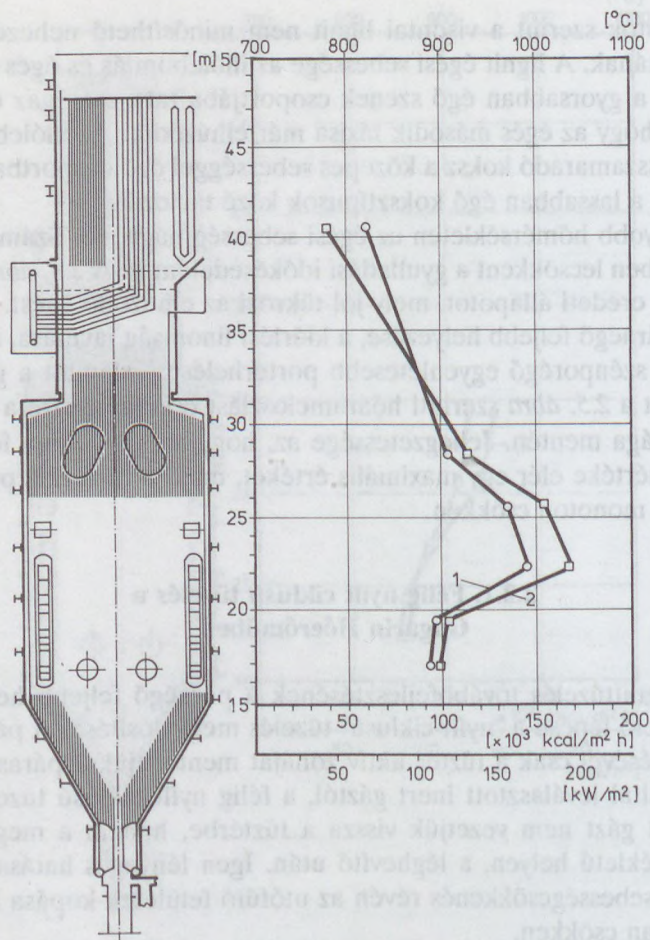
2.2.1. Félig nyílt ciklusú tüzelés a Gagarin Hőerőműben

A lignittüzelés továbbfejlesztésének a páraégő feljebb helyezését követő lépése a "nyílt ciklusú" tüzelés megvalósítása. A páraégő felemelésével csak a tüztér aktív zónáját mentesítjük a párasztévalasztó által leválasztott inert gáztól, a félig nyílt ciklusú tüzelésnél az inert gázt nem vezetjük vissza a tüztérbe, hanem a megfelelő hőmérsékletű helyen, a léghevítő után. Igen lényeges hatása még, hogy a sebességcsökkenés révén az utófűtő felületek kopása hatványozottan csökken.

Páraégőként ciklonégőt építünk be, amely a páraágban maradt szénport leválasztja és azt előmelegített levegővel a tüztérbe juttatja. A ciklonégő alkalmazásával a szokásos megoldásoknál lényegesen egyszerűbb rendszert nyerünk (2.6. ábra).

Így azon túlmenően, hogy a gyulladás és égés körülményei a tüztérben javulnak, az átáramló füstgáz csökkenésével a kopások is lényegesen csökkennek a kazán II. huzamában.

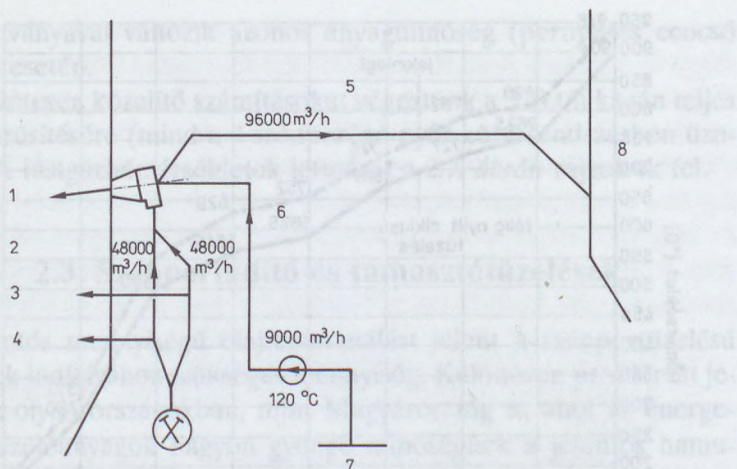
Páraégőként szeparátoros örvényégőt terveztünk, amely a pára-



2.5. ábra. Tüztéri hőfluxuseloszlás a rekonstrukció után [6]
1- hőfluxus, 2- hőmérséklet

ágban maradt szénport leválasztja és azt előmelegített levegővel a tüztérbe juttatja. Az ilyen égő alkalmazásával a szokásos megoldásoknál lényegesen egyszerűbb rendszert nyerünk.

Páraégőként 2 db 2,5 MW_t hőteljesítményű szeparátoros örvény-



2.6. ábra. Félig nyílt körű szénportüzelési rendszer szeparátoros örvényégővel [11]

1- páraégő, 2- tüztér, 3-4- főégők, 5- tisztított paraméterek, 6- szénporos páravezeték, 7- levegő, 8- a kazán második huzama

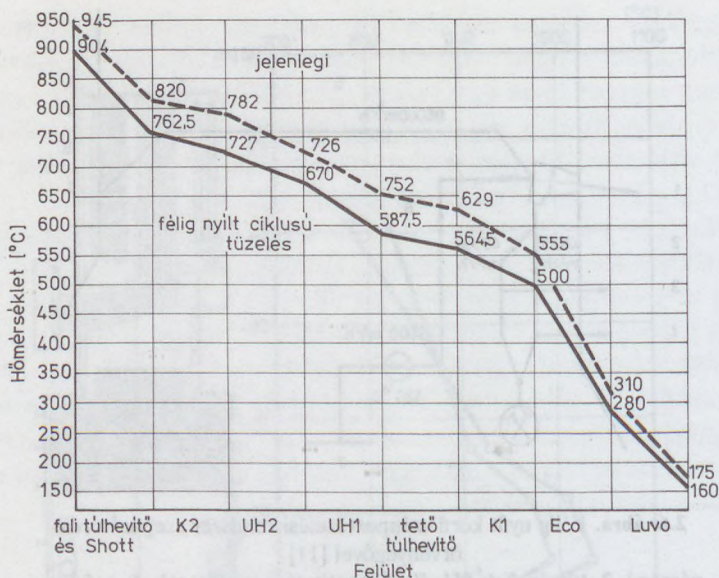
égőt alkalmaztunk. $240 \cdot 10^3 \text{ m}^3/\text{h}$ malom-ventilációból kiindulva, 60/40 gázzétválasztásra, 95/5 porszétválasztásra és 50 t/h maximális malom órlési teljesítményre számítva, 1 db égő főbb műszaki adatai:

- hőteljesítmény $2,5 \text{ MW}_t$,
- gázmennyiség $48 \cdot 10^3 \text{ m}^3/\text{h}$,
- égési levegő $4,5 \cdot 10^3 \text{ m}^3/\text{h}$ (120°C), ($m=1,25$ légfesleg-té-nyező).

Az égési levegőt a 120°C hőmérsékletű rostélylevegőre csatlakozó átemelő ventilátor biztosítja, $2 \times 4500 = 9000 \text{ m}^3/\text{h}$ mennyiségben.

Az égőben leválasztott szénport az égési levegő szállítja a tüztérbe, ahol 1,25-szörös légfesleggel elégeti.

A ciklonból távozó tisztított gázt $2 \times 48\,000 = 96\,000 \text{ m}^3/\text{h}$ mennyi-



2.7. ábra. A hőmérséklet-változások a jelenlegi és félig nyílt ciklusú tüzelésnél [11]

ségben az ecoba kötöttük be. A jobb leválasztási hatásfok érdekében a ciklonégő gázkivezetését perdületdiffúzorral láttuk el, amely a tangenciális kilépés miatt az ecoba való bekötésnél is előnyös, mert kisebb a helyszükséglete.

A ciklon leválasztási hatásfoka javításának különösen nagy jelentősége van, mivel a tisztított gázzal távozó — le nem választott — szénpor az ecoba kerül és a kazán tüzelési hatásfokát rontja. Ezzel szemben áll a távozó füstgázvesztesség-csökkenés a távozó füstgáz alacsonyabb hőmérsékletének következményeként. Az eredő kazánhatásfok-változást csak mérésekkel lehet eldönteni.

A nyíltkörűsítés nagy előnye, hogy a szeparátoros örvényégőből kikerülő tisztított gáz a kazán II. huzamát megkerüli, így ott az áramlási sebesség csökkenése miatt a kopások, elsősorban az eco kopása jelentősen lecsökken. A kopás az áramlási sebesség 2,5-

dik hatványával változik azonos anyagminőség (pernye és ecocső anyag) esetén.

Előzetesen közelítő számításokat végeztünk a 320 t/h kazán teljes nyíltkörűsítésére (mind a 4 szénporérgő nyílt körű rendszerben üzemel). A füstgázhőmérsékletek lefutását a 2.7. ábrán rajzoltuk fel.

2.3. Szénporindító és támasztótüzelések

Jelentős mennyiségű olajfelhasználást jelent a szénportüzelésű kazánok indításához szükséges mennyiség. Különösen problémát jelent ez olyan országokban, mint Magyarország is, ahol az energetikai tüzelőanyagok nagyon gyenge minőségűek a jelentős hamu- és nedvességtartalom miatt. Különösen a hideg kazánok indításakor kell nagy mennyiségű olajat felhasználni, amíg az őrlési, tüzelési rendszer és a kazánberendezés olyan hőmérsékletre melegszik fel, amikor a szénporérgők üzembe vehetők. Kézenfekvő a gondolat, hogy az indítás teljes szakaszában, vagy minél előbb, szénporral történjék a tüzelés. Ehhez a kazán szénélőkészítő rendszerétől független szénporrendszert kell biztosítani. Az indító tüzelésekkel szemben a következő legfontosabb követelmények támaszthatók [8–11]:

- az indító tüzelésnek a gőzkazánt olyan mértékben kell felmelegítenie, hogy a főérgők üzembe helyezhetők legyenek;
- a kazán paraméterei, elsősorban a levegő-előmelegítési hőmérséklet és a szénszárításhoz felhasznált füstgázhőmérséklet kielégítőek legyenek;
- a főérgők stabil lángját biztosítsa az indítás során és alacsony kazánterhelés mellett;
- az indítógőgnek alacsony levegő-előmelegítési hőmérséklettel kell tudni üzemelni;
- kedvezőtlen tüzelési körülmények között is kielégítő tüzelőanyag-hasznosítást biztosítsanak;
- viszonylag egyszerűen üzembe helyezhetők legyenek.

Az előzőekben felvázolt feladatok megoldására különböző tüze-

lési rendszereket és különböző, részben a tüzelési rendszerrel összefüggő megoldásokat alkalmaznak. A szénporindító tüzelési rendszer alapproblémáját a szénporforrás jelenti. Egy 815 t/h gőzteljesítményű kazán indításához és kb. 20% hőteljesítményű felterheléséhez 17 000 kJ/kg fűtőértékű szénből kb. 120 t szükséges, és kb. 30 percig 50 t/h maximális szénporteljesítményt kell a kazánba betáplálni az indítási szakasz utolsó fázisában. Ilyen mennyiségű szénpor tárolása önmagában is problémát jelent a közbenső szénportárolós rendszereknél. Az indító tüzeléseknél tehát az utóbb említett

- közbenső szénportárolós rendszert és
- a szomszédos kazántól elvételezett szénporos rendszert alkalmazzák.

A közbenső tárolás jelentős biztonságtechnikai problémákat vet fel. A szénporbunkert és -rendszert inert gázzal kell védeni, a bunkereket nagy nyomásra, 0,8 MPa értékre kell méretezni stb. E megoldásnál vagy nagyszámú szénporbunker adódik a kívánt szénmennyiség tárolására, vagy igen nagy méretek.

Ezért nagy teljesítményű kazánoknál az üzemben lévő szomszédos kazánról történő indítást lehet kedvezően megvalósítani.

A szénporindító rendszer lényeges eleme az égő. Ismeretes olyan megoldás, ahol a szénporgyújtó égőt a fő égőbe integrálva építik.

A hazai fejlesztések a külföldiekkel egy időben elindultak, és legfőbb szempont a viszonylag egyszerű tüzelési rendszer, továbbá széleskörűen alkalmazható égő létrehozása volt.

A hazai energetikai tüzelőanyagok gyenge minősége és nagyobb kazánteljesítmények esetén nagy mennyiségű szénpor elhelyezéséről kell gondoskodni. Ez kevésbé robbanásveszélyes feketeszenek esetében megoldható, de a fiatalabb barnaszenek és lignitek biztonságos deponálása nehézségekkel jár. A kiszáritott szénpor robbanásveszélyes, a tárolóból a kazánhoz történő szállítása is csak inert anyaggal, pl. gőzzel valósítható meg, ami viszont a gyulladási viszonyokat rontja.

Az indító szénporégővel szemben támasztott követelmények rendkívül szigorúak. A Villamosenergia-ipari Kutató Intézetben az ismert égőtípusok kritikai elemzésével olyan égőkonstrukció meg-

valósítására került sor, mely hideg tüztér mellett is biztosítja a rendelkezésre álló szénpor gyulladásának és égésének kedvező feltételeit. A szeparátoros örvényégőnek nevezett égőtípus üzemeltetéséhez szükséges feltételek az energetikai objektumoknál rendelkezésre állnak, beépítésük problémamentes. Egyaránt alkalmazható a központi szénportárolással és egyéb külső szénporforrások felhasználásával kialakított begyújtórendszereknel és támasztótüzelésként.

A következőkben mindkettőre mutatunk példát egy 620 t/h gőzteljesítményű, lignittüzelésű kazánnál megvalósított, szénporral működő rendszer ismertetésével, továbbá támasztótüzelésre gyenge minőségű, nagy hamutartalmú barnaszén tüzelésére.

2.3.1. Elméleti alapok, tüzelési megfontolások

Egy hideg kazántüztérben stabil lángot biztosító égő kialakításához felül kellett vizsgálnunk a konstrukcióval, a működtetés körülményeivel befolyásolható hatásokat. Minthogy a begyújtóégőt lignittüzelésű kazánra terveztük, így a konkrét vizsgálatokat és számításokat magyar lignitekre végeztük el. A szénpor nedvességeként és kiörlési finomságaként a rendelkezésre álló örlő-szárító rendszer képességeit kellett alapul vennünk.

A begyújtóégő konstrukciójának kialakításánál az örvényes áramlás biztosítását tűztük ki célul, mert egyrészt a kialakuló lángon belüli áramlási-keveredési viszonyok kedvezőek a stabil gyulladáshoz, másrészt a láng nagy mennyiségű tüztéri gázt kever magába, és így a tüztér felfűtése kis hőveszteség mellett a lehető leggyorsabb. A felfűtés gazdaságosságát és gyorsaságát azáltal is fokozzuk, hogy a befűvott szénpor tökéletes kiégéséhez szükséges levegőmennyiségnek csak a felét visszük be a tüztérbe az égőn keresztül. Az égéshez szükséges hiányzó levegő mennyiségét a hideg tüztérből a lángba bekeveredő gáztömeg levegőtartalma pótolja. Ezáltal a tüztérből kilépő és részben felfűtött gázok által képviselt hőveszteséget lényegesen csökkentjük.

A stabil láng kialakulásában, ismert módon, jelentős szerepük van a tüzelőanyag fizikai-kémiai jellemzőinek és reakcióképességének, a hőmérsékletnek, továbbá az éghető keverékben a tüze-

lóanyag és az oxidálószer koncentrációjának és a keveredési folyamatoknak [2, 3].

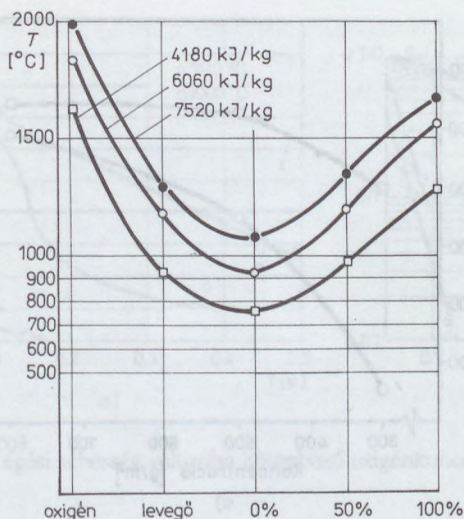
Általában a különböző minőségű szénfélések, de különösen a nagy nedvességtartalmú lignitek tüzelése a tűztérből elszívott szárítógázzal, a malomban történő szárítást és őrlést követően, a tűztérbe való közvetlen befúvással történik. Az égési térbe jelentős mennyiségű inert gáz kerül, amely csökkenti az oxigénkoncentrációt, a szénpor-koncentrációt, az égési hőmérsékletet. A tüzelőanyag-tól függő oxigénkoncentráció alatt gyulladás létrejötte nem is lehetséges. A szárítógáz-befúvás hatását a 2.8. ábra szemlélteti. Az ábra görbéi a különböző fűtőértékű lignitek adiabatikus égési hőmérsékletének változását mutatják, ha a nyers szenet oxigénben, környezeti levegőben vagy a szárító füstgáz valamilyen módszerrel történő 0, 50, 100%-os eltávolításával égetjük el. Az adott szén átlagminőségének jellemzői:

- fűtőérték 6060 kJ/kg,
- nedvesség 44%,
- hamutartalom 25%.

A szárítógáz 50%-os eltávolítása is már az égési hőmérséklet jelentős növekedését okozza. Különösen jelentős ez a tüzelés stabilitása szempontjából, amikor a kazán indítási szakaszában a hideg tűztérben kívánunk mielőbbi szénportüzelést megvalósítani. Az elméleti égési levegővel történő tüzelés és a 100%-os szárítógáz-leválasztás melletti tüzelés közötti lényeges különbséget az adja, hogy míg az előbbinél a szén nedvessége csökkenti az égési hőmérsékletet, az utóbbinál a szárítógázzal ennek jelentős részét eltávolítjuk.

Jelentős paraméter az égés lefolyásában az éghető anyag koncentrációja, melyet alkalmas módon történő szárítógáz-leválasztással és primerlevegő-bekeveréssel tág határok között változtatni lehet. A koncentráció szerepét a szénpor-levegő keveréknek "robbantóbombában" történő elégetésekor a nyomásváltozási sebesség alapján értékeljük.

A robbantóbomba 70 dm^3 térfogatú, pirotechnikai gyújtású zárt edény. A nyomásváltozás $\Delta p_{\max}$ értékét, a $\Delta p_{\max}/\Delta t$ átlagos és $(dp/dt)_{\max}$ maximális nyomásváltozási sebességeket a 2.9. ábra mu-

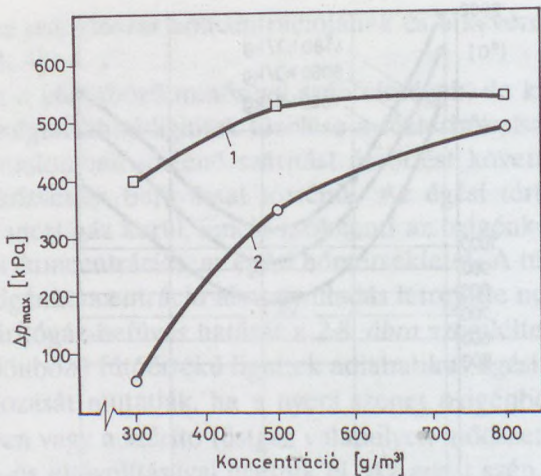


2.8. ábra. Az elméleti égési hőmérséklet változása a szénőrlés tüztérből visszazívott száritógáz mennyiségének függvényében [23]

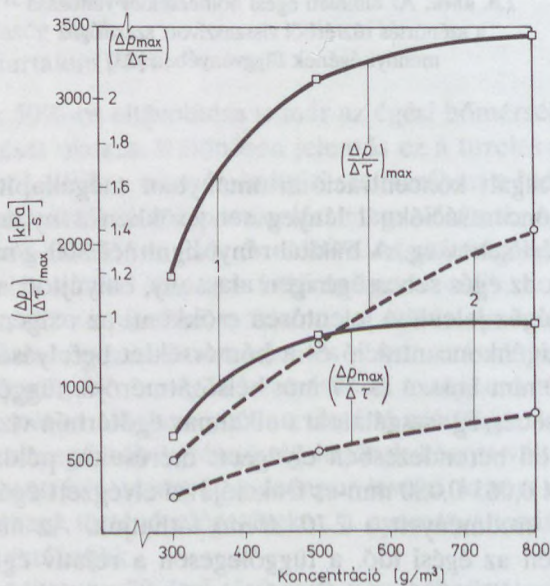
tatja. A vizsgált koncentrációtartományban megállapítható, hogy alacsony koncentrációknál lényegesen csökken a nyomásváltozás, azaz az égési sebesség. A bükkábrányi lignitnél 300 g/m^3 koncentrációnál pl. az égés sebessége igen alacsony, elnyújtott az égés.

A száritógáz jelenléte jelentősen csökkenti az oxigénkoncentrációt. Az oxigénkoncentráció és a hőmérséklet befolyását laboratóriumi, 2100 mm hosszú és 57 mm belső átmérőjű, függőleges helyzetű, égésssebesség-vizsgálatokra alkalmas égőtérben vizsgáltuk.

A kísérleti berendezésben elvégzett mérésekre példaként a viszontai lignit 0,063-0,080 mm-es frakciójával elvégzett égési sebesség vizsgálatok eredményeit a 2.10. ábrán láthatjuk. Az ábra vízszintes tengelyén az égési idő, a függőlegesen a relatív éghetőanyag-maradvány található. A görbék számszerűen mutatják, hogy az oxigéntartalom növelésével az égés sebessége milyen mértékben növelhető.



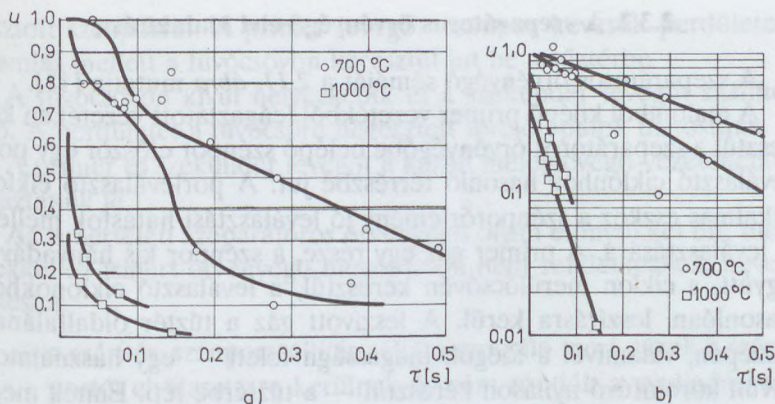
a)



b)

2.9. ábra. A maximális nyomás (a) és a nyomásváltozás sebességének (b) változása a szénpor-koncentráció függvényében [23]

1- gyöngyösi lignit, 2- bükfábrányi lignit



2.10. ábra. Az égési sebesség változása különböző oxigénkoncentrációknál [23]

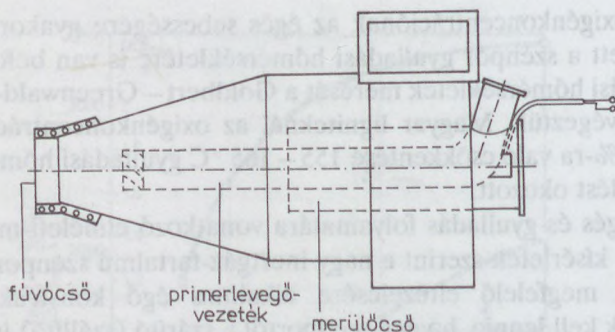
Az oxigénkoncentrációnak az égés sebességére gyakorolt hatása mellett a szénpor gyulladási hőmérsékletére is van befolyása. A gyulladási hőmérsékletek mérését a Goldbert – Greenwald-módszer szerint végeztük. Magyar ligniteknél az oxigénkoncentráció 21%-ról 10,5%-ra való csökkentése 155 – 165 °C gyulladási hőmérséklet-növekedést okozott.

Az égés és gyulladás folyamatára vonatkozó elméleti megfontolások és kísérletek szerint a nagy inertgáz-tartalmú szénpor-gáz keverékek megfelelő eltüzelésére alkalmas égő konstrukciójának olyannak kell lennie, hogy a szénportól a szárító (szállító) inert gázt és párát leválassza, és az égési levegővel, minél kedvezőbb keveredést biztosítson a tüztérbe való befúvás előtt úgy, hogy robbanásveszély ne keletkezzék. E követelményeknek a Villamosenergia-ipari Kutató Intézetben kifejlesztett szeparátoros örvényégőtípus megfelel. Tekintve, hogy ennél az égőtípusnál a szénport az égőig szállító gáz beállítható mértékben leválasztható, és tetszőleges mennyiségű és hőmérsékletű levegő keverhető a szénporhoz a tüztérbe való befúvás előtt, megszűnik a direkt tüzeléseknél eddig meglévő kényszer, azaz a szénpor szállítása (szárítása) függetlenné válik a szénpor tüzeléséhez szükséges szénpor-levegő keverék előállításától.

2.3.2. A szeparátoros örvényégő elvi kialakítása

A szeparátoros örvényégő sémáját a 2.11. ábra mutatja [11].

A malomból kilépő primer vezetékből leágaztatott vezetéken keresztül a szeparátoros örvényégőbe belépő szénpor először egy porleválasztó ciklonhoz hasonló térrészbe jut. A porleválasztó ciklon alkalmas eszköz a szénporórlemény jó leválasztási hatásfok melletti leválasztására. A primer gáz egy része, a szénpor kis hányadával együtt, a ciklon merülőcsövén keresztül, a leválasztó ciklonokhoz hasonlóan, leszívásra kerül. A leszívott gáz a tűztér oldalfalának közepén, valamivel a főégők magassága felett — egy használaton kívüli koromfűvő nyíláson keresztül — a tűztérbe lép. Ennek megfelelően a le nem választott szénpor is elérhet.



2.11. ábra. Szeparátoros örvényégő elve [11]

1- fűvócső, 2- primerlevegő-vezeték, 3- merülőcső

A ciklontérben leválasztott szénpor, a primer gáz egy hányadával együtt, a ciklon kúpos aljához csatlakoztatott fűvócsőbe kerül. A fűvócső a tűztérhez csatlakozik.

A ciklon merülőcsövén keresztül vezettük be az örvényégő primer levegőjét szállító csövet. A ciklontér legszűkebb keresztmetszetébe befűvott primer levegő tökéletesen összekeveredik a levá-

lasztott szénporral. A primer levegő – szénpor keverék perducetes áramlás mellett a fúvócsövön keresztül jut be a tűztérbe.

A fúvócsövön kívül helyezkedik el a szekunder levegőt szállító cső. A perducetet a fúvócsőre hegesztett terelőlapátok biztosítják.

A primer és szekunder levegőt a kazán meleglevegő-vezetékéből ágaztatjuk le.

Az ismertetett szeparátoros örvényégő olyan előnyökkel bír, melyekkel az ismert örvényégő megoldások nem rendelkeznek, nevezetesen:

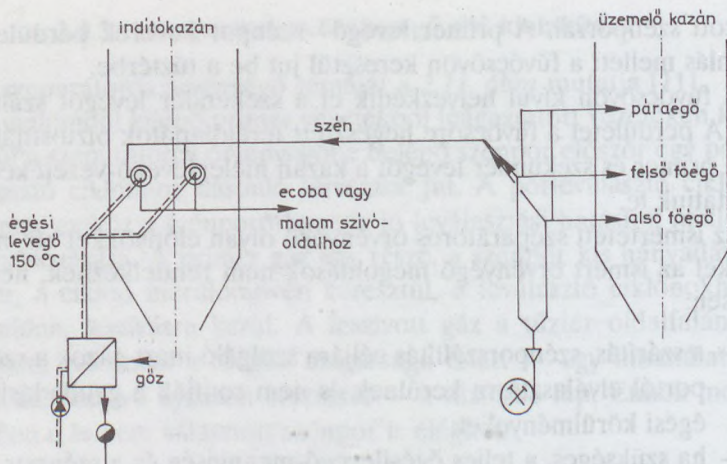
- a szárítás, szénporszállítás céljára szolgáló inert gázok a szénportól elválasztásra kerülnek és nem rontják a gyulladási és égési körülményeket;
- ha szükséges, a teljes égésilevegő-mennyiség és a szénpor jól összekeverve juttatható a tűztérbe;
- Az égési levegő hőmérséklete akár a gyulladási hőmérsékletet is elérheti, kedvező gyulladási feltételeket létrehozva;
- az égő meglévő tüzelőrendszerbe könnyen beépíthető.

2.3.3. Szeparátoros örvényégő alkalmazása lignittüzelésű gőzkazán indításához

Az előbbi megfontolások alapján a Mátrai Erőműben egy 620 t/h gőzteljesítményű, lignittüzelésű gőzkazán indításához szénpor-begyűjtő rendszert terveztünk és szereltünk fel. A begyűjtáshoz szükséges szénport az indítandó kazán mellett üzemelő kazán egyik malmától biztosítjuk. Ezáltal közbenső szénportárolást nem terveztünk be. A begyűjtő rendszer elvi sémáját a 2.12. ábra szemlélteti.

A rendszer főbb jellemzői:

- a kazán teljesítménye 590 MW_t,
- a szénport az égőhöz szállító gázmenyiség 120 000 m³/h,
- a porkoncentráció 177 g/m³,
- a szénpor fűtőértéke 12 040 kJ/kg,
- a szénpor nedvessége 12%,
- 2 db szeparátoros örvényégő egyenkénti hőteljesítménye 30 MW_t,



2.12. ábra. Szénporbegyűjtő rendszer kapcsolása [11]

- az indítóégőn befűvott primer levegő az elméleti égési levegőszükséglet %-ában 50%,
- a primer levegő hőmérséklete 150 °C.

A 30 MW_t hőteljesítményű szeparátoros örvényégő fényképét a 2.13. ábra mutatja.

A szállítógázzal az égőbe bejutó szénpor először egy porleválasztó ciklonhoz hasonló térrészbe jut. A porleválasztó ciklon alkalmas eszköz a szénporörlemény nagy leválasztási hatásfok melletti leválasztására. A szállítógáz egy része, a szénpor kis hányadával együtt, a ciklon merülőcsőven keresztül, a leválasztó ciklonokhoz hasonlóan, leszívásra kerül. A leszívott gáz az indítandó kazán egyik malomának szivóvezetékén keresztül a kazántűztérbe távozik.

A ciklontérben leválasztott szénpor a ciklon kúpos aljához csatlakoztatott fúvócsőbe jut, a szállítógáz leszívása után fennmaradó hányadával együtt. A fúvócső a tűztérhez csatlakozik. A ciklon merülőcsőven keresztül vezették be a primer levegőt szállító csövet. A ciklontér legszűkebb keresztmetszetébe befűvott primer levegő tökéletesen összekeveredik a leválasztott szénporral. A primer le-



2.13. ábra. 30 MW_t örvényégő fényképe [7]

vegő – szénpor keverék perdületes áramlás mellett a fúvócsövön keresztül jut be a tüztérbe.

A szénpor begyűjtéséről olaj-indítóégő gondoskodik. A primer levegőt gőzzel fűtött kalorifer melegíti fel.

Előnyös tulajdonsága a szeparátoros örvényégőnek, hogy a leszívott szállítógáz mennyiségének széles intervallumában a láng stabil maradt. Ez módot ad arra, hogy a lánghőmérsékletet optimális értékre állíthassuk be.

A primer levegő mennyiségének változtatásával a szeparátoros örvényégő áramlástechnikai ellenállása változik. A primer levegő mennyiségének növekedésével az égő ellenállása csökken. Ezzel egyidejűleg a leszívott szállítógáz részaránya gyakorlatilag változatlan. Az ellenállás csökkenésével a szállítógáz mennyisége nő. Kedvező tulajdonsága tehát a szeparátoros örvényégőnek az, hogy a primer levegő mennyiségének növekedésével a szállítógáz mennyisége megnő, ezáltal a szállított szénpor mennyisége is növelhető.

Hátránya a szeparátoros örvényégőt alkalmazó rendszereknek

az, hogy az égőből leszívott inert gáz kis mennyiségű szénport von el a tüzelési rendszerből. Ez így vagy teljes egészében veszteség, vagy pedig külön gondoskodni kell e veszteségtényező csökkentéséről. Szénporos indítóegőként való alkalmazásnál e veszteség nem számottevő, a jelentős olajmegtakarítás következtében.

2.3.4. Támasztótüzelés kialakítása szeparátoros örvényégővel a Tatabányai I. Hőerőműben

Romló szénminőség és a kazánok részterhelés melletti üzemeltetése együtt jár a tűz stabilitásának romlásával. Támasztótüzelés alkalmazása nélkül egyre nehezebb a kazánokat üzemben tartani szénhidrogénfelhasználás-növekedés nélkül.

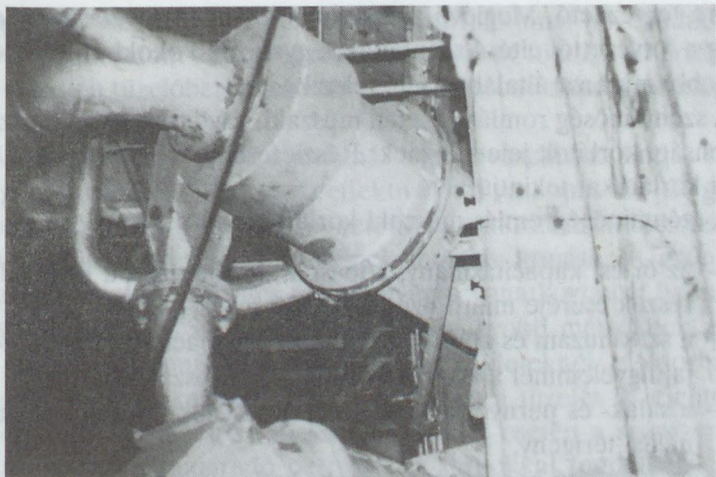
A VEIKI-ben kifejlesztett szeparátoros örvényégő beépítésével gyorsan romló tüzelőanyag-minőség mellett sem tapasztalható lángkialvás, a kazán minimális (olajtámasztás nélküli) terhelése jelentősen lecsökkent. A tüzelési rendszer módosítása üzemi körülmények mellett is teljesítette feladatát (2.14. ábra).

A 45 t/h gőzteljesítményű, 32 bar/420 °C kilépő gőzparaméterekkel üzemelő kazán tüzelőberendezésén a fejlesztést megelőző mérések eredményei az alábbiakra mutattak rá:

- Az alacsony malomhőmérséklet következtében az őrlött szénpor kiörlési finomsága nem megfelelő, a befűvott por szemcsemérete durva. Az alacsony hőmérséklet és nagy porkoncentráció mellett a leszáradás részleges, a pornedvesség nagy.
- A nedves, durva szénpor és az alacsony hőmérsékletű primer gáz tüztérbe való befűvási sebessége nagy. A szénpor a befűvási keresztmetszettől csak távol képes meggyulladni, az égési folyamat a tüztér magassági irányába elhúzódik.

Az egyre romló tüzelőanyag-minőség gyakori tűzkialvást eredményez a névleges terhelésen is, de főként részterhelésen. A kazánoknál igény a menetrendtartás.

A tűzkialvások számát növeli a szénkimaradás is, amely, az eredeti tüztéri viszonyok mellett, ha egy malomnál bekövetkezik, bizonyos, hogy tűzkialváshoz vezet.



2.14. ábra. Támasztóégő a Tatabányai Hőerőműben [7]

A feladat megoldását a következők biztosították:

- A füstgáz-visszaszívás növelésével javítani a kiörlési finomságot, csökkenteni a por végnedvesség-tartalmát.
- Szeparátoros örvényégőkkel csökkenteni a gyulladási készenlétet, rövid lánggal, olajfelhasználás nélkül stabilizálni a főégőket.

2.4. Szempontok a szénportüzelésű kazánok határfűtőértékének megállapításához

2.4.1. A szénminőség szerepe

A szénportüzelés bizonyos határok között érzéketlen a szénminőség változására, és ha például a rostélytüzeléssel hasonlítják össze, ez utóbbi igényesebb a fűtőérték, az illó- és hamusajátságotok mellett még a szemcsézetre is (2–5 mm alatti hányadra). A szénportüzelés új kazán esetén csaknem bármilyen (kb. 4 MJ/kg fűtőérték feletti)

szénre tervezhető. Meglévő kazánoknál azonban a választási lehetőség a tervezettől eltérő szénfajtákra gyakorlati okokból feltétlenül szűkebb, mint azt általában feltételezik.

A szénminőség romlása esetén műszaki, gazdaságossági és üzembiztonsági korlátok jelentkeznek. Részletesebben elsősorban a műszaki korlátokat tekintjük át.

A szénminőségromlás műszaki korlátai a következők:

- az őrlési kapacitáshiány, kopások, figyelemmel a kopó alkatrészek cseréje miatti üzemidő-kiesésre is,
- a szívóhuzam és aláfúvó ventilátorok kapacitása, munkapontja, figyelemmel a konvektív felületek elpiszkolódására is,
- a salak- és pernyetranszport-berendezések kapacitása, depónálási térigény,
- a szénellátó berendezések adott kapacitása,
- a tűztéri salakosodás vagy lényeges füstgázáram-változás esetén a túlhevítők (újrahevítők) hőmérséklet-szabályozási lehetősége (vízbefecskendezési mennyiség),
- a tűzstabilitás esetleg lényeges romlása,
- a salakosodási problémák.

Az első öt pontban foglaltak adott kazánnál bizonyos berendezések igénybe vehető teljesítményével kapcsolatos korlátok, és az egyes erőművekben eltérően alakulnak.

A stabilitás a romló szénminőséggel általában fellépő legjelentősebb probléma, melyet általában szénhidrogénes támasztótüzeléssel szokás megoldani.

A salakosodás szénminőségtől és kazánkonstrukciótól függően léphet fel.

2.4.2. A kopás és következményei

Adott gőzteljesítménynél és romló szénminőségnél a kazánhatásfok romlik, tehát az őrlendő tüzelőanyag-mennyiség csaknem a fűtőértékkel fordított arányban változik. Az éghető okozta veszteségek a fajlagos hamutartalommal változnak, de különösen fekete-szeneknél mérsékeltebben, mint az arányos változásból adódna. A

füstgázvesztések a fajlagos nedvességtartalommal növekednek. A nagy hamutartalom kedvezőtlen hatása viszont fokozott mértékben jelentkezik a tüzelőberendezés és a kazánberendezés egyes elemeinek kopásánál.

A GHV EVT N 170-50 malomnál a teljes vaselhasználódás 100 – 120 g/t_{szén} értékre tehető, és az effektív nettó vaskopás 40 – 50 g/t_{szén} értéket tesz ki. Még erőteljesebben kihat a kazán üzembiztonságára a kazánberendezés csőelemeinek intenzív kopása. A gyöngyösi lignit átlagosan 38,6%-os szárazanyagra vonatkoztatott hamutartalmában 48,5% a SiO₂. A kopások legnagyobb mértékben a kazán második huzamában elhelyezett fűtőfelületeknél, elsősorban a vízhevítőnél jelentkeznek. A koptató hatást a tüzelés is jelentősen befolyásolja. Az alacsony tüztérhőmérséklet esetén a szénzemcsé kiégése után visszamaradó pernye éles sarkokkal rendelkezik, nagyobb koptatóhatással. Magasabb, de még nagymértékű salakosodást nem okozó tüztérhőmérsékletnél a pernyeszemcsék éles sarkai lekerekednek, koptatóhatásuk is csökken. A lignit hamuösszetétele és a tüzelési mód mellett a pernye szemcseméret-összetétele, az áramlási sebesség és a pernyekoncentráció jelentősen befolyásolják a koptatóhatást.

A kopások következtében a malomteljesítmény rövid idő alatt csökken.

2.4.3. Segédberendezések, szabályozás

Bár adott esetben a kazán minden egyes eleme korlátozó tényezőként léphet fel, ritkábban jelentik a segédberendezések a tényleges eltüzelhetőségi korlátot. Hatásuk elsősorban üzemviteli problémát vet fel és teljesítménykorlátozást, többletköltséget okoz.

Adott teljesítménynél a levegő és füstgáz térfogatárama a fajlagos nedvességtartalommal nő. A szén szervesanyagának összetétele (H/C és S/C arányok) eltéréseinek hatása gyakorlatban kicsi. A hatása a térfogatáramra, a salak- és pernyeszállításra a fajlagos hamutartalom növekedésével jelentkezik. A szénzállításnál a fűtőérték szerepe döntő. A túlhevített gőz hőmérséklettartásához szükséges vízbefecskendezés mennyisége megnő a fajlagos nedves-

ségtartalommal vagy a tüztér elpiszkolódásával. Az egyes kazánoknál alkalmazott füstgáz-recirkuláltatás hatására is nő a túlhevítők hőfelvétele. Esetenként a maximális vízbefecskendezés elérése is kazánteljesítmény-csökkentő tényező.

2.4.4. A tüzelés stabilitása

A szénminőségromlás igazi műszaki korlátját a tüzelés stabilitása jelenti.

A gyulladási stabilitás a legkomplexebb kérdés. A lánghőmérsékletet a tüzelőberendezés, a tüztér kiképzése, az őrlési finomság, a levegő-előmelegítés hőmérséklete, az őrlemény nedvességtartalma, a gázkonvekcióval és sugárzással kapott hőáram stb. befolyásolja. A különböző jellemzők ellentétes hatásúak lehetnek.

Gyakorlati következtetés, hogy a stabilitás egyre kedvezőtlenebb lesz a fűtőérték romlásakor. A gyulladás a tüzelőanyag fizikai-kémiai tulajdonságainak és a környezeti viszonyok kölcsönhatásának együttes eredőjeként jön létre.

A gyulladásra elmondottak igazak, mégis a levegőszennyeződést is figyelembe véve a tüzelőanyag ilyen gyulladására a legkedvezőbb feltételeket csak bizonyos tüzelőanyag-részarányra célszerű biztosítani. A nitrogén-oxidok keletkezése szempontjából stabil gyulladást viszonylag alacsony tüztéri átlaghőmérséklet mellett kell elérni. Ez megfelelő helyen elhelyezett stabil gyújtólángokkal lehetséges, és természetesen ez a hőmérséklet a különféle tüzelőanyagoknál más és más érték.

A tüzelés stabilizálásához az általános gyulladási egyenletben megtalálható paraméterek közül meg kell keresni az adott körülmények között legkedvezőbben változtatható paramétert. De az üzemviteli és konstrukciós beavatkozások is egy megvalósított tüztérnél elérnek egy határfűtőértéket, amelynél stabil üzemvitel már nem valósítható meg. Ez az az érték, amikor a tüzelőanyagból fejlődött hő a tüzelés körülményei között nem biztosítja a környezet gyulladási hőmérsékleten tartását.

2.4.5. Gazdaságossági korlátok

A gazdaságosság határa két szempontból vethető fel:

- adott erőmű szintjén,
- a villamosenergia-rendszer szintjén.

Adott erőmű szintjén a gyengébb minőségű szén alacsonyabb hő-
ára a nyereség, melyet ellentételez

- az önfogyasztás növekedése (őrlés, ventilátormeghajtás),
- a tüzelési és hőátadási hatásfok romlása,
- a szállítási, deponálási költségek növekedése,
- a szénhidrogénes póttüzelés drágító hatása,
- a karbantartási költségek növekedése.

A minimális fűtőérték kérdését erőművenként konkrétan kell vizsgálni, mivel az első korlátot hol műszaki, hol gazdasági problémák jelentik. A kettő azonban nem választható el egymástól. A műszaki problémák feloldása is, ha az feloldható, mindenkor gazdaságossági kihatással kapcsolódik.

A méretezési értékhez képest a fűtőérték romlása tehát a szénporttüzelésű erőművekben gazdaságossági és műszaki problémákat vet fel. A berendezésben lévő tartalékok kihasználása után a romlás először teljesítménykorlátozásban jelentkezik, majd a tüzelés stabilitásának megszűnése révén az eltüzelhetőség határához érkezünk. Ezt követőleg a berendezések korszerűsítése révén még további fűtőérték-csökkenés kompenzálható, majd elérkezünk egy olyan fűtőértékhatárhoz, amely már az adott berendezésnél abszolút határértéket jelent.

A korszerű tüzelőberendezésnél azonban az üzemvitel szempontjain túlmenően a környezetvédelem szempontjait is figyelembe kell venni. A tüzelőberendezésnél elsősorban a nitrogén-oxidok keletkezését lehet befolyásolni. A NO_x -szegény szénporégők mellett a tüztéri viszonyok alakításával lehet radikálisan csökkenteni szénporttüzeléseknél a NO_x mennyiségét. A tüztérben az égési zónák megfelelő kialakításával stabil és egyben környezetkímélő tüzelést lehet biztosítani. A főéggő üzemét, a levegőadagolást a kevés NO_x -

képződés szempontjából lehet megválasztani, míg a tüzelés stabilitását a gyulladás szempontjából kedvezően kialakított és üzemeltetett szénporstabilizáló égővel lehet biztosítani.

E helyütt a szénportüzelésű erőművek problémáit elemeztük, és nem tértünk ki az újabb tüzelési módszerek, mint például a fluidizációs tüzelés alkalmazására.

Irodalom a 2. fejezethez

1. BABCOCK: Grosskesselfeuerungen. Öl- und Gasfeuerung, 1971/6.
2. REMÉNYI K.: Korszerű kazánberendezések. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1977.
3. EVT.: Aufbereitungs- und Feuerungs-systeme für Braunkohle, 31052.
4. TODORIEV, M. et al.: Electrical Power Stations using Highmoisture Lignites High-Ash brown Coal. VIII. WEC, Bucharest, 1971.
5. REMÉNYI K.: Berendezés fluidizált tüzeléssel kombinált szénportüzeléshez. F 23 D 19/00 jelű szabadalom.
6. HORVÁTH F. – VOLTAY G. – VÖRÖS L.: Tüzelési rendszer továbbfejlesztése a Gagarin Hőerőmű 320 t/h-s kazánjainál. VEIKI jelentés, Budapest, 1981.
7. REMÉNYI, K. – VÖRÖS, L. – HORVÁTH, F. – VOLTAY, G.: Rational Power-Station utilisation of high ash – and moisture content hungarian brown coals in purpose built firing equipment. 13th Congress of the WEC, Cannes, 1986.
8. KORITZ, D. – HILDEBRANDT, E. – STRÖER, K.: Staubzündbrenner mit Eigenstaubversorgung – eine Systemlösung zur Heizölsubstitution in Braunkohlenkraftwerken. Energietechnik, 1982, September.
9. RENNERT, K. D.: Kohlenstaubzündfeuerung: Anwendung, Betriebsergebnisse, Wirtschaftlichkeit. Brennstoff – Wärme – Kraft. 1984, Nr. 5. (Mai)
10. ALTENBERGER, R. – BRUNE, W. – BUDE, F. – STILLE, H.: Möglichkeiten zur Entwicklung von Kohlenstaub-Zündbrenner-Anlagen für Dampferzeuger mit Ventilatormühlenfeuerung. Energietechnik, Nr 8.
11. REMÉNYI K. – VÖRÖS L. – HORVÁTH F. – NAGY L.: Különleges indító támasztó szeparátoros örvényégő szénportüzelésű kazánok tüzelőolaj-igényének csökkentésére. Energia és Atomtechnika XXXVIII (1985) 1.
12. BEÉR, J. M. – CHIGIER, N. A.: Combustion Aerodynamics. Applied Science Publishers Ltd, London, 1972.
13. WILLIAMS, A. F.: Combustion Theory. Addison-Wesley Publishing Company, Reading, Ma, Palo Alto, London.
14. JONES, W. P. – WHITELAW, J. H.: Calculation Methods for Reacting Turbulent Flows. Combustion and Flame 48 (1982).
15. RAJAN, S. – STREHLOW, R. A.: Effects of Chemical Reactions in the Shocked Gas on the Propagation Characteristics of Cylindrical Detonation Waves. Combustion and Flame 49 (1983).

16. SIBULKIN, M. — KULKARNI, A. K. — ANNAMALAI, K.: Burning on a Vertical Fuel Surface with Finite Chemical Reaction Rate. *Combustion and Flame* **44** (1982).
17. HERTZBERG, M. — CASHDOLLAR, K. L. — LAZZARA, Ch. P.: The Limits of Flammability of Pulverized Coals and other Dust. Eighteenth Symposium (International) on Combustion, 1981.
18. HERTZBERG, M. — CASHDOLLAR, K. L. — DANIEL, L. NG. — CONTI, R. S.: Domains of Flammability and Thermal Equitability for Pulverised Coals an other Dust: Particle Size Depences and Microscopic Residue Analyses. Nineteenth Symposium (International) on Combustion, 1982.
19. REMÉNYI, K.: Combustion Stability. Akadémiai Kiadó, Budapest, 1980.
20. BARTH, W.: Berechnung und Auslegung von Zyklonabscheidern. *Brennstoff — Wärme — Kraft*, 1956. Nr. 1.
21. MUSCHELKNANTZ, E.: Auslegung von Zyklonabscheidern in der Technischen Praxis. *Staub*, 1970. Nr. 5.
22. KONCZ L.: Portalanítás és porleválasztás. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1982.
23. REMÉNYI K.: Magyarországi fejlesztések a tüzeléstechnikában. Magyarország szerepe a világ természettudományos és műszaki haladásában. Budapest, 1989. aug. 21 — 25.
24. REMÉNYI K.: Fontosabb fejlesztési eredmények nagy teljesítményű lignit blokkoknál. Budapest Műszaki Egyetem, Energetika '88., Lévai András 80. születésnapjára rendezett tudományos tanácskozás.
25. REMÉNYI, K.: Use of low-grade coal as fuel of Power Plants. *Acta Technica Acad. Sci. Hung.* **99/1-2** (1986) 193 — 214.
26. BOROSS L.: A tervezésnél kedvezőtlenebb szénminőség kihatásai a szénportüzelésű kazánok üzemére. VEIKI Jelentés, 1983.
27. VOLTAY G.: Nagyteljesítményű szénőrlő malom fejlesztése a VEIKI-ben. VEIKI Közlemények, 1985.
28. HZMALYAN, D. M.: Issledovanie vosplamennyye odnomernovo pylevozdušnovo potoka pri naltchii teplootvoda (Ignition Experiments with Heat Conducting Unidimensional Hot Air Jet). *Teploenergetika* (Moscow) **6** (1964).
29. WIEHN, H. et al.: Trends und Lösungen in internationalen Dampferzeugerbau. VGB, Dezember 1985.

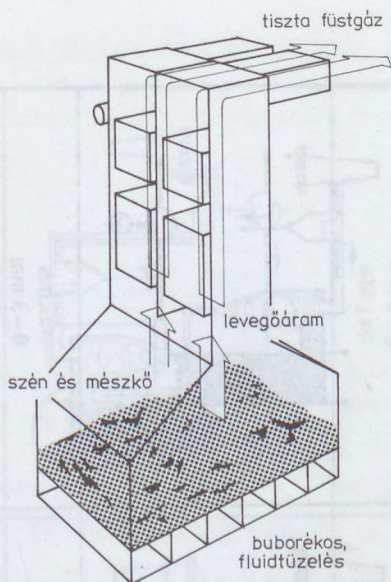
3. FLUIDIZÁCIÓS TÜZELÉS

A légköri szennyezőanyagok mennyiségének égés közbeni csökkentésére — főleg a SO_x - és NO_x -összetevőkére — különösen alkalmas tüzelési eljárás a fluidizációs tüzelés. A NO_x értéke az alacsony égési hőmérséklettel, a SO_x -é adalékanyagokkal csökkenthető. Az eljárást Németországban az 1920-as években a vegyipari technológiáknál kezdték alkalmazni. A technológia alapelve a 3.1. ábrán látható. Egy fluidizációs kazán fűvókaelrendezését mutatja a 3.2. ábra. A tüzelés megvalósítható légköri és túlnyomáson is (3.1. táblázat). A fluidizációs tüzeléssel létesített energetikai blokk kapcsolási vázlatát a 3.3. ábra mutatja [1].

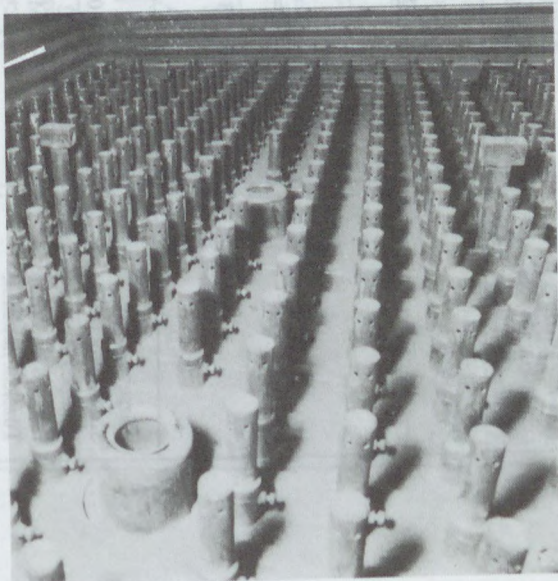
3.1. Áramlástechnikai alapok

A szilárd tüzelőanyagok tüzelésekor a legkritikusabb feladat az égési levegő — a tüzelési és a kémiai-fizikai folyamatok szempontjai szerinti — adagolásának a megvalósítása. A fluidizációs tüzelési eljárásnál a szilárd fázisú tüzelőanyagot, illetve ágyanyagot gázfázisú közeg áramolja át. A gáz — szilárd fázisú közeg állapotának kezeléséhez eszközül egy megfelelően szerkesztett állapotdiagram szolgálhat. E diagram előállításához a hasonlósági kritériumok szolgálnak segítségül. Két fizikai mennyiség hasonlósága a jelenséget jellemző valamennyi mennyiség hasonlóságát jelenti, azaz

— a kinematikai mennyiségek: pl. a folyadék- vagy gázáramlás,

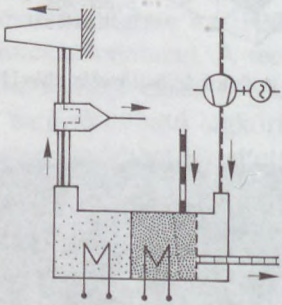
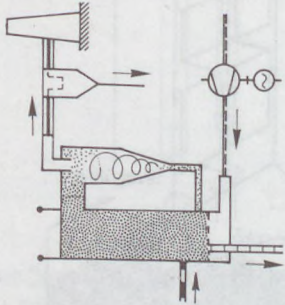


3.1. ábra. A fluidizációs tüzelés elve [1]

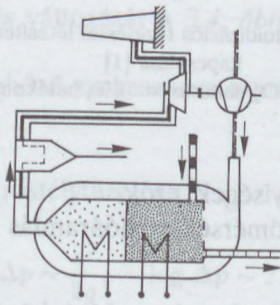
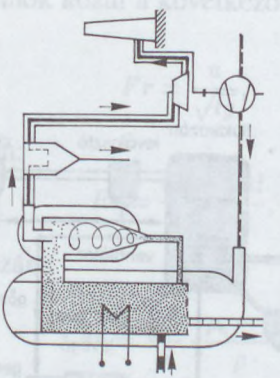


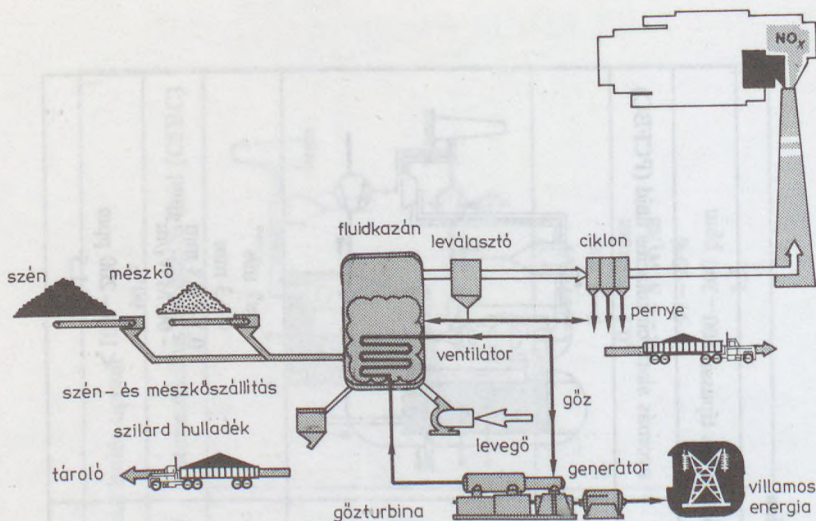
3.2. ábra. A fluidizációs kazán fűvókaelrendezése [17]

3.1. táblázat

Jellemzők	A fluidtüzelés típusai	
	atmoszferikus lassú fluid (FBC)	atmoszferikus cirkulációs fluid (CFBC)
Kapcsolás		
Gázsebesség Szemcseméret Közepes szemcseátmérő Fajlagos hőterhelés Tüzelési hatásfok NO _x a füstgázban Ca/S molarány	≈2 m/s 0–10 mm 1–2 mm 1–2 MW_t/m² 90–95% 200–400 ppm 2,5–3,5	≈7 m/s 0–3 mm 0,1–0,3 mm 4–6 MW_t/m² 97–99% 100–200 ppm 1,5

3.1. táblázat folytatása

Jellemzők	A fluidtüzelés típusai	
	nyomás alatti lassú fluid (PFBC)	nyomás alatti cirkulációs fluid (PCFBC)
Kapcsolás		
Gázsebesség Szemcseméret Közepes szemcseátmérő Fajlagos hőterhelés Tüzelési hatások NO _x a füstgázban Ca/S mólarány	≈ 2 m/s 0–10 mm 1–2 mm –20 MW _t /m ² 95–99% 100–200 ppm 1,5	≈ 7 m/s 0–3 mm 0,1–0,3 mm –60 MW _t /m ² 99% <100–200 ppm 1–1,5



3.3. ábra. Atmoszferikus fluidizációs tüzeléssel létesített energetikai blokk kapcsolása [1]

SO_x -lekötés = 90%, NO_x -lekötés = 70%, hatékonyság = 35–36%

- a dinamikai mennyiségek: erők,
- a hőhasznosság: hőmérséklet, hőáramlás

hasznosságát.

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:

- az 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 gázkozegre felírt viszkózus folyadékáramlásra vonatkozó Navier – Stokes-egyenlethől nyerhető hasonlósági kritériumok közül a következőket használják fel:

— Froude-szám:

$$Fr = \frac{u}{\sqrt{lg}},$$

— Reynolds-szám:

$$Re = \frac{ul}{\nu} = \frac{\rho ul}{\mu},$$

— Archimedes-szám:

$$Ar = \frac{\rho l^3}{\nu} \cdot \frac{\rho_s - \rho}{\rho}.$$

Ha szilárd szemcsés halmazon gáz áramlik át, a sebesség növelésével a nyomásesés változását a 3.4. ábra mutatja (logaritmikus léptékekben) [2].

Az áramlás különböző szakaszán a nyomásesés változását leíró összefüggések:

— **Első szakasz** (rostélytüzelés):

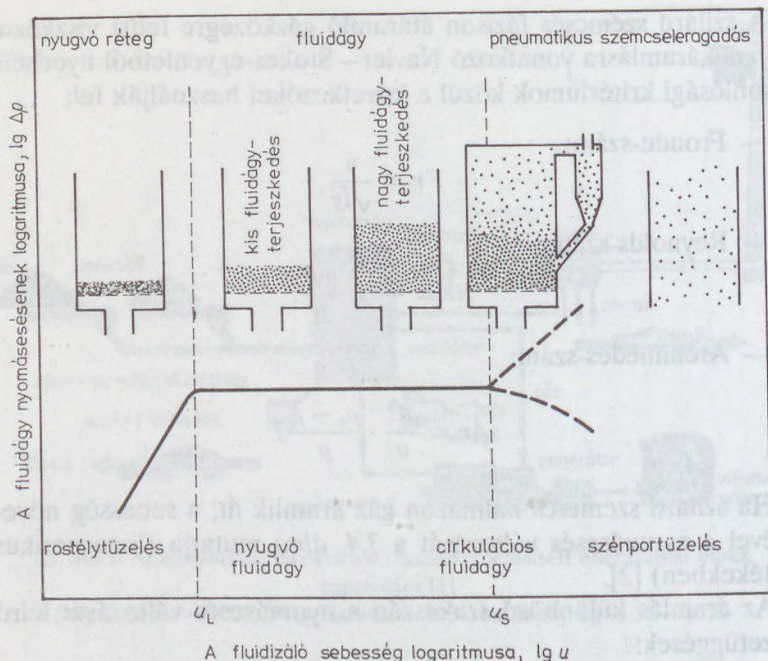
$$\Delta p \sim \frac{u^2}{2g}, \quad \log \Delta p \sim 2 \log u.$$

A jelleggörbe ferde egyenes.

— **Második szakasz** (fluidizáció állandó nyomásesés mellett):

Az áramlás során, a sebesség egy bizonyos u_L 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

$$\Delta p = \rho_s(1 - \epsilon)h,$$



3.4. ábra. Szemcsés halmaz állapotváltozása gázáramlás esetén [2]
 u_L a fluidizációs kezdősebesség, u_s a lebegési sebesség

$$m = \text{áll.} = \rho_s(1 - \epsilon)V = \rho_s(1 - \epsilon)hF,$$

$$\rho_s(1 - \epsilon) = \frac{m}{F} \frac{1}{h},$$

$$\Delta p = \frac{mh}{Fh} = \frac{m}{F} = \text{áll.},$$

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

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 rétegben 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 elérve egy értéket, az u_s lebegési sebesség értékét, amely felett a szemcsehalmozból a gáz szemcséket ragad magával. Ha megfelelő utánpótlása van a szemcséknek, akkor a jelleggörbe az áramlási ellenállásra érvényes törvényszerűséget követi, azaz

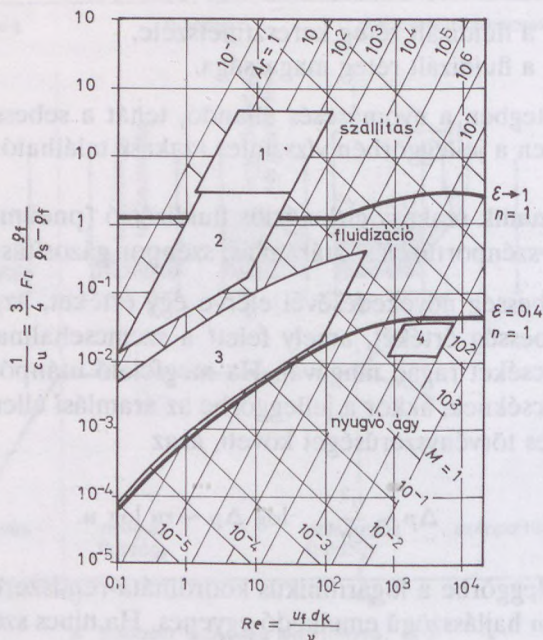
$$\Delta p \sim \frac{u^2}{2g}, \quad \log \Delta p \sim m \log u.$$

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.

A különböző állapotokat a szerzőről elnevezett Reh-állapotdiagramon, a gáz–szilárdanyag rendszer állapotábrájában lehet jól követni. E diagram dimenzió nélküli jellemzőket használ, a Re , Fr , Ar számokat, továbbá az M sebességjellemző számot, vagy más néven Beranek-számot. Az egyes jellemzők képlete a 3.5. ábrán látható diagramon található. A réteg fluidizált állapotára fontos jellemző az ún. relatív térkitöltés (porozitás) is (3.6. ábra) [4].

A Reh-állapotdiagram szerkesztéséhez a Fr szám és a Re szám kerül a függőleges, illetve a vízszintes tengelyre, és különböző paraméterek segítségével szerkesztik a görbesorokat, amelyek segítségével a fluidágy méretezhető. A diagram tehát a következő összefüggések leképezésére szolgál:

$$Fr \sim f(Re),$$



$$Fr = \frac{u_t^2}{g d_K}$$

$$Ar = \frac{g d_K^3}{\nu^2} \frac{\rho_s - \rho_t}{\rho_t}$$

$$M = \frac{u_t^3}{g \nu} \frac{\rho_t}{\rho_s - \rho_t}$$

$$n = \frac{\text{áramlási erő}}{\text{a szemcse súlya}}$$

u_t a gázsebesség,

ν a kinematikai viszkozitás,

ρ_s a szilárdanyag-sűrűség,

ρ_t a gázsűrűség,

d_K a szemcseátmérő,

g a nehézségi gyorsulás,

ϵ a relatív térkitöltési tényező,

n a terhelési arány,

Ar az Archimedes-szám,

M a sebességjellemző,

Fr a Froude-szám,

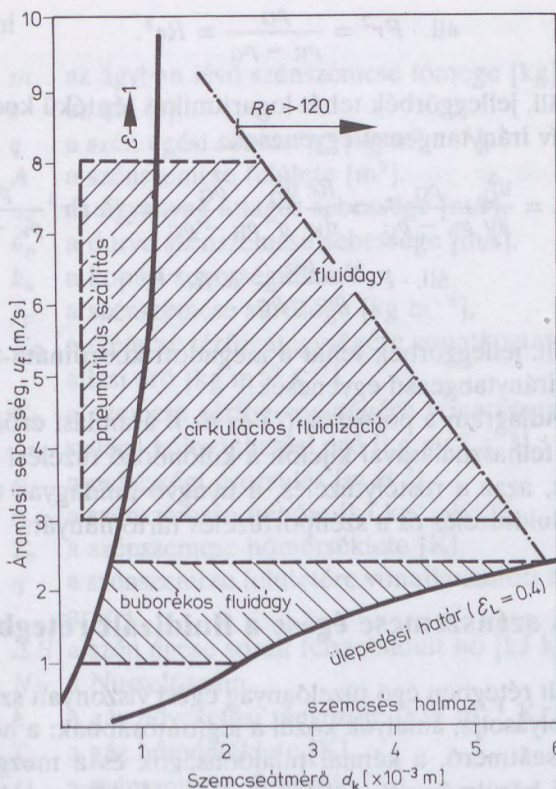
Re a Reynolds-szám,

K index = szemcse,

c_u az ellenállási tényező.

$$\epsilon = \frac{\text{össztérfogat} - \text{szilárdanyag térfogat}}{\text{össztérfogat}}$$

3.5. ábra. Szemcsés halmaz áramlásmechanikája Reh szerint [4]
1- szénportüzelés, 2- cirkulációs fluid, 3- nyugvó fluid, 4- rostély



3.6. ábra. A szemcsés halmaz jellemzői és határértékei [3]

ϵ a relatív térkitöltési tényező,

L az üledési pont,

Re a Reynolds-szám

$$Ar = \text{áll.},$$

$$Be = \text{áll.},$$

$$M = \text{áll.},$$

$$Ar = \text{áll.} = \frac{gd_K^3}{\nu^2} \frac{\rho_K - \rho_G}{\rho_G} = \frac{gd_K Re^2}{u_G^2} \frac{\rho_K - \rho_G}{\rho_G} = \frac{Re^2}{Fr^2} \frac{\rho_K - \rho_G}{\rho_G},$$

$$\text{áll.} \cdot Fr^2 = \frac{\rho_G}{\rho_K - \rho_G} = Re^2.$$

Az $Ar = \text{áll.}$ jelleggörbék tehát logaritmikus léptékű koordináták esetén pozitív iránytangensű egyenesek:

$$Be = \text{áll.} = \frac{u_G^3}{g\nu} \frac{\rho_G}{\rho_K - \rho_G} = \frac{Re}{d_K} \frac{u_G^2}{g} \frac{\rho_G}{\rho_K - \rho_G} = Re Fr^2 \frac{\rho_G}{\rho_K - \rho_G},$$

$$\text{áll.} \cdot Fr^2 \frac{\rho_G}{\rho_K - \rho_G} = Re^{-1}.$$

A $Be = \text{áll.}$ jelleggörbék tehát a megadott koordináta-rendszerben negatív iránytangensű egyenesek.

Az állapotdiagram a porozitás (ϵ) és az n áramlási erő/szemcse-súly viszony felhasználásával kijelöli a különböző tüzelési eljárások tartományait, azaz a rostélytüzelés, a nyugvó fluidágyas tüzelés, a cirkulációs fluidtüzelés és a szénportüzelés tartományát.

3.2. A szénszemcse égése a fluidizált rétegben

A fluidizált rétegben égő tüzelőanyag égési viszonyait számos paraméter befolyásolja, amelyek közül a legfontosabbak: a hőmérséklet, a szemcseátmérő, a kémiai tulajdonságok és a mozgási, azaz anyagátadási körülmények. A három alapvető differenciálegyenlet a tömeg-, az impulzus- és az energiamérleg [6].

— A tömegmérleg:

$$\frac{dm}{dt} = -qA - k_a(u_c - u_p)A,$$

— az impulzusmérleg:

$$\rho_p \frac{du_p}{dt} = \rho_p + F_{dg} + F_{ds},$$

— az energiamérleg:

$$-\left(\frac{mc_p}{A}\right) \frac{dT_p}{dt} + \eta q \Delta H = \frac{Nuk(T_p - T_g)}{D_p} + \epsilon \sigma (T_p^4 - T_b^4),$$

ahol

- m az ágyban lévő szénszemcse tömege [kg],
 t az idő [s],
 q a szén égési sebessége [$\text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$],
 A a szénszemcse felülete [m^2],
 u_c az ágyanyag átlagos sebessége [m/s],
 u_p a durva szénszemcse sebessége [m/s],
 k_a a kopási sebességállandó,
 ρ_p a szénszemcse sűrűsége [kg m^{-3}],
 F_{dg} a szemcse térfogategységére vonatkoztatott gázellen-
állási erő [$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-2}$],
 F_{ds} a szemcse térfogategységére vonatkoztatott szilárd-
szilárd kölcsönhatási erő [$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-2}$],
 g a nehézségi gyorsulás [m s^{-2}],
 c_p a szénszemcse fajhője [$\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$],
 T_p a szénszemcse hőmérséklete [K],
 η a szénszemcse felületére vonatkoztatott energia-rész-
arány,
 ΔH a szén égése során felszabadult hő [kJ kg^{-1}],
 Nu a Nusselt-szám,
 k a gáz hővezetési tényezője [$\text{kW m}^{-1} \text{K}^{-1}$],
 T_g a gáz hőmérséklete [K],
 D_p a szénszemcse átmérője [m],
 ϵ_p a szénszemcse emissziós tényezője,
 σ a Stefan – Boltzmann-állandó,
 T_b az ágyhőmérséklet [K].

A tömegmérlegben figyelembe van véve, hogy a finomabb szem-
csék koptatják a durvábbakat.

Az ágy szilárdanyag-sebessége:

$$u_c = \frac{G}{\eta \rho_b},$$

ahol

G a szilárd anyag recirkulációs fok [$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$],

ρ_b az ágy átlagos sűrűsége [kg m^{-3}],
 η a szén felületén felszabaduló energia-részarány buborékos ágyra, $\eta=0,71$,
 ϵ_p értéke $0,85$.

A gázellenállási erő:

$$F_{dg} = 0,75 C_d \rho_g (u_g - u_p)^2 / D_p,$$

ahol

C_d a gázellenállási tényező,

D_p a szemcse átmérője,

$$C_d = \begin{cases} 24/Re(1 + 0,15Re^{0,687}), & \text{ha } Re < 1000, \\ 0,44 & \text{ha } Re > 1000, \end{cases}$$

$$Re = D_p(u_g - u_p)/\nu_g.$$

A szilárd-szilárd kölcsönhatási idő:

$$F_{ds} = C_f \rho_s (1 - \epsilon)(u_s - u_p)/D_p,$$

ahol

$$C_f = 0,7 D_p^{-0,146},$$

D_p a szemcseátmérő [m],

$$u_s = u_g - u_{st},$$

ahol

u_s a finom szemcse sebessége [m s^{-1}],

u_{st} a finom szemcse végsebessége [m s^{-1}],

A fluidágyra a Sherwood-számot a következő képlettel lehet kifejezni:

$$Sh = \frac{k_g D_p}{D_g} = 2\epsilon + 0,69 \left[(u_g - u_p) \frac{D_p}{\epsilon \nu_g} \right]^{0,5} Sc^{0,33},$$

ahol

k_g a tömegátadási együttható [m s^{-1}],

D_g a levegőben lévő oxigén diffúziós tényezője [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$],

ϵ az ágykitöltési tényező,

ν_g a gáz kinematikai viszkozitása [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$],

Sc a Schmidt-szám,

$$Sc = \frac{\nu}{D}.$$

Az n -ed rendű reakcióra a hőfelszabadulás:

$$q(1 - q/m_d)^n = R_c \rho^n,$$

ahol

q/m_d az anyagátadási részarány,

R_c a tüzelőanyag reakcióképessége [$\text{kg/m}^2 \text{s kPa}^n$],

p a szemcsétől távol az oxigénkoncentráció [kPa].

Az m_d diffúziós határ, illetve a maximális égési sebesség akkor érhető el, ha a szemcse felületén az oxigénkoncentráció nulla:

$$m_d = k_g p_g M_c,$$

ahol

p_g oxigénkoncentráció [kmol m^{-3}],

k_g tömegátadási együttható [m s^{-1}],

M_c a karbon molekulasúlya [kg kmol^{-1}].

A tüzelőanyag reaktivitására közelítő képlet elektróda szén esetén:

$$R_c = 1,18 \exp(-8,284/T_p) \quad n = 0,45,$$

$$Nu = \frac{\alpha D_p}{\lambda} = 0,33 Re^{0,62} (d_p/D_p)^{-0,1},$$

a képletek érvényességi tartománya:

$$0,005 < D_p < 0,012 \quad 900 < Re < 2500,$$

ahol

$$Re = \frac{(u_g - u_p)D_p}{\nu_g},$$

itt:

α a hőátadási tényező [$\text{kW m}^{-2} \text{K}^{-1}$],

λ a gáz hővezetési tényezője [$\text{kW m}^{-1} \text{K}^{-1}$],

D_p a szén szemcse átmérője [m],

d_p az ágyanyag szemcseátmérője [m],

Az ágyban lévő szén szemcsére az energiaviszonyokat megadó differenciálegyenlet:

$$mC_p \frac{dT_p}{dt} = \alpha A (T_b - T_p),$$

ahol

m a szén szemcse tömege [kg],

A a szén szemcse felülete [m^2],

$C_p = a + bT_p$,

itt a és b hőtechnikai állandók.

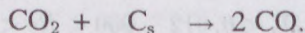
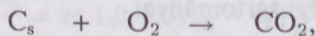
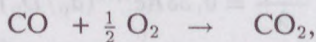
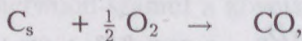
A két egyenlet megoldása $T_p = T_0$ és $t = 0$ kiindulási feltételekre:

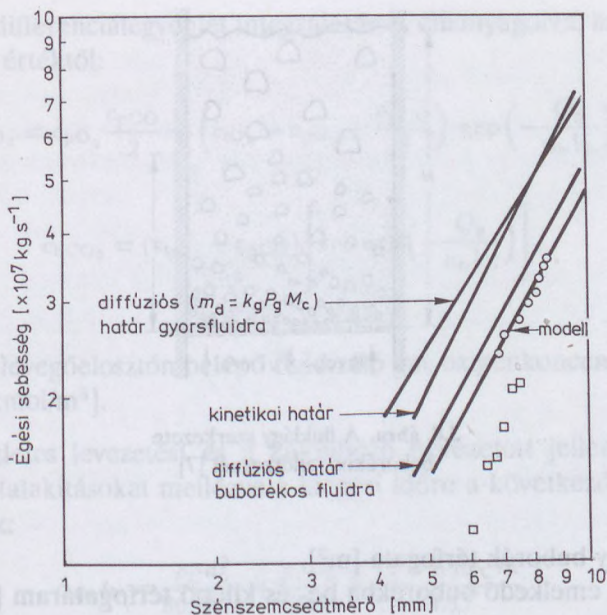
$$(a + bT_p) \ln \frac{T_b - T_p}{T_b - T_0} + b(T_p - T_0) = \frac{\alpha A}{m} t.$$

A szemcseátmérő függvényében az égési sebesség változását a különböző típusú égéseknél a 3.7. ábra mutatja.

A fluidágóban történő égés méretezésére számos modellt dolgoztak ki, amelyek közelítő számításra alkalmasak. A buborékos fluidtűzelésre a [7] alapján mutatunk be egy lehetséges változatot.

A karbon oxidációjára alapvetően négy egyensúlyi egyenlettel rendelkezünk:





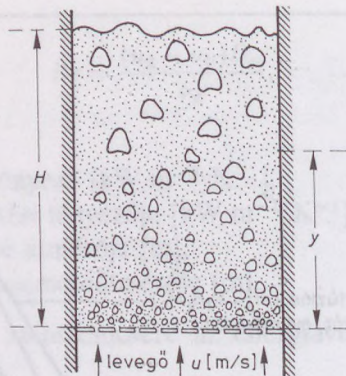
3.7. ábra. Az égési sebesség változása különböző égési tartományokban a szemcseátmérő függvényében [6]

Az utolsó reakció 900 – 1000 °C-nál jelentős, míg a karbonnak közvetlen szén-dioxiddá égése elhanyagolható. Ennek megfelelően jó lehet az a feltetelezés, hogy az elsődleges reakciótermék a CO. A modellhez a 3.8. ábrán látható vázlat került felhasználásra. A feltetelezés az, hogy a buborékba lépő összes CO elég. Ez tehát azt eredményezi, hogy magas hőmérsékletnél vagy nagy ágyamagasság-nál a buborékok is növekednek.

Az O_2 -tömegmérleg a buborékban:

$$V_b \frac{dc_{bO_2}}{dt} = Q(c_{pO_2} - c_{bO_2}) - Q \frac{c_{pCO}}{2},$$

ahol



3.8. ábra. A fluidágy szerkezete
buborékos rendszernél [7]

V_b egy buborék térfogata [m^3],

Q az emelkedő buborékba be- és kilépő térfogatáram [m^3/s].

Az egyenlet feltételezi, hogy a szemcsés fázis jól keveredett, míg a buborékáram rendezetlen. Az egyenletet tovább alakítva:

$$\frac{dc_{bO_2}}{dy} = \frac{Q}{u_b V_b} \left(c_{pO_2} - c_{bO_2} - \frac{c_{pCO}}{2} \right),$$

és hasonlóan a CO_2 -re:

$$\frac{dc_{bCO_2}}{dy} = \frac{Q}{u_b V_b} \left(c_{pCO_2} - c_{bCO_2} + \frac{c_{pCO}}{2} \right),$$

ahol

$u_b = \frac{dy}{dt}$ a buborék emelkedési sebessége [m/s],

y a levegőelosztótól mért távolság [m],

t a buborék, illetve szemcse tartózkodási ideje [s],

c_{bO_2} az y helyen lévő buborékban az O_2 -koncentráció [kmol/m^3],

c_{pO_2} a szemcsés fázisban az O_2 -koncentráció [kmol/m^3],

c_{pCO} a szemcsés fázisban a CO -koncentráció [kmol/m^3].

A két differenciálegyenlet integrálásával, elhanyagolva, hogy a Q függ az y értéktől:

$$c_{bO_2} = c_{pO_2} \frac{c_{pCO}}{2} + \left(c_{iO_2} - c_{pO_2} + \frac{c_{pCO}}{2} \right) \exp\left(-\frac{Q_y}{u_b V_b}\right)$$

és

$$c_{bCO_2} = (c_{bO_2} + c_{pCO}) \left[1 - \exp\left(-\frac{Q_y}{u_b V_b}\right) \right],$$

ahol

c_{iO_2} a levegőelosztón belépő fluidizáló gáz oxigénkoncentrációja [kmol/m³].

A részletes levezetést és a különböző bevezetett jellemzőkkel történő átalakításokat mellőzve a kiegészi időre a következő egyenlet adódik:

$$c_{iO_2} t_b = \frac{\rho_C d_0^2}{96ShD} + \frac{\rho_C d_0}{24k} + \frac{(1-\alpha)w_C m}{12AY},$$

és az égő szemcse hőmérsékletére (T_p) kapott egyenlet:

$$\frac{c_{pO_2} \Delta H_1}{\frac{d_p}{2ShD} + \frac{1}{k}} = \frac{Nu\kappa}{d_p} (T_p - T_b) + \epsilon\sigma(T_p^4 - T_b^4), \quad (3.1)$$

ahol

t_b a kokszzsemcse kiegészi ideje [s],

ρ_C a kokszzsemcse térfogategységében lévő karbon tömege [kg/m³],

d_0 a szemcse átmérője a $t=0$ időpontban [m],

D az O₂/CO diffúziós tényező a reakcióban lévő szemcse környezetében [m²/s],

A a fluidágy keresztmetszete [m²],

w_C a kokszzsemcsében a karbon tömegrész,

m a kokszzsemcse tömege [kg], számítására szolgáló képlet:

$$m = \frac{N_p \pi d_0^2 \rho_C}{6w_C},$$

itt

N_p a fluidágyban a szemcsék száma,

k a kokszzemcséből keletkező CO effektív sebességi együtthatója [m/s], a belső felületen végbemenő reakcióra a következő képlet szerint:

$$r = k c_{\text{SO}_2} \quad (\text{belső felület}),$$

K a teljes égési sebesség [m/s], a következő képlet szerint:

$$r = K c_{\text{PO}_2} \pi d_p^2,$$

Sh a Sherwood-szám,

α a következő képlet szerint:

$$\alpha = \frac{AY}{2N_b Q},$$

itt

N_b a buborékok száma az ágyban,

Y a következő képlet szerint:

$$Y = u - (u - u_{\text{mf}})e^{-X},$$

itt

u a fluidizációs sebesség [m/s],

u_{mf} a maximális fluidizációs sebesség [m/s],

X keresztáramlási tényező:

$$X = \frac{QH}{u_b V_b},$$

itt

H a fluidágymagasság [m],

ΔH_1 a karbon $\rightarrow$ CO reakció reakcióhője [J/kmol],

d_p az égő szemcse átmérője [m],

- T_p az égő szemcse külső felületi hőmérséklete [K],
 T_b a fluidágy hőmérséklete a jó keveredés feltételezésével [K],
 ϵ az égő szemcse emissziós tényezője,
 σ a Stefan – Boltzmann-állandó [$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-4}$],
 κ az égő szemcse körüli közeg és a szemcse közötti hővezetési tényező [$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$].
 Nu a Nusselt-szám.

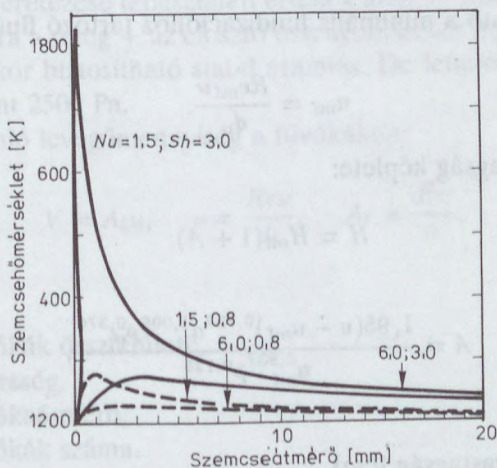
A (3.1) egyenlet alapján számított égő kokszzemcse hőmérsékletét a 3.9. ábra mutatja. A T_p az egyenletből minden átmérőre számítható. A számításnál figyelembe vett értékek:

$$c_{\text{pO}_2} = c_{\text{iO}_2}, \quad D = 2,3 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}, \quad \kappa = 0,24 \text{ W m}^{-1} \text{K}^{-1},$$

$$\text{teljes nyomás} = 1 \text{ bar}, \quad T_b = 1200 \text{ K}, \quad \epsilon = 0,8,$$

$$k = 595 T_p \exp(-18\,000/T_p) \text{ m/s}, \quad \Delta H_1 = 111 \text{ kJ/mol},$$

$$c_{\text{pO}_2} = 2,132 \text{ mol/m}^3.$$



3.9. ábra. Égő kokszzemcse hőmérséklete [7]

3.3. A fluidréteg számítása

A fluidtüzelésű kazán tűzterének számításakor a legfontosabb feladatok a hőtechnikai számítás elvégzéséhez:

- a tüzelőanyag-mennyiség,
- levegőszükséglet különböző üzemállapotokhoz.

Mivel a feladatok közül újdonságot elsősorban a fluidréteg számítása jelent, ennek gyakorlati számítására adjuk meg a szükséges képleteket:

$$Ar = \frac{d_p^3 g}{\nu^2} \frac{\rho_p - \rho_g}{\rho_g},$$

ahol

- d_p a szilárd szemcse mérete [cm],
 ν a kinematikai viszkozitás [cm²/s].

A fluidizáció minimális sebességéhez tartozó Reynolds-szám:

$$Re_{mf} = (25, 25^2 + 0, 0651 Ar)^{0,5} - 25, 25,$$

ebből számítható a minimális fluidizációhoz tartozó fluidizációs sebesség:

$$u_{mf} = \frac{Re_{mf} \nu}{d_p}.$$

A rétegvastagság képlete:

$$H = H_{mf}(1 + A),$$

ebben

$$A = \frac{1,95(u - u_{mf})^{0,738} d_p^{1,006} \rho_p^{0,376}}{u_{mf}^{0,937} \rho^{0,125}},$$

ahol

- H a rétegvastagság [cm],
 ρ_p a szemcse sűrűsége [g/cm³],

ρ_g a gáz sűrűsége [g/cm^3],
 g a gravitációs gyorsulás [cm^2/s],

Ha több szektorra osztott ágy van, akkor az eredő pl. két szektor esetén:

$$H_{\text{átl.}} = \frac{2}{\frac{1}{H_1} + \frac{1}{H_2}},$$

ahol

H_1, H_2 a rétegvastagságok [cm].

Példaként az alábbi értékekre elvégezve a számítást:

$$d_p = 0,12 \text{ cm}, \quad \rho_p = 2,1 \text{ g/cm}^3, \quad \rho_g = 3,1485 \cdot 10^{-4} \text{ g/cm}^3,$$

$$\nu = 1,423 \text{ cm}^2/\text{s}, \quad u = 250 \text{ cm/s}.$$

A számított értékek:

$$Ar = 5582,8, \quad Re_{mf} = 6,388, \quad u_{mf} = 75,75 \text{ cm/s}, \quad H = 101,74 \text{ cm}.$$

A fúvókák méretezése tapasztalati értékek alapján történik. A fúvóka-ellenállásra a réteg + az elosztó össznyomáscsökkenés legalább 30%-a adódjék. Ekkor biztosítható stabil áramlás. De lehetőleg ne legyen nagyobb, mint 2500 Pa.

Az átáramló levegőmennyiség a fúvókákon:

$$V = A_f u, \quad u = \frac{Re\nu}{d_f}, \quad A_f = \frac{d_f^2 \pi}{n},$$

ahol

A_f a fúvókák összfelülete,

u a sebesség,

d_f a fúvókaátmérő,

n a fúvókák száma.

3.4. A fluidtüzelésű kazán indítása és leállítása

A fluidizációs tüzelésű kazánok teljesítményének növekedésével és az energiarendszerbe történő belépésével fontossá vált, hogy indításuk és leállításuk folyamata is illeszkedjék az ilyen rendszerekben meglévő követelményekhez. Ehhez kapcsolódóan mind tüzeléstechnikai, mind pedig hőtechnikai problémák megoldásának szükségessége merül fel.

Hideg indításnál a kazánberendezés és az ágyanyag is környezeti hőmérsékleten van. Az ágyba táplált tüzelőanyag gyulladásához előzőleg az ágyat a gyulladási hőmérsékletre kell felfelemelegíteni. Barnaszeneknél az ágyanyagnak kb. 450–500 °C-ra való felfelemelegítése után lehet megkezdeni a szén betáplálását. A felfelemelegítés legtöbbször valamilyen segéd-tüzelőanyag, leginkább gáz vagy olaj felhasználásával történik. A felfelemelegítéshez vagy külön forró gázt termelő berendezést használnak vagy egyszerűbb megoldásként közvetlen az ágy felett elhelyezett indítóégőket, esetleg a kettő kombinációját. A forró gázt termelő indítógenerátor bonyolítja a rendszert, ezért az utóbbi időben a közvetlen tüzelési rendszert alkalmazzák. Indításkor az ágy felett elhelyezett égő üzembe helyezése után intenzív ágyanyagmozgatással végzik a megfelelő hőmérsékletre történő felfehévtést.

A tüzelés leállításakor a tüzelőanyag-adagolás megszüntetése után esetleg az ágy hűtésére lehet szükség, ami a fluidizáló levegő további áramoltatásával lehetséges [9].

Az ágyanyag hőmérsékletének különbsége felfelemelegítéskor:

$$\frac{T_2}{T_1} = e^{-\mu k F_B},$$

ahol

- T_1 a forró gáz és a szemcse között a hőmérséklet-különbség az ágyba való belépésnél,
- T_2 ugyanaz az ágyból való kilépésnél,
- μ a forró gáz vízértéke:

$$\mu = \frac{1}{C_1 G_1},$$

itt:

G_1 a forró gáz mennyisége,

C_1 a forró gáz közepes fajhője,

k a hőátadási tényező (szemcse felületén konvekció),

F_B az ágyban a szemcsék összfelülete,

A felvett hőmennyiség:

$$Q = T_1 C_1 G_1 (1 - e^{-\mu k F_B}),$$

ahol

Q_1 a hőáram (forró gázzemcse)

A felületi hőátadás hatásfoka:

$$\eta = 1 - e^{-\mu k F_B}.$$

A forró gázból a szemcsének átadott hőmennyiség:

$$Q_1 = G_1 C_1 (T_g - T_A) \eta,$$

ahol

T_g a forró gáz hőmérséklete,

T_A a t idő után az ágyhőmérséklet.

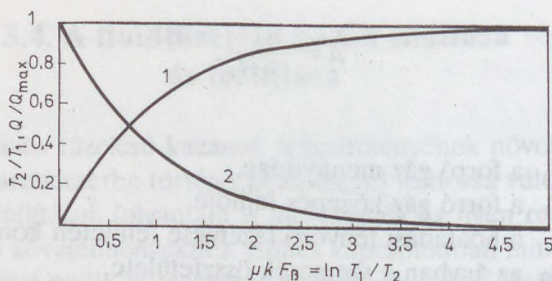
Ha $n=1$ értéket veszünk fel, az egyenlet:

$$Q_1 = G_1 C_1 [(T_{g0} - T_v t) - T_A],$$

ahol

T_{g0} a $t=0$ időpontban a forró gáz hőmérséklete,

T_v az időállandó.



3.10. ábra. Az ágyanyag hőfelvételének hatásfokváltozása [9]

3.2. táblázat

	$d_p = 0,35 \text{ mm } \varnothing$	$d_p = 1 \text{ mm } \varnothing$
Ágyanyag mennyisége [kg]	20661	20661
Szemcseszám	$3,4086 \cdot 10^{11}$	$1,4614 \cdot 10^{10}$
Felület [m^2]	131181	45913
α_p [$\text{W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$]	1057	702
$\mu k F$	10626	2470
$e^{-\mu k F}$	-0	-0
$\eta = 1 - e^{-\mu k F}$	1	1

A konvektív felmelegítés esetén az ágyban lévő szemcse hőfelvételének hatásfokváltozását a 3.10. ábra és a 3.2. táblázat mutatja.

A fűtőfelületeknél átadott hőmennyiség:

$$Q_2 = k_0 F_w (T_A - T_s),$$

ahol

k_0 a hőátadási tényező (szemcse – fűtőfelület),

T_A a hamu hőmérséklete,

F_w a hőátadási felület,

T_s a t időpontban a víz-, illetve gőzoldali közeghőmérséklet.

A k_0 hőátadási tényező a következőképpen fejezhető ki:

$$\frac{1}{k_0} = \frac{1}{\alpha_p} + \frac{1}{\alpha_i} \frac{d_a}{d_i} + \frac{d_a}{2\lambda} \ln \frac{d_a}{d_i} + \frac{s_s}{\lambda_s},$$

ahol

α_p a hőátadási tényező a szemcséről a fűtőfelületre,

α_i az elgőzölögtető cső külső oldali hőátadása,

d_a a fűtőfelület külső átmérője,

d_i a fűtőfelület belső átmérője,

λ a csőanyag hővezetési tényezője,

s_s a fluidágy keramikus fedésének vastagsága,

λ_s a kerámia hővezetési tényezője.

Az ágyhamu hőtartalmának változása:

$$\Delta Q = Q_1 - Q_2.$$

A [9]-ben található részletes levezetés helyett a végeredményeket közöljük.

Az ágyanyag hőmérséklete t idő eltelte után:

$$T_A = \frac{T_{g0}}{b} \left(1 - e^{-bt/t_b} \right) + \frac{T t_b}{b^2} \left(\frac{bt}{t_b} + e^{-bt/t_b} - 1 \right) + \frac{a}{b} T_s \left(1 - e^{-bt/t_b} \right) + T_{A0} e^{-bt/t_b},$$

ahol az egyes hőtechnikai értékek a következők:

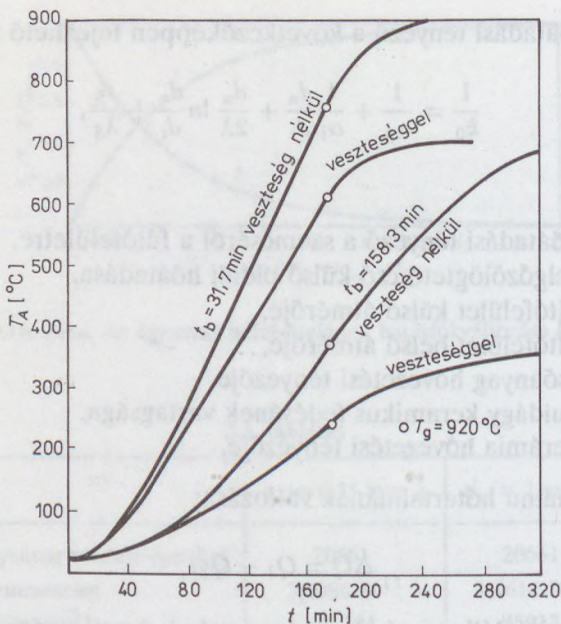
t_b az ágyanyag időállandója,

$$t_b = \frac{m_A c_A}{G_1 c_1},$$

m_A a hamu tömege,

c_A a hamu fajhője,

$$a = \frac{k_0 F_w}{G_1 c_1}, \quad b = 1 + \frac{k_0 F_w}{G_1 c_1},$$



3.11. ábra. Az időállandó befolyása az ágyanyag felmelegedésre [9]

A különböző ágyanyag-időállandók esetén a hőmérséklet-változást a 3.11. ábra mutatja.

Az indításhoz, illetve leálláshoz lényeges a víz-, illetve gőzoldali hőmérsékletek változásának ismerete. A vízoldali hőmérséklet-változás meghatározásához felírható mérlegegyenlet:

$$(T_A - T_s)k_0 F_w dt = dT_s(m_w c_w + m_{Fe} c_{Fe}),$$

ahol

T_s a vízoldali közeghőmérséklet,

k_0 a szemcse hőátadása a fűtőfelület irányába,

F_w a hőátadó fűtőfelület,

t az idő,

m_w a fűtőfelület tömege,

c_w a fűtőfelület anyagának fajhője,
 m_{Fe} az egyéb vasanyagok tömege,
 c_{Fe} az egyéb vasanyagok fajhője.

Ha az elgőzölögtető időállandóját felírjuk:

$$T_v = \frac{m_w c_w + m_{Fe} c_{Fe}}{k_0 F_w},$$

ezzel a következő differenciálegyenletet kapjuk:

$$\frac{dT_s}{dt} + \frac{T_s}{T_v} = \frac{T_A}{T_v}.$$

A differenciálegyenletet megoldva a gőz telítési hőmérsékletének változása:

$$T_s = T_A + C_1 e^{-t/T_v}.$$

A C_1 értékét a $t=0$, $T_s=T_{s0}$ feltételekkel lehet meghatározni, és így

$$C_1 = T_{s0} - T_A.$$

Ezt behelyettesítve a T_s végső kifejezése:

$$T_s = T_{s0} e^{-t/T_v} + T_A(1 - e^{-t/T_v}).$$

A T_A és T_s egyenleteinek és az időállandók ismeretében meghatározhatók az időbeli változások görbéi. Erre példát a 3.12. ábrán láthatunk.

A fejlesztett gőzmennyiség:

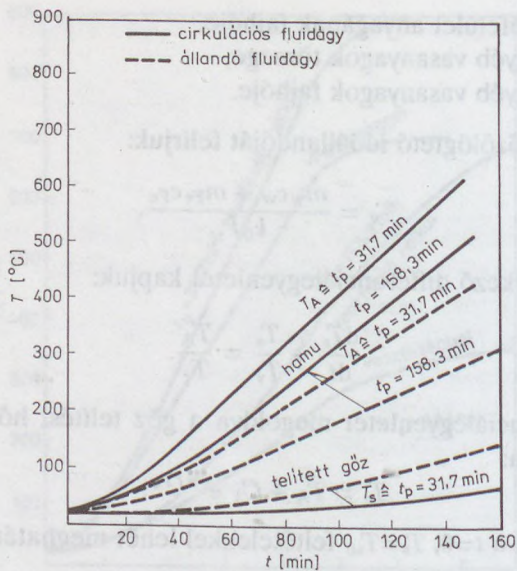
$$m_D = \frac{k_0 F_w}{h'' - h_e} (T_A - T_s),$$

ahol

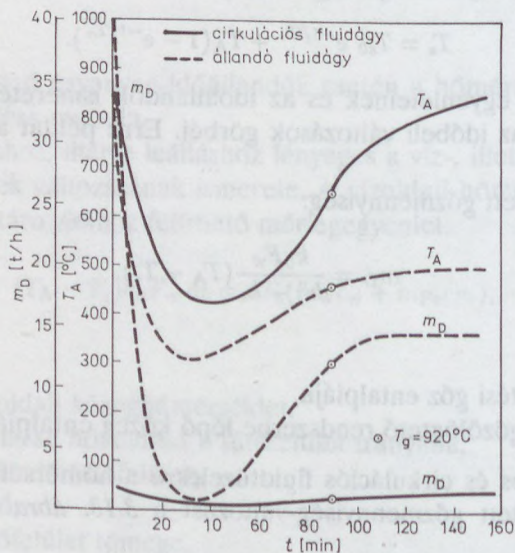
h'' a telítési gőz entalpiája,

h_e az elgőzölögtető rendszerbe lépő közeg entalpiája.

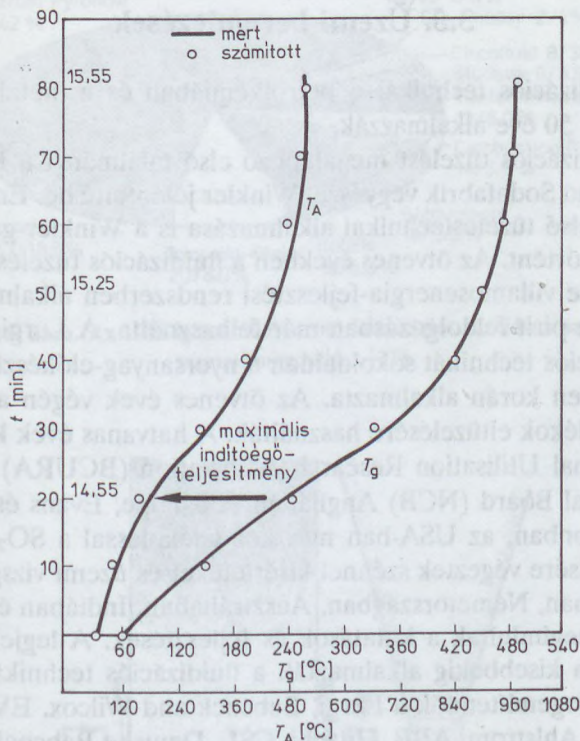
Buborékos és cirkulációs fluidtüzelésre a hőmérséklet-változást és a fejlesztett gőzmennyiség-változást a 3.13. ábra mutatja. Az



3.12. ábra. A hamu- és a telítési hőmérséklet változása [9]



3.13. ábra. A fejlesztett gőzmennyiség változása 8 órai leállás utáni újrainduláskor [9]



3.14. ábra. Az ágyanyag felmelegedése számított és mért értékeinek összehasonlítása [9]

indítást, mint említettük, forró füstgázzal történő ágyanyag-felmelegítéssel végzik. A [9]-ben közölt kísérleti és az egyenletekkel számított értékek a 3.14. ábrán példát szemléltetnek az ágyanyag felmelegedési folyamatára.

3.5. Üzemi berendezések

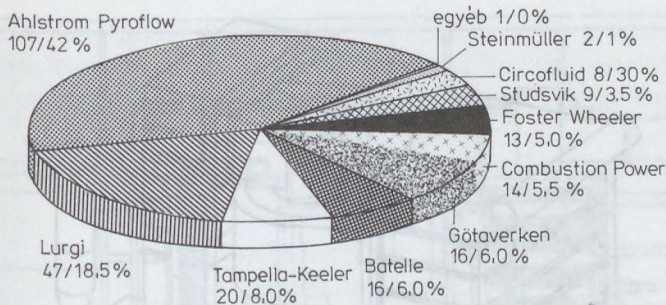
A fluidizációs technikát a petrolkémiai és a metallurgiában több mint 50 éve alkalmazzák.

A fluidizációs tüzelést megalapozó első találmányt a Badischen Anilin- und Sodafabrik vegyészete, 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 pirit feldolgozásban már felhasználta. A Lurgi Chemie a fluidizációs technikát sokoldalúan a nyersanyag-előkészítésben és termelésben 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 a SO_2 -emisszió csökkentésére végeztek szénrel 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. Megemlítendő a Lurgi, Babcock and Wilcox, EVT, Foster Wheelers, Ahlstrom, ABB, Hitachi, CSL, Deutsche Babcock-Cebu és még számos jelentős cég.

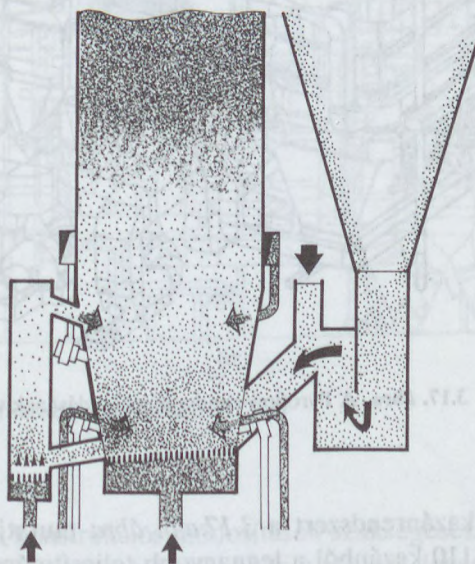
Az Ahlstrom cég a Pyroflow elnevezésű kazánját ipari kivitelben 1979-ben adta át üzemeltetésre, és 1987-ben az energetikai blokkban kivitelezett egység elérte a 110 MW_e teljesítményt. A Pyroflow rendszer előnyei:

- rugalmas tüzelőanyag-felhasználás,
- gyenge minőségű tüzelőanyagok eltüzelhetősége,
- többfajta tüzelőanyag együttes alkalmazása,
- az emissziós előírások jól betarthatók,
- nem szükséges komplex kémiai tisztítás,
- magas hatékonyság és rendelkezésre állás,
- egyszerű konstrukció.

A cirkulációs tüzelési rendszerek közül jelenleg a Pyroflow a

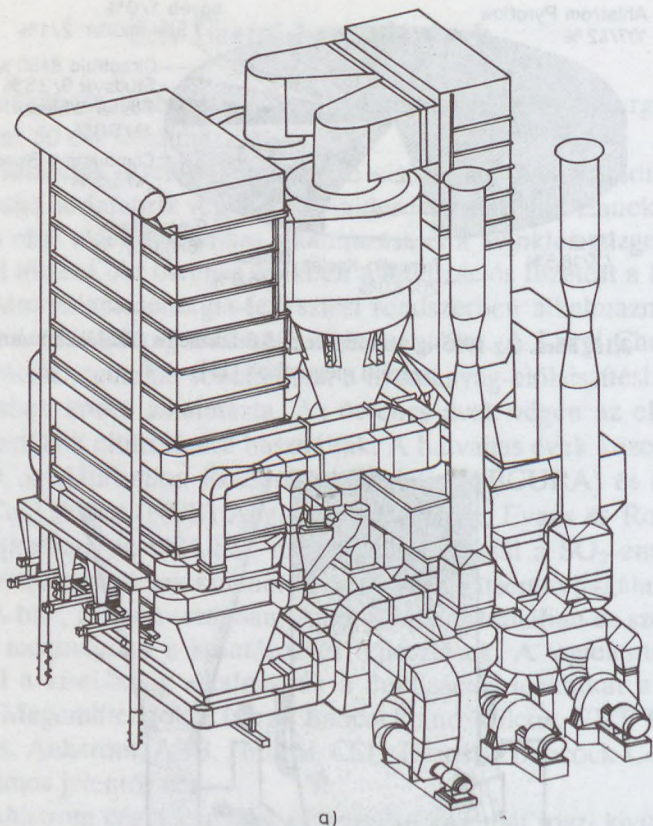


3.15. ábra. Az 1995-ig üzembe kerülő fluidizációs tüzelések szám szerinti megoszlása [11]



3.16. ábra. A Pyroflow-rendszer elve [11]

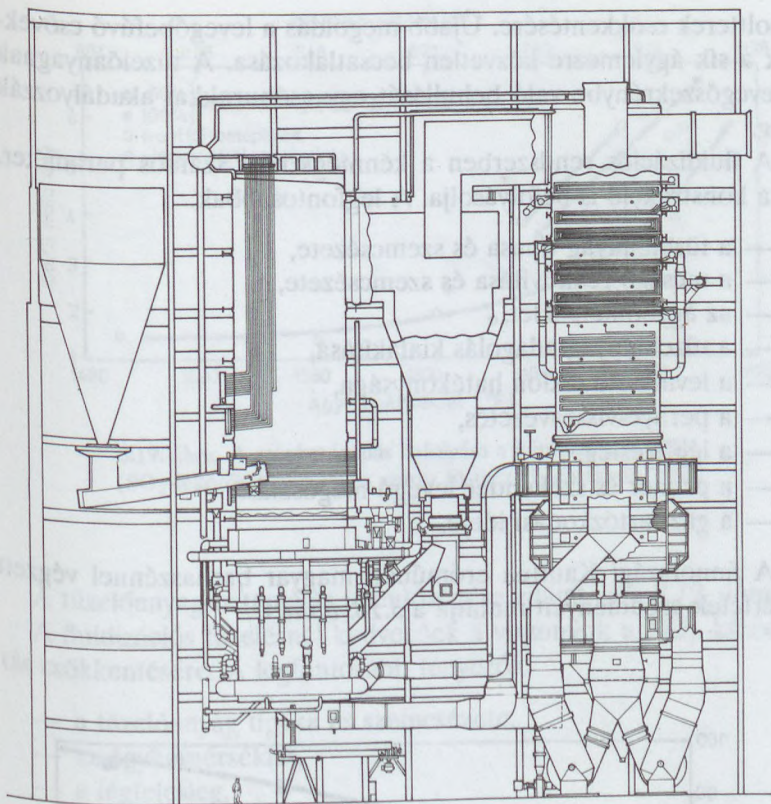
legszélesebben elterjedt világszerte, mint azt az 1995-ben üzembe kerülő 253 berendezés szám szerinti megoszlását mutató 3.15. ábrából láthatjuk. A Pyroflow rendszer tüzelési vázlatát a 3.16. ábrából



3.17. ábra. A Pyroflow-rendszer megoldásának vázlata (a)

ra és a teljes kazánrendszert a 3.17.a,b. ábra mutatja. A jelenleg üzemben lévő 110 kazánból a legnagyobb teljesítményű 125 MW_e -os, és egy 165 MW_e -os kazán, amely 1993-ban lépett üzembe. Az Ahlstrom 300 MW_e teljesítményű blokk szállítását jelenleg is vállalja.

Ha a kazánt többfajta tüzelőanyagra tervezik, például lignitre és feketeszénre, úgy a tervezést előnyös a gyengébb minőségűre végezni. Ekkor a tüzelőanyag-váltás üzemvitelileg megoldható. Fordított



b)

és a Pyroflow-rendszer összeállítása (b) [11]

esetben kisebb konstrukciós módosítások szükségesek. Ha lignit tüzelőanyag kerül felhasználásra, akkor a primer levegő aránya kb. 40% és a szekunder levegőé 60%, míg feketeszénél a primer levegőé 60% és a szekunder levegőé 40% [11].

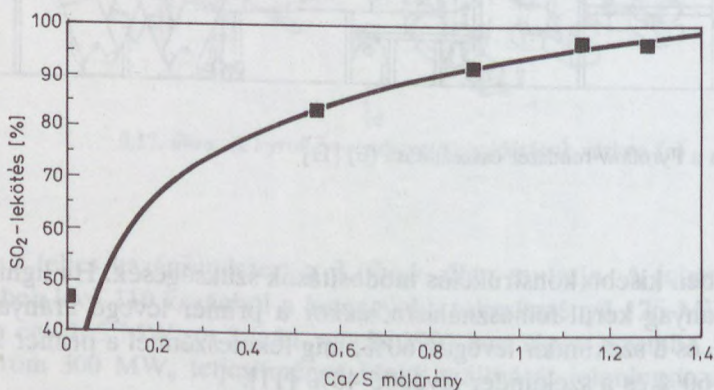
Konstrukció szempontjából is a levegőfúvókák többféle változatát találjuk. A legelterjedtebb a fúvókacsöveken radiális irányba elhelyezett furatokkal való megoldás, esetleg a furatok tengelyének belülről kifelé történő lejtésével az elrakódás megakadályozására és

a holtterek csökkentésére. Újabb megoldás a levegőbefúvó csöveknek a sík ágylemezre közvetlen becsatlakozása. A tüzelőanyagnak a levegőszekrénybe való behullását egy csőhurokkal akadályozzák meg.

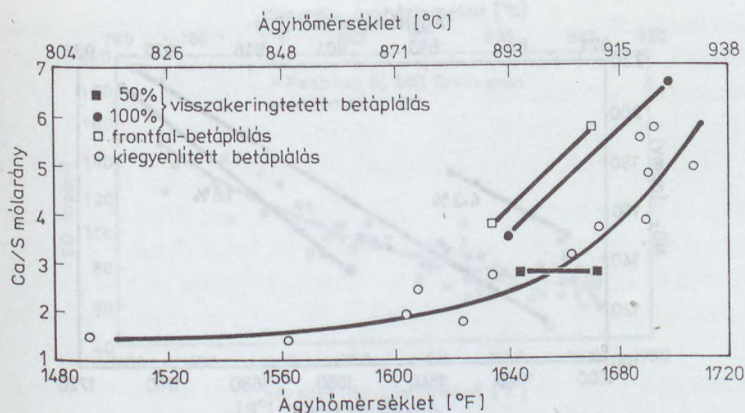
A fluidizációs rendszerben a kénmegkötést számos paraméter, de a konstrukció is befolyásolja. A legfontosabbak:

- 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 levegő megoszlása,
- a gáz tartózkodási ideje.

A finnországi Kauttua erőműben magyar barnaszénnel végzett kísérletek eredményeit mutatja a 3.18. ábra.



3.18. ábra. A Kauttua erőműben magyar barnaszénnel végzett kénlekötési kísérletek eredményei [11]



3.19. ábra. A szénbetáplálás befolyása a kénlekötésre [11]
(SO_2 -lekötés $70\% \pm 3\%$, a száraz füstgáz O_2 -tartalma 3%)

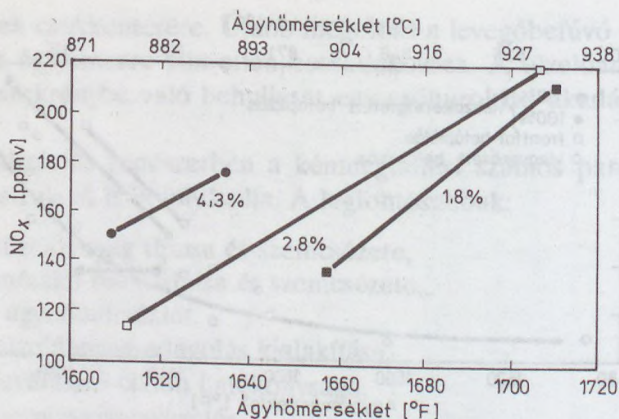
A tüzelőanyag-betáplálás jelentőségére világít rá a 8.19. ábra. A fluidizációs tüzelésnél kedvezőek a viszonyok a NO_x -kibocsátás csökkentésére. A legfontosabb tényezők:

- a tüzelőanyag típusa és szemcsézete,
- az ágyhőmérséklet,
- a légfelesleg,
- a primer és szekunder levegő megoszlása,
- a Ca/S arány,
- a tüzelőanyag-adagolás kialakítása.

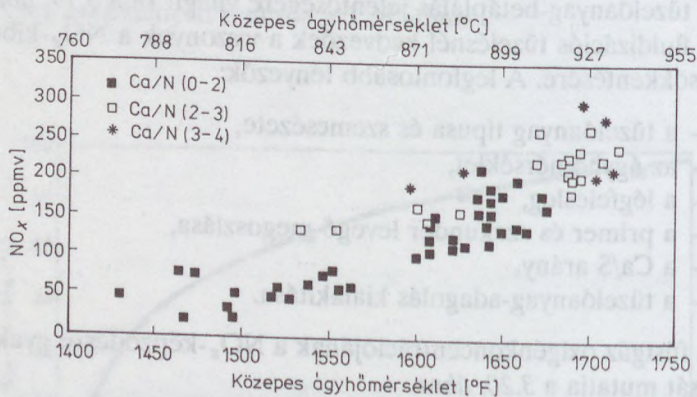
A füstgáz oxigénkoncentrációjának a NO_x -képződésre gyakorolt hatását mutatja a 3.20. ábra.

A SO_x - és NO_x -kibocsátáson kívül nagy jelentősége van a CO -, C_xH_y - és VOC-emisszió korlátozásának. Ennek mértékét a következő legfontosabb tényezők befolyásolják:

- a tüzelőanyag fajtája és szemcsézete,
- a tüzelőanyag-adagolás megoldása,
- az ágyhőmérséklet,
- a légfelesleg,



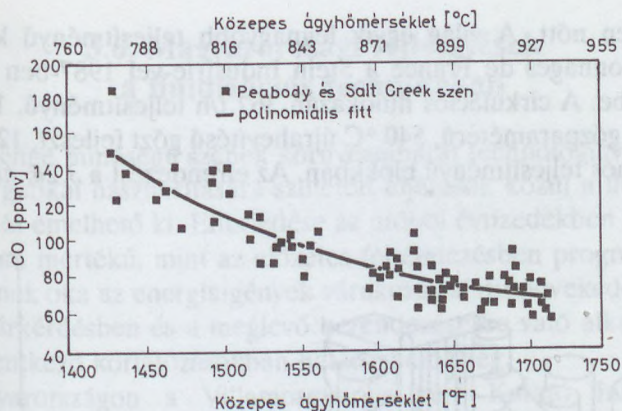
3.20. ábra. A füstgáz oxigénkoncentrációjának befolyása a NO_x-képződésre [11]



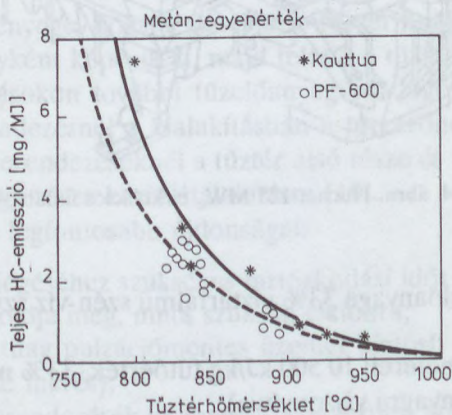
3.21. ábra. Az ágyhőmérséklet hatása a NO_x-emisszióra [11]

- a levegőelosztás,
- a gáz tartózkodási ideje.

A hőmérséklet befolyását a NO_x-emisszióra a 3.21. ábra, a CO-



3.22. ábra. Az ágyhőmérséklet hatása a CO-emisszióra [1]

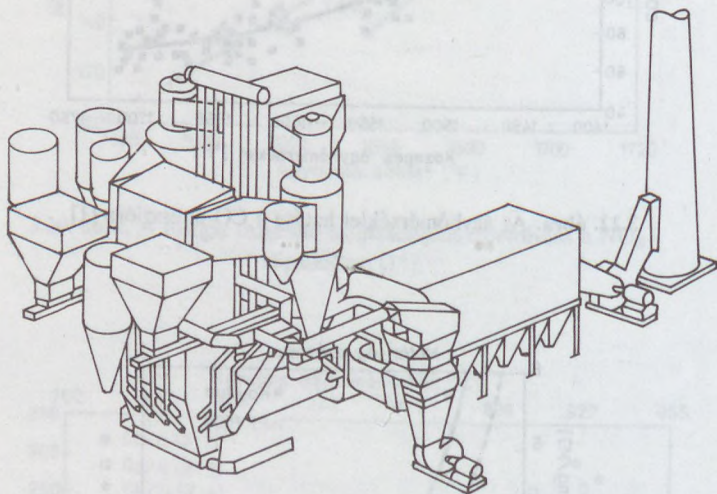


3.23. ábra. A tüztérhőmérséklet szerepe a teljes HC-emisszióra [11]

kibocsátásra a 3.22. ábra mutatja, és a C_xH_y -emissziót a tüztérhőmérséklet függvényében a 3.23. ábrán láthatjuk.

A fluidizációs tüzeléssel elérhető teljesítmény az utóbbi időben

jelentősen nőtt. A világ egyik legnagyobb teljesítményű kazánját a Charbonnages de France a Stein Industrie-vel 1987-ben helyezte üzembe. A cirkulációs fluidkazan 367 t/h teljesítményű, 134 bar, 5445 °C gőzparaméterű, 540 °C újrahevítésű gőzt fejleszt, 125 MW_e elektromos teljesítményű blokkban. Az elrendezést a 3.24. ábra mutatja.



3.24. ábra. Huchet 125 MW_e cirkulációs fluidblokk

A blokk tüzelőanyaga 33% víztartalmú szén-víz szuszpenzió vagy száraz iszap.

A szén paraméterei: 10 500 kJ/kg fűtőérték, 33% nedvesség, 45% hamu (száraz anyagra viszonyítva).

Az iszapé: 20 300 kJ/kg fűtőérték, 8% nedvesség és 28% hamu (száraz anyagra).

A kén tartalom viszonylag magas, kb. 0,9 mg/kJ. A szemcseméret 0–3 mm közötti.

3.6. Magyarországi fejlesztések a fluidizációs technikában

A gyenge minőségű szén környezetbarát technológiával történő energetikai hasznosítására született eljárások közül a fluidizációs tüzelés emelhető ki. Elterjedése az utóbbi évtizedekben mégsem volt olyan mértékű, mint az előzetes feltételezésben prognosztizálták. 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 (VEIKI) a legkorszerűbb tüzeléstechnikai és égésméleti ismeretek alapján egy kombinált fluidizációs – hideg tűztérű örvényes fluidtüzelés került kifejlesztésre, amely mind új berendezéseknél, mind régebbi berendezéseknél mérsékelt anyagi és pénzügyi ráfordítással alkalmazható.

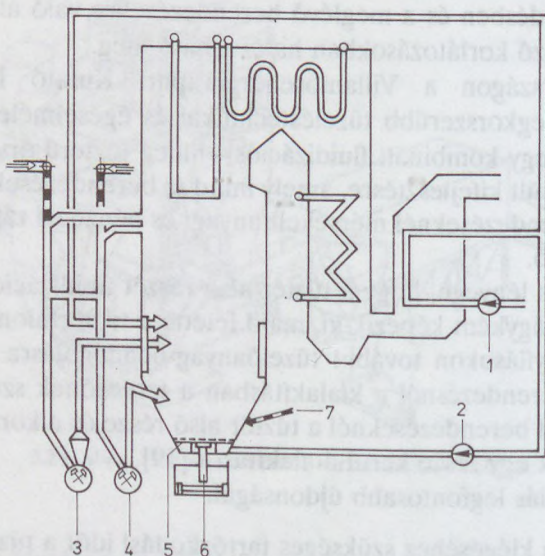
Az eljárás lényege, hogy a tűztér alsó részét fluidizációs tüzelésre alkalmas ágyként képezik ki, majd felette a tűztérfalon kiképzett megfelelő nyílásokon további tüzelőanyag-beadagolásra van lehetőség. Új berendezésnél a kialakításban a tervezőnek szabad keze van, míg régi berendezéseknél a tűztér alsó része és a korábbi szénőrlő malmok egy része kerül átalakításra [19].

A megoldás legfontosabb újdonságai:

- a szén kiégéséhez szükséges tartózkodási időt a tűztéri cirkulációval oldja meg, nincs szükség ciklonra;
- gyakorlatilag pulzációmentes üzemet biztosít (Ajakai Erőműben BME mérés);
- a régi berendezések viszonylag egyszerűen átalakíthatók;
- 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.

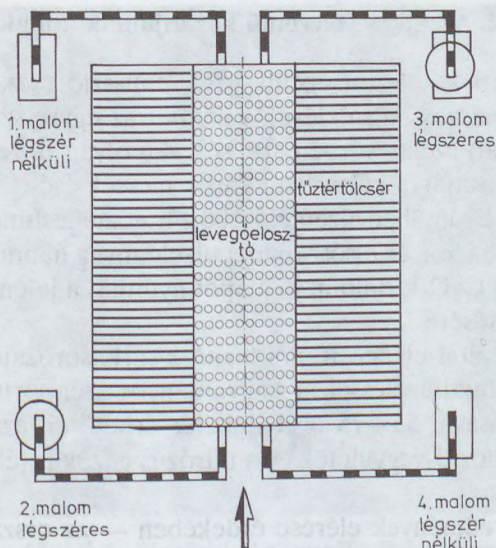
3.6.1. Üzemi megvalósítás a Tatabányai Hőerőműben

A méretezési elvek tisztázásával és félüzemi kísérletek elvégzése utáni szabadalomképes új elvek alapján került sor a fluidizációs technika hazai szélesebb körű üzemi alkalmazására (3.25. ábra). Az első üzemi kísérletek sikeresek voltak.



3.25. ábra. VEIKI hibrid fluidrendszer kapcsolása [14]
1- nyomóventilátor, 2- fluidizáló ventilátor, 3- légszéres malom,
4- légszér nélküli malom, 5- levegőelosztó, 6- rétegürítő cső,
7- indító olajjégő

A megoldással Magyarországon a Tatabányai Hőerőműben egy 50 t/h gőzteljesítményű kazánnal több év üzemi tapasztalat állt rendelkezésre. Az eljárás előnye, hogy a tüzelőanyag a fluidágyba és a tüztér különböző részére a tüzelésnek megfelelő előkészítettséggel (száritás, szemcseméret stb.) kerül betáplálásra (3.26. ábra).



3.26. ábra. VEIKI hibrid fluid-szénbetáplálás kapcsolása, vázlata az Ajkai Erőmű kazánjai esetén [14]

A fluidágy hőteljesítménye a szokásos értéknek két-háromszorosát ($4-5 \text{ MW/m}^2$) éri el. A tüzelőanyag-minőségre még a szokásos fluidtüzelésekhez képest is érzéketlenebb (gyenge minőségű szenek, nagy hamu- és nedvességtartalmú anyagok, szénmosási termékek, hulladékok stb.). A régebbi berendezések segédberendezéseinek jelentős része közvetlenül vagy kisebb módosításokkal felhasználható.

A környezetvédelmet tekintve a megoldás további intézkedések nélkül is jelentős eredményt hoz. A nagy kén tartalmú szenek kénlekötése a saját hamu kénlekötésének jelentős növekedésével növekszik. Adalékolással ez megfelelőképpen növelhető. A nitrogén-oxidok csökkentése a több fokozatú, rugalmas levegőadagolással és a betáplált tüzelőanyagok megfelelő arányával érhető el. A nitrogén-oxidok csökkentése tehát a többfokozatú tüzelési elv alapján biztosítható.

3.6.2. Az Ajkai Hőerőmű kazánjainak átalakítása

Nemzetközi kötelezettségeink (SO_2 -emisszió csökkentése, illetve NO_x -kibocsátás mérséklése), valamint az egyre szigorúbb hazai előírások miatt széles körben szükség van olyan új technológiákra, amelyek biztosítják a környezeti károk mérséklését.

Az Ajkai Erőműben üzemelő 100 t/h gőzteljesítményű kazánok tüzelőanyag-bázisa, és elsősorban a tüzelőanyag hamutartalmára jellemző magas CaO -tartalom, jó alapot nyújthat a jelentős kénemisztio csökkentésére.

A VEIKI által elvégzett előkészítő kísérletsorozatok bizonyították, hogy a fluidtüzeléssel, a hagyományos szénportüzelés megfelelő átalakításával 55–75% kénlekötés érhető el, azaz a levegőbe távozó kén-dioxid-vegyületek és a nitrozus gázok is jelentősen csökkenthetők.

A fenti eredmények elérése érdekében — az országban először ebben a nagyságrendben — a kazán szerkezetében, a tüzeléstechnikában és az irányítástechnikában is alapvető módosításokat kellett végrehajtani.

a) Szerkezeti módosítások

A kazánfenék átalakításával ki kellett alakítani a fluidizációs technológia legfontosabb elemét, a levegőelosztó fúvókarendszert.

A membránfalas természetes cirkulációjú kazán sík membrán fenékkal való lezárása és ennek a cirkulációs körbe történő bekötése kedvező megoldás, amely biztosítja a fenék mindenkor biztonságos hűtését, és azzal az előnnyel jár, hogy gáztömör kialakítás révén jelentősen csökkenthető a hamis levegő betörésének mértéke, ami végső soron hatásfokjavulást eredményez. Ilyen módon a tüzelőanyag-felhasználás is csökkenthető, ami viszont közvetlenül mérsékli a károsanyag-kibocsátást (3.27. ábra).

A tüzelési viszonyok javítása érdekében, a tüztéren belüli tartózkodási idő növelésére — ami fontos a kalcium-oxid és SO_2 szilárdgázfázisok közötti reakciók kialakulásában — azt a megoldást alkalmaztuk, hogy a tüztéren belül függőleges visszaáramlást alakí-



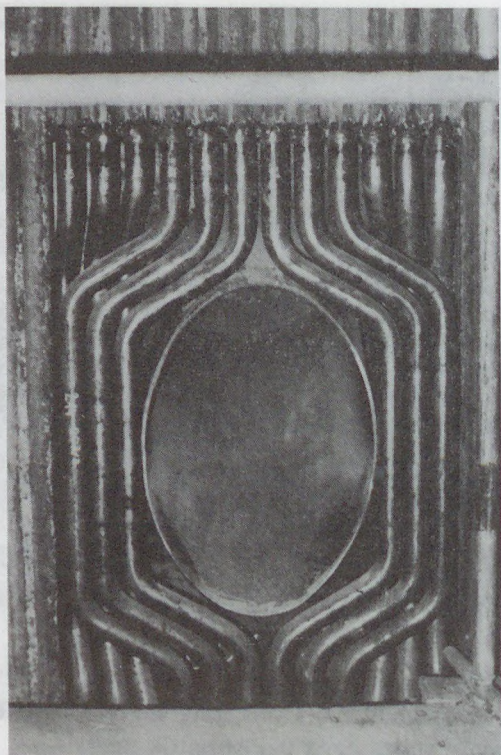
3.27. ábra. Az Ajkai Erőmű kazánjainál a levegőfúvóka-rendszer megoldása

tunk ki, a befúvott levegő különböző sebességeinek beállításával. A középső, ún. főrétegben 5–7 m/s, míg a szélső mellékrétegekben 2–3 m/s befúvási sebességek valósíthatók meg.

Az előzetes számítások szerint a tüztérben kialakuló két függőleges recirkulációs zóna olyan többlet-porterhelést eredményez, amelynek hatásaként a tüztér magasság menti hőmérséklet-eloszlása lényegesen homogénebbé válik, és a csúcshőmérséklet sem haladja meg az 1050 °C-t. Ez azt jelenti, hogy a jelenlegi állapothoz képest mintegy 300 °C-kal csökken a tüztér hőmérséklete, ami közismerten előnyös a keletkező nitrózus gázok mennyiségének csökkentésében.

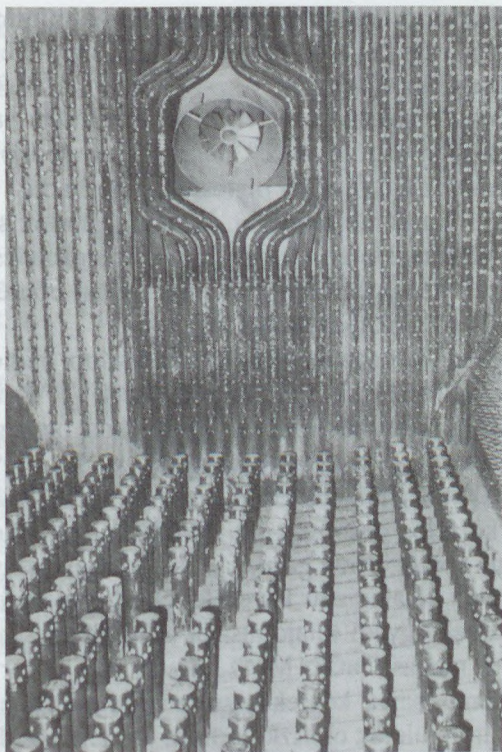
A hőmérséklet ilyen mértékű csökkenése biztosítja az Ajkára nézve jellemző salakosodás elkerülését.

A kazán névleges teljesítőképességének (100 t/h) megőrzése mellett lehetőség van a fluidtüzelés és a hagyományos szénportüzelés együttes alkalmazására is. Ezt elősegítendő, módosítottuk a szénporégók elhelyezését (3.28. ábra). A szénporbefúvók a kazán sar-



3.28. ábra. Ajkai Erőmű 100 t/h teljesítményű kazánjainál
a szénbefűvő nyílások kialakítása

kaiból átépítésre kerültek a kazán mellső és hátsó falára oly módon, hogy biztosítható legyen a fluidágy, illetve a fluidágy feletti réteg tüzelőanyag-ellátása is. A módosított tüzeléstechnikai eljárás szükségessé teszi a levegőrendszer módosítását is, figyelembe véve a legújabb kutatási eredményeket, nevezetesen a levegő késleltetett hozzávezetését, ami szintén csökkenti a nitrogén-oxidok képződését.



3.29. ábra. Az Ajkai Erőmű 100 t/h teljesítményű kazán
olaj indítóégőjének elhelyezése

b) Tüzeléstechnikai módosítások

A fluidizációs technológia a korábbinál lényegesen durvább szemcse-összetételű tüzelőanyagot igényel, ennek érdekében két malom átalakításával biztosítjuk a durvább kiörlést. A szemcsefinitomság beállítására szolgáló szerkezeti elem, az ún. légszér elhagyása eredményeként jelentős energiamegtakarítás és az őrlőberendezés kopóelemeinek élettartamában 4-500%-os növekedés érhető el. Ez fokozza a kazán üzembiztonságát és rendelkezésre állását. A

fluidtüzelés alkalmazásával garantálható a kazán minimális terhelése 40 t/h értéken, olaj támasztótüzelés nélkül, ami lehetővé tette az olajrendszer megszüntetését.

A kazán hideg állapotban történő indítása külön saját olajégővel és automatikával történik (3.29. ábra). A mindenkori szénminőségtől függően a felfűtő olajégő biztosítja a gyulladási hőmérséklet eléréséhez a többlet-hőmennyiséget. Ez a vizsgálatok szerint 650–700 °C. Ezen hőmérsékleten a szénadagolás megkezdését követően állandósítani kell az ágyban a 850 °C üzemelési hőmérsékletet, és ekkor a felfűtő égők kikapcsolhatók.

A fluidtüzelés alkalmazásával minden további nehézség nélkül megoldható — a romló szénminőség ellenére — az ajkai tüzelőanyag hasznosítása. A széntüzelésű kazánoknál gyenge minőségű szén tüzelése esetén a tüzelés stabilitása kb. 70–80% kazánterhelésig biztosítható. Fluidizációs tüzelésnél a minimális terhelést a vízdoldali cirkulációs viszonyok határozzák meg. Lehetőség van a villamosenergia-rendszerben gazdasági okok miatt kényszerűségből egyre gyakrabban alkalmazott keverékszen eltüzelésére is.

Az ajkai szenek egyedi tulajdonsága a különleges hamuösszetétel. Jellemző a magas CaO -, MgO -, K_2O -, Na_2O -tartalom. Ezek az alkotók a hamu "saját" kénlekötése szempontjából előnyösek, de az alkáliák a fűtőfelületek elpiszkolódását okozhatják. Ezek ugyanis a tűztérben alacsony olvadási hőmérsékletű eutektikumokat képeznek, egy részük szublimál, majd az autofűtőfelületeken kondenzálódva, "első" réteget alkotnak.

A tűztéri lerakódások szimulációját laboratóriumi ejtőcsöves készülékben megvizsgálva, a 300 °C felületi hőmérsékletű szonda felületén a maximális lerakódási sebesség 1000 °C körül tapasztalható, és 950 °C alatt nem indul meg lerakódás. Az ajkai szénrel végzett félüzemi és üzemi fluidizációs tüzelési kísérleteknél nem jelentkeztet pernyelerakódás.

Tervezési szénminőség:

Nedvesség	18,8%
Hamu	34,9%
C	29,83%
H	1,4%
Sc	3,17%
O	11,4%
N	0,4%
Fűtőérték	9643 MJ/kg

A kazánok műszaki adatai:

Nyomás a túlhevítő kilépésnél	73,6 bar
Gázhőmérséklet a túlhevítő kilépésnél	500 °C
Tápvíz-hőmérséklet	190 °C
Maximális teljesítmény (a tervezett 190 °C tápvízzel)	100 t/h (27,8 kg/s)
Csúcsteljesítmény	120 t/h (33,3 kg/s)
Levegő-előmelegítés	260 °C 305 °C

A kazánátalakítás tervezési adatai:

Maximális teljesítmény (190 °C tápvízzel)	120 t/h (33,3 kg/s)
Gőz hőigénye (2596 kJ/kg)	86 533 MW
Tüzelőanyag-hő (85% kazánhatásfoknál)	101,7 MW
Füstgázképző szénhő (89% hőátadási hatásfokkal)	97 228 MW
Tüzelőanyag-áram 9643 MJ/kg fűtőértékű szénnel	37,97 t/h (10,55 kg/s).

c) A tüzeléstechnológiáról

A konstrukció működésmódja: a gyors, kis keresztmetszetű réteggel a tüztérben belül növelt por- és gázkeringtetés generálása, mely a gázhőmérsékletet is alacsony szinten homogenizálja, és a növelt porkoncentrációval és a por által növelt hőátadással biztosítja a falaknál a gőz párolgáshőjének megfelelő hőfelvételt. A gyenge

szénminőségre való alkalmasság, a nagyobb teljesítményre továbbfejlesztés mellett még a kén-dioxid-emisszió csökkentése szempontjából is optimált technológia szükséges. E célból célszerű:

- a szén és éghető kéntartalom minél nagyobb részének a rétegben való felszabadítása,
- a réteg feletti térben a hőmérsékletcsúcsok lehető csökkentése: egyenletes, $880\text{ }^{\circ}\text{C}$ alatti hőmérsékletszint biztosítása,
- a tüztéri porkeringtetés fokozása,
- a lényegében adiabatikus rétegben (por-konvekció) hűtés biztosítása,
- ha a rétegben a tüzelés fokozható, magasabb réteg alkalmazása.

A fenti szempontok érvényesítése kölcsönhatásban van, így az esetleges fokozott rétegtüzelés előfeltétele a többlethűtés és nagyobb tüztéri porkeringtetés lehetősége.

3.6.3. Mérési eredmények

A hibrid-fluid tüzelési rendszer eredményességének megítélése érdekében kazánhatásfok- és károsanyagemisszió-méréseket végeztünk. A kazán indirekt módszerrel számított hatásfoka névleges 100 t/h terhelésen $85,9\%$ -ra adódott. Ez az érték mintegy 2% hatásfokjavulást jelent a hibrid-fluid tüzelés javára.

A kén-dioxid-lekötés mértékét (1991. május 27–30. közötti mérések alapján) a szénnel bevitt összes kénre vonatkoztatva, mészkő adalékolás nélkül, $6\%\text{ O}_2$ -re átszámítva a 3.3. táblázat tartalmazza. A mért értékek még első üzembevétel utáni állapotot mutatnak.

A kénmegkötés mértékét mészkőadalékolás nélkül a tüzelési mód és a szénnel bevitt összes kén (S), valamint szénhamu kalciumtartalma (Ca) határozza meg döntően, ami az ajkai szénnél kedvező. Éppen ezért volt kézenfekvő a tüzelési mód megváltoztatása, mert a hibrid-fluid tüzeléssel jobban kihasználható a szénnek ez a sajátossága, mint a szénporttüzelésnél. Az ajkai szénporttüzelésű kazánoknál korábban mért kénmegkötéserőterek az összes bevitt kénre vonatkoztatva $15\text{–}25\%$ -os tartományba estek.

3.3. táblázat

Gőztermelés [t/h]	Malompozíció	SO ₂ [mg/Nm ³]	NO _x [mg/Nm ³]	Kénmegkötés [%]
102,5	1-2-4	5724	546	59,7
94,3	1-3-4	4155	680	70,4
73,4	1-4	5022	689	70,9

(A mérések idején csak a 2. sz. malom volt légszéres.)

A hibrid-fluid tüzelés a bevitt összes kénre vonatkoztatott kénmegkötés/Ft ráfordítás arányszámával előkelő helyet foglal el a kén-telenítő technológiák sorában.

3.7. Nyomás alatti fluidtüzelés

A nyomás növelése a fluidizációs tüzeléseknél is régóta igény a tüzeléstechnikában. Különösen előtérbe került ez a törekvés a gőzgáz 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-égőtestben történő eltüzelése.

Fluidkazán – gázturbina közvetlen kapcsolat

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

3.4. táblázat

	ESCATRON	TIDD	VÄRTAN
Kiadott teljesítmény Fluidkazán	79 MW _e 1 × P200	70 MW _e 1 × P200	130 MW _e + 210 MW _t 2 × P200

3.5. táblázat

	ESCATRON	TIDD	VÄRTAN
Szén	lignit (fekete)	Ohio-i	lengyel
Kén [%]	7	4	1
Hamu [%]	36	10	15
Adalék	mészkö	dolomit	mészkö, dolomit
Betáplálások száma	16	6	6
Ciklonok száma	9 × 2	7 × 2	7 × 2
Gőznyomás [bar]	95	90	140
Gőzhőmérséklet [°C]	510	496	540
Légfelesleg [%]	15	25	25
Fluidizálósebesség [m/s]	0,9	0,9	0,9
Ágymagasság [m]	3,5	3,5	3,5
Fluidágynyomás [bar]	12	12	12
Szénmennyiség [kg/s]	18,0	7,2	2 × 8,0
Adalékmennyiség [kg/s]	7,0	2,3	2 × 0,75
Gőzmennyiség [kg/s]	60,0	56,0	114,0
Kénleválasztás [%]	90,0	90,0	85,0
Ca/S [mol/mol]	1,8	1,6	1,3
No _x -emisszió [mg/MJ]	150,0	250,0	70,0

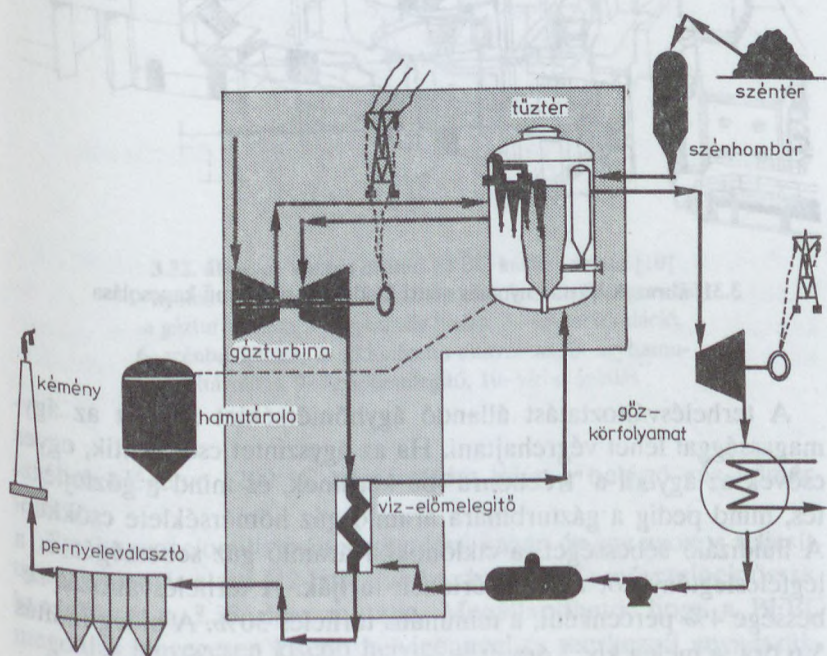
3.4. táblázatban, a kazánok tüzelőanyagának, gőz- és egyéb adatainak jellemző paraméterei a 3.5. táblázatban láthatók [10].

A megépült erőművekkel szerzett első tapasztalatok elsősorban a ciklonok működésénél mutattak problémát. Különösen az ESCATRON tervnél, a nagy hamutartalom miatt, a gázturbinára áramló gáz a tervezettnél nagyobb porkoncentrációt tartalmaz,

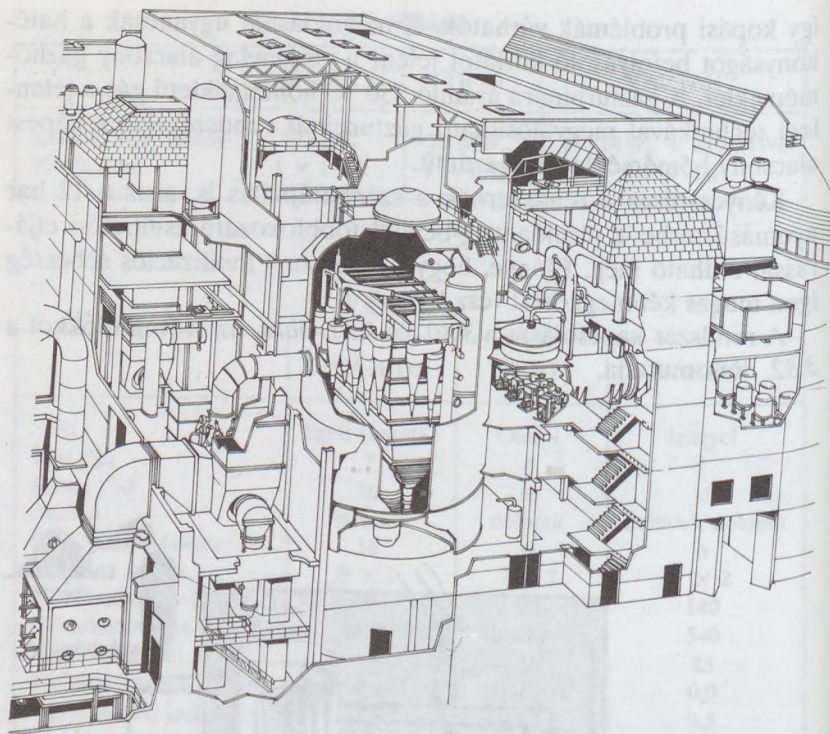
így kopási problémák várhatók. E megoldásnál ugyancsak a hatékonyságot befolyásoló korlátot jelent a viszonylag alacsony gázhőmérséklet. A gázturbinára áramló $850\text{ }^{\circ}\text{C}$ hőmérsékletű gáz a jelenlegi technikával megvalósítható gázturbinás rendszerekhez képest alacsony hőmérsékletűnek számít.

Kényes része a rendszernek a szénbetáplálás is, azaz a 12 bar nyomású térbe a tüzelőanyag-bevitel többfokozatú zsilipelési eljárással oldható meg. Előnye, hogy az alacsony fluidizációs sebesség igen magas kénmegkötést tesz lehetővé.

A rendszer kapcsolását a 3.30. és 3.31. ábra, az erőmű blokkot a 3.32. ábra mutatja.



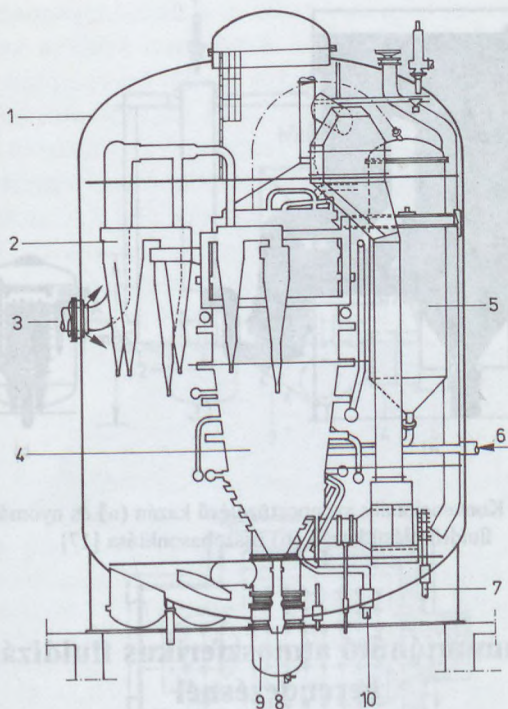
3.30. ábra. Nyomás alatti fluidkazan és közvetlen gáz-gőzturbina ciklus kapcsolása



3.31. ábra. A Värtan nyomás alatti fluidtüzelésű erőmű kapcsolása

A terhelésváltoztatást állandó ágyhőmérséklet mellett az ágy-magassággal lehet végrehajtani. Ha az ágy szintet csökkentik, egyes csövek az ágyból a "freeboard"-ba kerülnek, és mind a gőzfejlesztés, mind pedig a gázturbinára áramló gáz hőmérséklete csökken. A fluidizáló sebességet, a ciklonokba áramló gáz sebességét és a légeleslegtényezőt állandó értéken tartják. A terhelésváltozás sebessége 4% percenként, a minimális terhelés 30%. A hideg indítás 5-6 óra, a meleg kb. 2 óra.

A nyomás alatti fluidtüzelések hatékonyságának növelésére a tüzelőanyag elgázosítását végzik, a fluidágyban és a gázturbina égő-

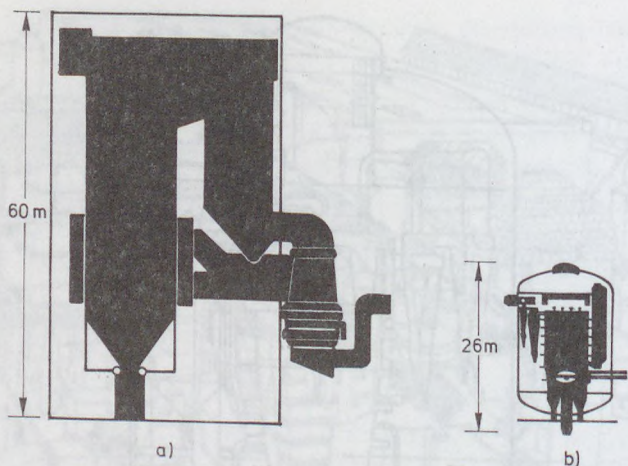


3.32. ábra. A Värtan erőmű PFBC kazán vázlata [10]

- 1- nyomás alatti tartály, 2- gáztisztítás, 3- a kompresszortól a gázturbinához, 4- ágytartály kazán, 5- ágyrecirkuláció, 6- szénbetáplálás, 7- ciklonhamu-eltávolítás, 8- ágyhamu-eltávolítás, 9- ágyelőmelegítő, 10- vízbetáplálás

terében elégetve $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ hőmérséklet lehet a belépő gáz hőmérséklete.

Egy konvencionális szénportüzelésű kazán és egy azonos teljesítményű nyomás alatti (12 bar) fluidkazán (PFBC) méreteinek összehasonlítását a 3.33. ábra mutatja. Megállapítható, hogy a PFBC megoldás lényegesen kisebb helyigénnyel és szerkezeti anyagszükséglettel jár.

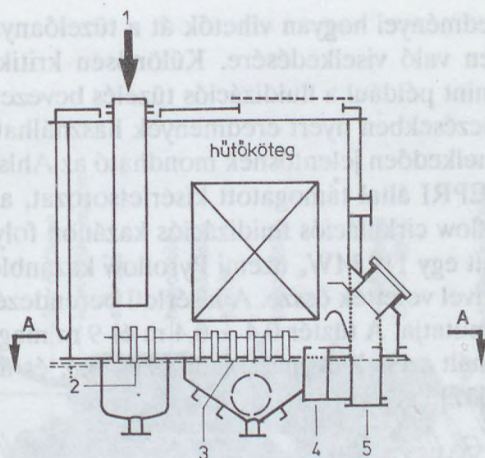


3.33. ábra. Konvencionális szénportüzelésű kazán (a) és nyomás alatti fluidtüzelésű kazán (b) összehasonlítása [17]

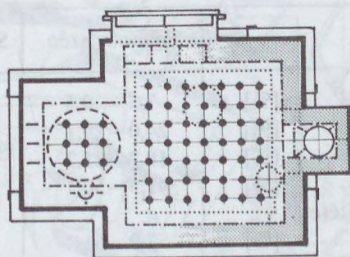
3.8. Hamuutóhűtő atmoszferikus fluidizációs berendezésnél

A fluidágyból eltávolításra kerülő ágyanyagot a hőveszteség csökkentése céljából utóhűtőn keresztül vezetik át. Az utóhűtőre számos konkrét konstrukció született, egy példát mutat a 3.34. ábra. Az utóhűtő fluidizálással működik. Az utóhűtőbe jutó nagyobb szemcsék ($> 15 \text{ mm}$) eltávolításáról külön, a kézi működtetésű leeresztővel kell gondoskodni [16].

Az eltávolított ágyanyag hűtésének különösen nagy hamutartalmú szenek tüzelésekor van jelentősége a hőveszteség csökkentése szempontjából. A forró hamuból nyert hőt általában a gőzfejlesztés hőáramában vagy az égési levegő előmelegítésére hasznosítják.



A A



3.34. ábra. Fluidtüzelés hamuhűtő berendezése [16]

3.9. Fluidtüzelési kísérletek kisberendezésen

3.9.1. Az Ahlstrom 0,6 MW_t Pyroflow kísérleti berendezése

A különböző tüzelőanyagok tüzeléstechnikai tulajdonságainak megismerése elengedhetetlen mind új kazánberendezés tervezésénél, mind pedig meglévő berendezésnél tüzelőanyag-változás esetén. Élénk vita folyik arról, hogy laboratóriumi vagy félüzemi vizs-

gálatok eredményei hogyan vihetők át a tüzelőanyagok üzemi berendezésben való viselkedésére. Különösen kritikus kérdés ez új technika, mint például a fluidizációs tüzelés bevezetésekor. A kísérleti berendezésekben nyert eredmények használhatóságának igazolására kiemelkedően jelentősnek mondható az Ahlstrom által elvégzett és az EPRI által támogatott kísérletsorozat, amelyben egy 0,6 MW_t Pyroflow cirkulációs fluidizációs kazánon folytatott kísérletek eredményeit egy 110 MW_e üzemi Pyroflow kazánblokk (kb. 350 t/h) eredményeivel vetették össze. A kísérleti berendezés elrendezését a 3.35. ábra mutatja. A tüztér 0,4 × 0,4 m és 9 m magas. A kísérleteknél felhasznált szén és mészkő adatai a 3.6. és a 3.7. táblázatban találhatók [12].

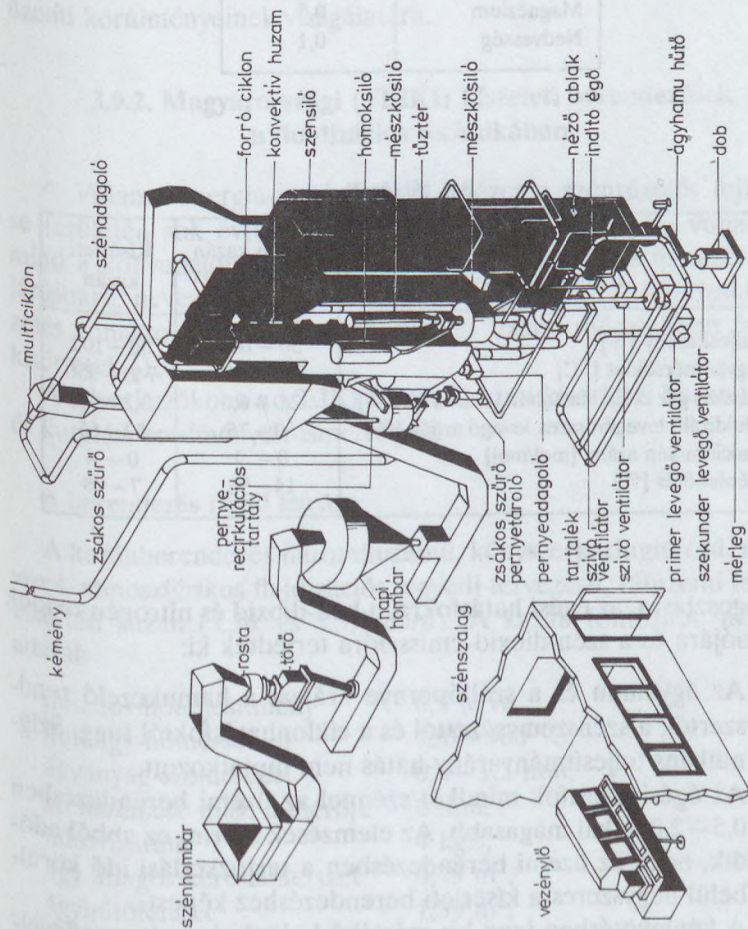
3.6. táblázat

		Peabody szén	Salt Creek szén
Nedvesség	[%]	7,5– 9,5	7,2– 10,0
Illó	[%]	24,0–29,1	32,1– 32,8
Hamu	[%]	18,2–23,2	14,6– 18,7
Fix karbon	[%]	41,5–50,1	41,3– 42,7
Elemi összetétel			
karbon	[%]	52,9–61,4	57,6– 60,0
hidrogén	[%]	3,4– 3,7	3,7– 4,7
nitrogén	[%]	0,9– 1,9	1,1– 1,3
kén	[%]	0,6– 1,4	0,4– 0,6
oxigén	[%]	8,3–11,2	8,7– 10,0
hamu	[%]	18,2–23,2	14,6– 18,7
nedvesség	[%]	7,5– 9,5	7,2– 10,0
Égéshő	[MJ/kg]	23,1– 26,0	24,4– 26,4

A szén szemcsemérete 6 mm alatti volt. A két szénrel összesen 22 kísérletet végeztek.

A kísérletek a 3.8. táblázatbeli adatokkal jellemezhető körülmények között folytak.

A kísérletek eredményei alapján levonható következtetések a ha-



3.35. ábra. Alstrom 0,6 MW_t kísérleti berendezés folyamatiábrája [12]

3.7. táblázat

Mészkelet	[%]
Kalcium	34,6–36,6
Magnézium	0,5
Nedvesség	0,1

3.8. táblázat

Jellemző adatok	Üzemi kazán (Nucla CFB)	Kísérleti kazán
Teljesítmény [%]	50–100	50–102
Ágyhőmérséklet [°C]	770–940	740–950
Távozó gáz oxigéntartalma [száraz térf.%]	2,0–6,6	3,2–5,9
Fluidizáló levegő/összes levegő arány [%]	50–75	52–65
Kalcium/kén arány [mol/mol]	0–9	0–4
Kénlekötés [%]	14–98	7–98

mumegoszlásra, az égési hatásokra, a kén-dioxid és nitrogén-oxidok emissziójára és a szén-dioxid-emisszióra terjedtek ki:

- Az ágyhamu és a szállópernye aránya a hamukezelő rendszertől, a szénszemcsézetől és a ciklonhatásfoktól függ. Szignifikáns teljesítményarány-hatás nem mutatkozott.
- Az égési hatások mindkét szénrel az üzemi berendezésben 0,5–2,0%-kal magasabb. Az elemzések szerint ez abból adódik, hogy az üzemi berendezésben a tartózkodási idő körülbelül négyszeres a kísérleti berendezéshez képest.
- A kénlekötésben igen kis mértékű különbség volt megfigyelhető. A kísérleti berendezésben kissé jobb volt a kénlekötés. Ez a jobb keveredéssel és mészcirkulációval magyarázható, mivel a ciklonleválasztás is hatásosabb.

— A nitrogén-oxidokban és szén-monoxid-emisszióban igen kis mértékű hatás volt megfigyelhető.

Végkövetkeztetésként alapvető, hogy a viszonylag kis mértékű kísérleti berendezés is igen jól használható a nagy berendezések üzemi körülményeinek vizsgálatára.

3.9.2. Magyarországi (VEIKI) kísérleti berendezések a fluidizációs technikában

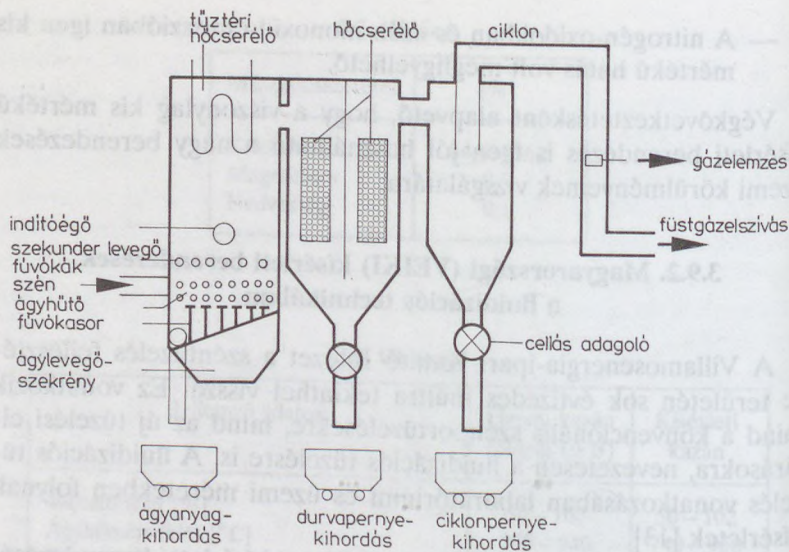
A Villamosenergia-ipari Kutató Intézet a széntüzelés fejlesztése területén sok évtizedes múltra tekinthet vissza. Ez vonatkozik mind a konvencionális szénportüzelésekre, mind az új tüzelési eljárásokra, nevezetesen a fluidizációs tüzelésre is. A fluidizációs tüzelés vonatkozásában laboratóriumi és üzemi méretekben folynak kísérletek [13].

A következőkben a VEIKI laboratóriumi kísérletei berendezését és kutatási eredményeit ismertetjük.

A berendezés rövid leírása

A kazánberendezés háromhuzamú, kényszerkeringtetésű, melegvizes, atmoszférikus fluidizációs, egyedi tervezésű, félüzemi léptékű kísérleti kazán (3.36. és 3.37. ábra). A kazán fontosabb névleges adatai:

hasznos hőteljesítmény	0,5 MW,
fluidágy-hőmérséklet	750–900 °C,
ágyanyag-szemcsézet	0,8–1,2 mm,
szénszemcse max. átmérője	6 mm,
hűtővízáram	4 kg/s,
ágy átlagos keresztmetszet	0,49 m ² ,
ágyhűtőfelület	1,39 m ² ,
konvektív hűtőfelület	4,83 m ² ,
szabadtéri hűtőfelület	0,628 m ² ,
ágyanyag-magasság	0,4–0,6 m,
fluidizációs sebesség	1,5–2,3 m/s.



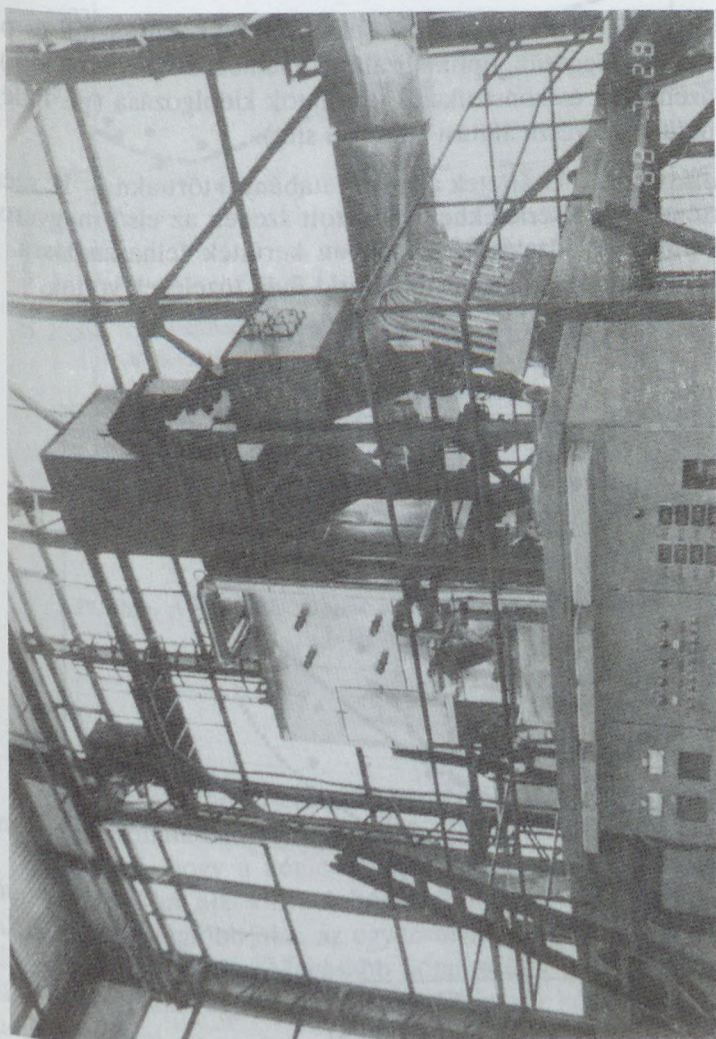
3.36. ábra. Laboratóriumi fluidizációs kísérleti berendezés

Az égésilevegő-ellátás nagyobb hányada a fúvókákon keresztül történik, kisebbik — és természetesen szintén szabályozható mennyiségű — hányada az ún. "szekunder levegő"-nyílásokon áramlik a tűztérbe, kevéssel az ágy felső szintje felett. A szekunderlevegő-adagolás 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.

A füstgázkilépés után elhelyezett ciklon, valamint tefflonzsákos filter gondoskodik a pernye leválasztásáról.

A kilépő vízáram szükség szerinti visszahűtését három bordás alumíniumhűtő segíti.



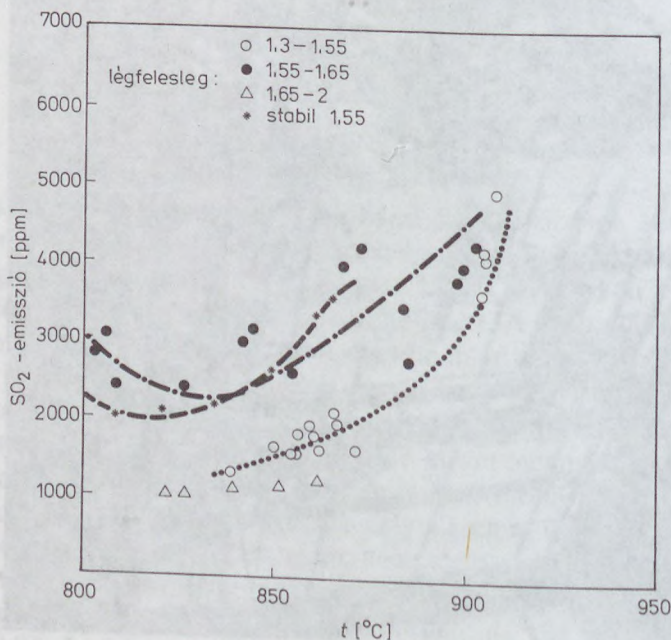
3.37. ábra. Kísérleti kazán fényképe

Kutatási eredmények

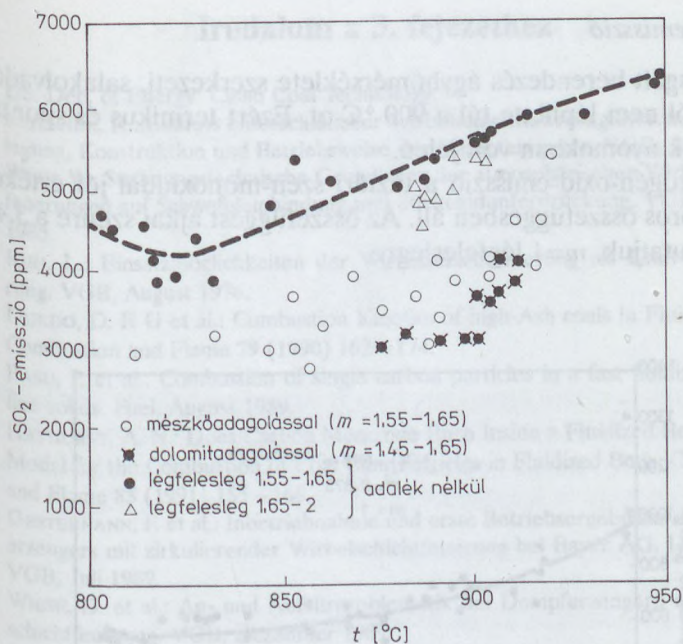
Vizsgálataink két fő területre irányultak:

- környezetvédelmi kérdések (pl. SO_2 -, NO_x -emissziók és paraméterfüggésük, optimalizálásuk, adalékos kísérletek stb.),
- üzemviteli és konstrukciós javaslatok kidolgozása (pl. hidegindítási és vészleállítási stratégia stb.).

Az első tüzelési kísérletek ajkai és tatabányai tört akna – II. szén – nel történtek. A kísérletekhez választott szenek az első magyarországi fluidizációs tüzelésű kazánokban kerültek felhasználásra. E tüzelési rendszerek a magyar ún. hibrid-fluid tüzelések voltak.



3.38. ábra. A SO_2 -érték függése a hőmérséklettől (ajkai szén)
1- mészkőadagolással, 2- dolomitadagolással, 3- légfelesleg,
4- adalék nélkül



3.39. ábra. A SO_2 -érték függése a hőmérséklettől (tatabányai szén)
1- légfelesleg

SO_2 -emisszió

A fajlagos kén-dioxid-emisszió hőmérsékletfüggését (azonos összes kénre vonatkoztatva) a 3.38. és 3.39. ábrán mutatjuk be.

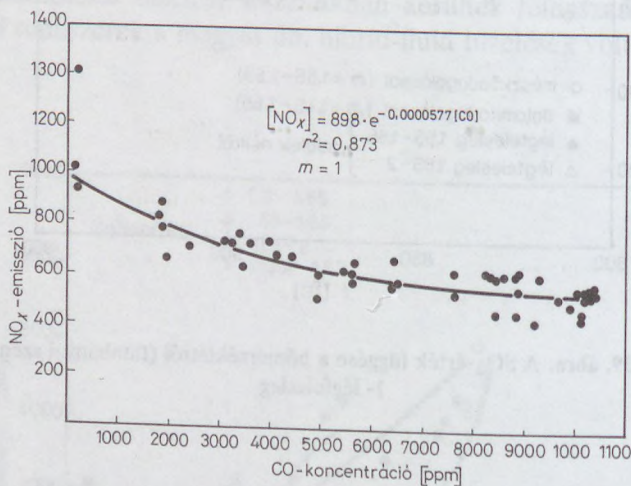
Jól látható, hogy a kénleválasztás maximuma (emissziós minimum) 880 °C-nál alacsonyabb hőmérsékleten, 820 °C-nál helyezkedik el. Ennek legfőbb oka: az egyensúlyi szén-dioxid-pontot a fluidizációs levegő eltolja. Magasabb hőmérséklet irányába haladva a kalcium-oxid ún. "agyónégetett" módosulata a ként egyre kevésbé tudja megkötni.

A folyamat arra mutat: amennyiben az energetikai és gazdaságossági szempontok megengedik, az ágy hőmérsékletét 820 °C körül kell beállítani.

NO_x-emisszió

A vizsgált berendezés ágyhőmérséklete szerkezeti, salakolvadási stb. okból nem léphette túl a 900 °C-ot. Ezért termikus és spontán NO_x csak nyomokban volt jelen.

A nitrogén-oxid-emisszió a tüztéri szén-monoxiddal jól értékelhető, szoros összefüggésben áll. Az összefüggést ajkai szénre a 3.40. ábrán mutatjuk, $m=1$ légleselegetre.



3.40. ábra. A tüztéri CO és a fajlagos NO_x közötti összefüggés

A magas tüztéri CO nem jelenik meg a kazán füstgázkilépésénél, mivel a tüztér felső részén a szekunder levegővel elégethető, az NO_x-tartalom növekedése nélkül.

A fenti összefüggés arra mutat, hogy az — NO_x szempontjából — optimális tüzelés beállításakor törekedni kell a maximális tüztéri CO-ra úgy, hogy az a szekunder levegővel még biztonságosan el-tüzelhető legyen. Ez megfelel a léghiányos tüzelés NO_x-csökkentő tapasztalatnak.

Irodalom a 3. fejezethez

1. US. Dep. of Energy: Clean Coal Technology.
2. LEITHNER, R.: Einfluss unterschiedlicher Wirbelschichtfeuerungs-systeme auf Auslegung, Konstruktion und Betriebsweise der Dampferzeuger. VGB, Juli 1989.
3. WEIN, W.: Strömungstechnische Grundlagen der atmosphärischen Wirbelschichtfeuerungen auf Schwefeleinbindung und Stickoxidunterdrückung. VGB, Februar 1985.
4. REH, L.: Einsatzmöglichkeiten der Wirbelschichtfeuerung als Kraftwerksfeuerung. VGB, August 1976.
5. DURDO, D. F. G et al.: Combustion Kinetics of high-Ash coals in Fluidized Bed. Combustion and Flame **79** (1990) 162–174.
6. BASU, P. et al.: Combustion of single carbon particles in a fast fluidized bed of fine solids. Fuel, August 1989.
7. HAYHURST, A. N.: Does Carbon Monoxide Burn Inside a Fluidized Bed? A New Model for the Combustion of Coal Char Particles in Fluidized Beds. Combustion and Flame **85** (1991) 155–168.
8. GESTERNANN, F. et al.: Inbetriebnahme und erste Betriebsergebnisse des Dampferzeugers mit zirkulierender Wirbelschichtfeuerung bei Bayer AG, Leverkusen. VGB, Juli 1989.
9. WIESE, D. et al.: An- und Abfahrproblematik bei Dampferzeugern mit Wirbelschichtfeuerung. VGB, Dezember 1987.
10. ABB Carbon: Värtan PFBC plant Modern Power Systems, July 1988.
11. AHLSTROM PYROFLOW CFB Pilot Plants.
12. LUNDQUIST, R. et al.: An Evaluation of Process Performance and Scale-up Effects for AHLSTROM PYROFLOW Circulation Fluidized Bed Boilers Using Results from the 110 MW_e Nucla Boiler and 0,6 MW_{th} Pilot Plant. Fluidized Bed Combustion, ASME, 1991.
13. PORKOLÁB L.: Fluidizációs kísérletek a SO₂- és NO_x-képződés csökkentésére. VEIKI Kutatási jelentés, Budapest, 1990.
14. REMÉNYI, K. – BOROSS, L. – GERLAI, T.: New fluidized-bed firing equipment. XI. Int. Symp. Miedzyszdroje, Poland, 1989.
15. BOROSS L. – MARÁZ T.: Megvalósíthatósági tanulmány az Ajkai Hőerőmű 100 t/h kazánja fluidizációs tüzelésre történő átalakításáról. VEIKI tanulmány, Budapest, 1988.
16. WIRTH, K. E. et al.: Feststoffkonzentration und geschwindigkeiten in wandnahen Bereichen zirkulierender Wirbelschichten. VGB, Oktober 1991.
17. ENDESA-BWE: Pressurized fluidized bed combustion demonstration plant of ESCATRON. ENDESA-BWE, 1989. Febr.
18. VKW: Wirbelschichtfeuerung.
19. HORVÁTH, F. – GERLAI, T. – REMÉNYI, K. – VÖRÖS, L.: Hybrid fluid Combustion System for Ajka Power Plant. Inter-Country Project. UNDP EC., Déva, 1991. September.

4. PERNYELEVÁLASZTÁS

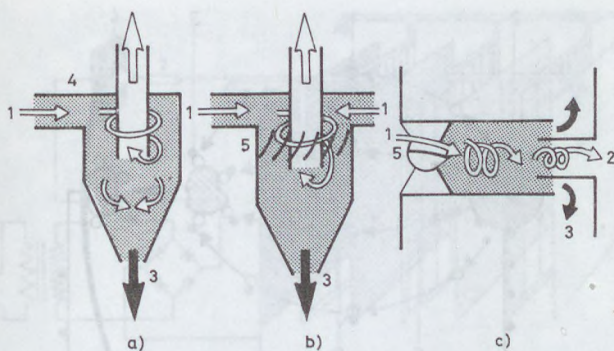
A gázból a szilárd szennyezők leválasztására szolgáló berendezések az utóbbi néhány évtizedben igen jelentősen fejlődtek. Az erőművekből a szilárd szennyezőanyagok kibocsátása rendkívüli mértékben csökkent. A leválasztó berendezések főbb csoportjai:

- mechanikus elven működők,
- nedves leválasztás,
- elektrosztatikus elven működők,
- szövetszűrők.

4.1. Mechanikus leválasztók

A mechanikus ciklonok elsősorban a durva szemcsék leválasztására alkalmasak. A különböző megoldásokat a 4.1. ábra mutatja. A nedves leválasztók jó hatásfokú leválasztást biztosítanak, de a keletkezett zagy kezelése és maga a berendezés is bizonyos kémiai problémákat okoz, bár nem jelent alapvetően megoldhatatlan gondot. Ettől függetlenül elsősorban a vegyiparban, az élelmiszeriparban, a papíriparban kerül alkalmazásra [1].

Hazánkban a mechanikus és az elektrosztatikus leválasztókat előszeretettel alkalmazták sorba kötve, a leválasztási hatásfokuknak a terhelés függvényében való ellentétes változása miatt. Mára a mechanikus leválasztók szerepe visszaszorult.



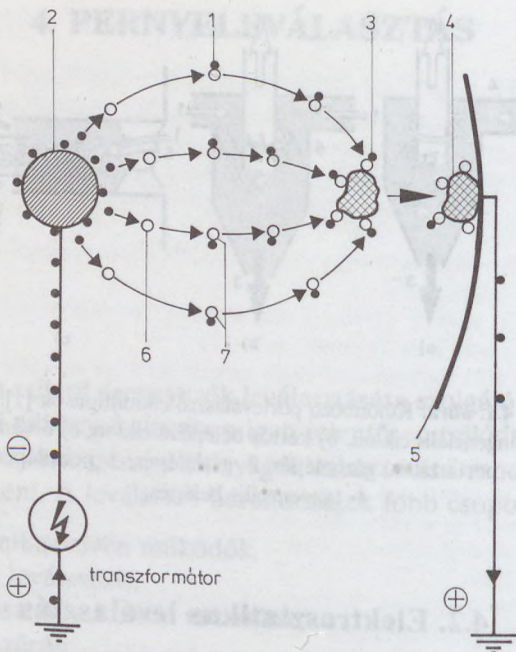
4.1. ábra. Különböző porleválasztó ciklontípusok [1]:
 a) tangenciális ciklon, b) kettős belépésű ciklon, c) örvénycső
 1- portartalmú gázbelépés, 2- gázkilépés, 3- porkilépés,
 4- tangenciális belépés,

4.2. Elektrosztatikus leválasztás

Jelenleg az energiaiparban legelterjedtebb az elektrosztatikus leválasztás. A működési elvet a 4.2. ábra mutatja, a rendszer felépítése a 4.3. ábrán látható.

A szilárd szemcsék a szóróelektródáról kibocsátott elektronok segítségével ionizálódnak, majd a felfogóelektrodákon leválnak. A működtetési feszültség 40 000 – 110 000 V. A szóró- és a felfogóelektroda közötti távolság 250 – 500 mm. A gáz áramlási sebessége igen fontos paraméter és alacsony értékű, kb. 1 m/s. A sebesség befolyását mutatja a 4.4. ábra. A működést jelentősen befolyásolja a szemcseanyag elektromos tulajdonsága és a gáz összetétele is. Az igen nagy ellenállású szemcsék (nagyobb, mint 10 ohm cm) és a nedves gáz, különösen SO_3 jelenlétében, problémákat okoz. Az elektrofilter túlterhelésénél a leválasztási hatások jelentősen csökken. Ez volt az oka, hogy korábban előleválasztóként ciklont is alkalmaztak.

Elektrofiltert általában 80 000 m³/h gázmennyiség felett alkalmaznak. Gazdaságosság szempontjából az igen alacsony kibocsá-

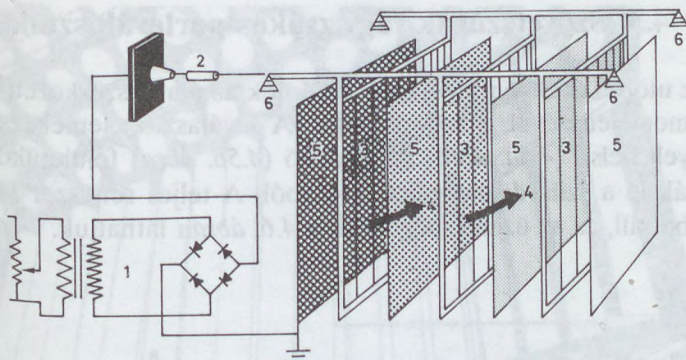


4.2. ábra. Az elektrosztatikus porleválasztás elve [2]
 1- elektron, 2- szóróelektróda, 3- ionizált szemcse,
 4- szemcseleválasztás, 5- felfogóelektróda,
 6- semleges gázmolekula, 7- ionizált gázmolekula

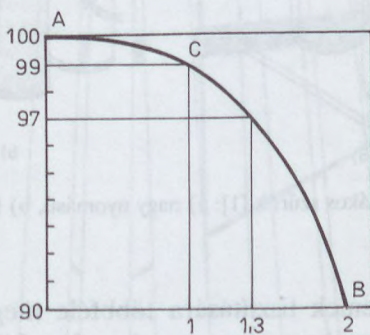
tási előírásoknál ($30 - 10 \text{ mg/Nm}^3$ között) indokolt az alkalmazása. Elsősorban széntüzelésű erőművekben, kohóművekben, cementművekben és hulladékégetőkben alkalmazzák.

Külön erőteljesen fejlődik az újabb technológiák előtérbe kerülésével a magas hőmérsékletű ($700 - 900^\circ\text{C}$) elektrosztatikus pernyeleleválasztás.

A nyomás alatti fluidtüzelésnél a földgáznak közvetlenül a gázturbinára való áramoltatásánál a tisztítás kérdése mechanikus leválasztókkal nem ad kielégítő eredményt.



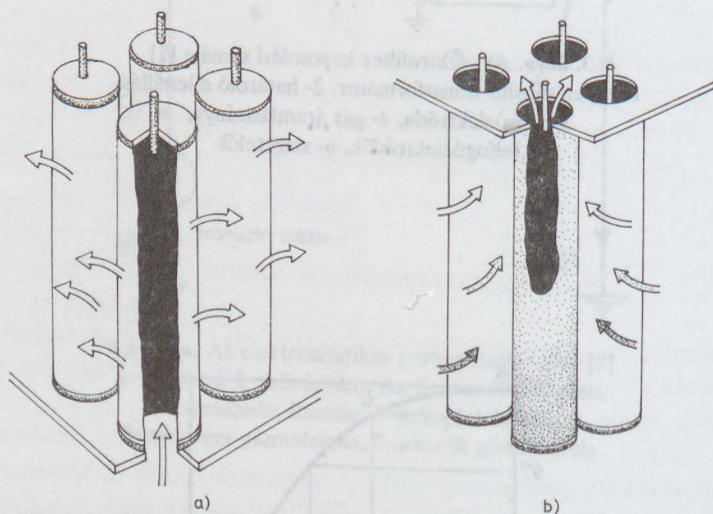
4.3. ábra. Az elektrofilter kapcsolási sémája [1]
 1- egyenirányító transzformátor, 2- határoló ellenállás,
 3- szóróelektroda, 4- gáz áramlásiránya,
 5- felfogóelektrodák, 6- szigetelők



4.4. ábra. Az áramlási sebesség befolyása
 az elektrofilter hatásfokára [1]
 A- szemcseleválasztási hatások (%),
 B- átáramlási arány, C- névleges

4.3. Szövetszűrők vagy zsákos porleválasztók

Az utóbbi években leginkább fejlődtek az újabb szerkezeti anyagok megjelenésével a szövetszűrők. A leválasztó elemek zsákok, amelyek belső (4.5a. ábra) vagy külső (4.5b. ábra) felületükön választják le a szilárd anyagokat a gázból. A teljes rendszer számos elemből áll, és az üzemi megoldást a 4.6. ábrán láthatjuk.



4.5. ábra. Zsákos szűrők [1]: a) nagy nyomású, b) kis nyomású

A leválasztó elemek tisztítására többféle megoldás van, leginkább szakaszos üzemben az egyes elemeket kiiktatják a tisztítás idejére. Ez természetesen igen rövid időszak lehet, és automatizálása is megoldott. A tisztítás szabályozása a nyomásesésről történik. A szövetszűrő nyomásesése kb. 1000–2500 Pa. A megnövekedett nyomásesésű elemet a rendszerből kiiktatják. Különösen finom szemcsék leválasztására is alkalmas, mivel a diffúzió és



4.6. ábra. A zsákos szűrő felépítése [2]

a Brown-mozgás elvének megfelelően a leválasztás hatásosabb $0,01\ \mu\text{m}$ – $0,3\ \mu\text{m}$ átmérőjű szemcsékre.

A legtöbb esetben ez a szövet szintetikus anyag, polieszter, acryl, polyamid, üvegszállal erősítve. A leválasztás $0,8$ – $6\ \text{cm/s}$ sebességgel működik.

A leválasztás igen jó, a maradék porkoncentráció kisebb, mint $10\ \text{mg/Nm}^3$, és elérhető $1\ \text{mg/Nm}^3$ -nél alacsonyabb érték is.

Előnye, hogy a szűrőanyagok helyes megválasztásával alacsony harmatpontú gázok tisztítására is jól alkalmazható. Ugyancsak alkalmas a nehézfémek, mérgező anyagok stb. leválasztására, amelyekre a nedves eljárások nem megfelelőek.

Jellegzetes alkalmazási területek: a széntüzelésű berendezéseknél, háztartási hulladékmegsemmisítőknél, villamos acéolvasztók-nál, kohászatban, elektrolízisnél, nyersanyag-előkészítésnél, élelmiszeriparban [2].

Irodalom a 4. fejezethez

1. Agence pour la Qualité de l'Air: Air Pollution Prevention and Measurement, Paris, 1988.
2. LURGI—LENTJES: Modern, fossil fuel fired power plants — for the generation of clean energy. Frankfurt/Main, 1990.

5. A KÉNSZENNYEZÉS CSÖKKENTÉSE

A tüzelőanyagokban a kén legfontosabb előfordulási formái az 5.1. ábrán láthatóan az organikus és a piritkén.

Az energetika által okozott környezetszennyezés egyik csoportjába azok a hatások tartoznak, amelyeket az égésterméként levegőbe jutó anyagok okoznak. A kén-dioxid mint elsősorban az erőművi tüzelőanyagokban jelen lévő kén égési terméke ma talán a legtöbb gondot okozó energetikai környezetszennyező.

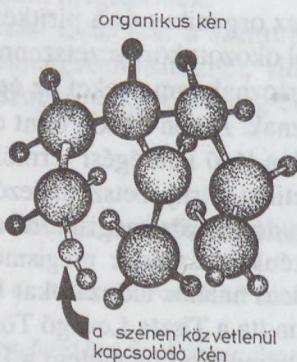
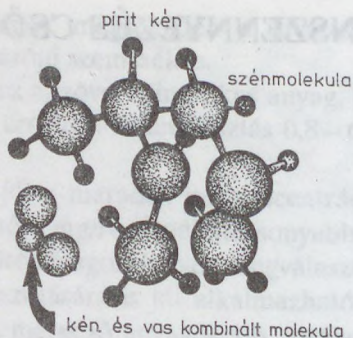
A légszennyezés tudományos megismerése csak 1930. után terjedt túl a füst- és kénkibocsátások megismerésén. A nagymérvű kén-dioxid-koncentráció halálos áldozatokat követelt.

1959-ben Anglia kiadta a Tiszta Levegő Törvényt, és 1967-ben az Amerikai Egyesült Államokban megjelent a Levegőminőség Szabályozó Törvény.

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:



5.1. ábra. A kén legfontosabb előfordulási formái a tüzelőanyagokban [31]

- 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).

5.1. Kéntelenítési eljárások csoportosítása

A kényszennyezés csökkentésének módszerei lehetnek:

- a kén eltávolítása az energiahordozóból,
- új tüzelési és technológiai eljárásokkal történő kéntelenítés,
- a füstgáz kéntelenítése.

Utóbbin belül nagy érdeklődésre tartanak számot az olyan módszerek, amelyek a kén kivonását az égő tüzelőanyagból korai stádiumban oldják meg.

A jelenlegi gyakorlati súlyuknak megfelelően tárgyaljuk az egyes eljárásokat, ami nem jelenti azonban azt, hogy a jövőben a különböző eljárások jelentősége nem változhat.

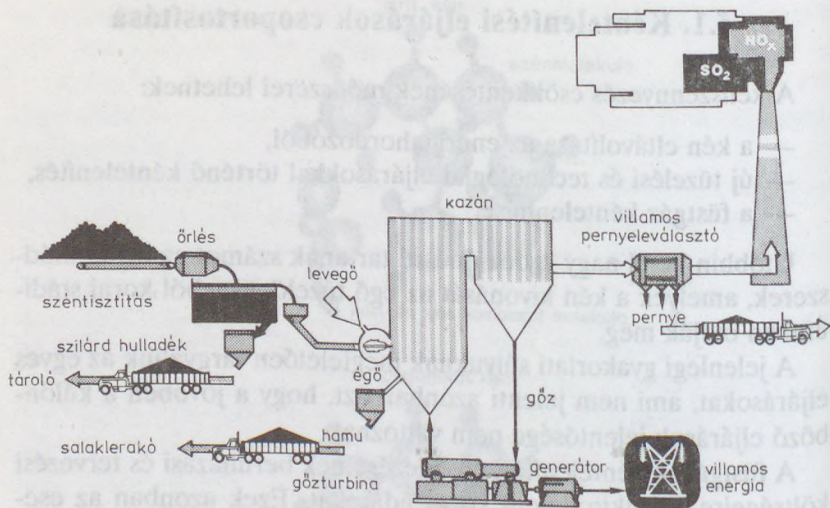
A füstgázok kéntelenítő berendezéseinek beruházási és tervezési költségeire a szakirodalom közül adatokat. Ezek azonban az esetek túlnyomó részében reálisan nem érhetők el, kiindulási adataik pedig igen nagy mértékben eltérnek egymástól vagy egyáltalán nincsenek is meghatározva.

A füstgáz kén-dioxid-mentesítésével szemben a primer energiahordozó kéntelenítése abból a szempontból jelent előnyt, hogy jóval kisebb térfogatáramot kell kezelni. Hátránya azonban, hogy az eljárások kéntelenítési hatásfoka általában jóval kedvezőtlenebb, mint a füstgázt kén-dioxid-mentesítő eljárásoknak, technológiájuk elég bonyolult, és az esetek többségében csak laboratóriumi, illetve kísérleti üzemi fejlettséget értek el.

5.2. A kén eltávolítása a primer energiahordozókból

5.2.1. A szén kéntelenítése

A szén kéntelenítésére bár több eljárás létezik, gyakorlatilag csak a szén pirittartalmának csökkentését célzó eljárások jöhetnek számításba (5.2. ábra). Nedves és száraz fizikai eljárások, továbbá nedves kémiai eljárások ismereteseek.



5.2. ábra. Tüzelés előtti széntisztítás [31]

(A konvencionális erőművel való összehasonlítás: SO_2 -emisszió csökkenése 30–90%, NO_x -emisszió nem változik, erőművi hatásfok kissé nő, energiakiadás nem változik, erőmű-élettartam meghosszabbodik)

A fizikai eljárások hátránya, hogy a pirites kéntartalomnak csak 60–80%-át távolítják el, a szén pirites kéntartalma pedig az esetek többségében az összes kéntartalomnak csak 40–60%-a.

A nedves fizikai eljárások a pirit és a szén fajsúlykülönbségét kihasználó, nedves úton történő, fajsúly szerinti elválasztáson alapulnak. A technológia fő lépései: a megfelelő méretre történő törés, aprítás, illetve őrlés, ezt követően hidrociklonos és flotációs szeparáció, végül termikus szárítás.

A kevésbé fejlett száraz fizikai eljárások a következők:

- a megfelelő hevítés utáni mágneses szeparáció (FÁK, USA, NSZK),
- a szén és a pirit különböző vezetőképességét kihasználó elektrostatikus szeparáció (NSZK),
- a fluidizált réteges elválasztás (Anglia).

Ezen eljárások előnye, hogy a nedves szénmassza termikus szárítása elmarad, hátrányuk azonban kisebb hatásfokuk.

Azoknál a szeneknél, ahol a szén szerves kéntartalma a pirites kéntartalomhoz képest csekély, jelentősége lehet egyes kémiai eljárásoknak is, miután ezekkel a pirit gyakorlatilag teljesen eltávolítható. Ezek az eljárások azonban még a fizikai módszerekhez képest is bonyolultak és költségesek.

5.2.2. Az olaj kéntelenítése

Az olaj kéntelenítésére közvetett és közvetlen módszerek ismertek. Ezek közös tulajdonsága, hogy csak az olajfinomítóknak kerülhetnek alkalmazásra.

Közvetlen módszerek:

- vákuumdesztilláció és a vákuumgázolaj kéntelenítése,
- vákuumdesztilláció, a vákuummaradék aszfalttalanítása és kéntelenítése.

Közvetett módszerek:

- az atmoszférikus maradék kéntelenítése,
- a vákuummaradék kéntelenítése,

5.2.3. A szén cseppfolyósítása

Több eljárást dolgoztak ki a szén oldószeres cseppfolyósítására, melynek segítségével kis kéntartalmú és hamutartalmú szintetikus tüzelőanyag állítható elő. A különböző minőségű szenekből általában azonos minőségű, tisztított, cseppfolyós vagy alacsony olvadáspontú termék nyerhető, amelynek fűtőértéke kb. 38 000 kJ/kg, hamutartalma 0,15%, kéntartalma 0,50–1,0%.

Az eljárás lényegében a több mint 60 éve ismeretes Bergius-féle műbenzin előállítási módjához hasonló, azzal a különbséggel, hogy egyrésről az alkalmazott nyomás itt lényegesen kisebb, kb. 70 bar, szemben a Bergius-féle 200–700 bar-ral, másrésről az előzetesen megőrlött szénhez nem nehézolajat, hanem szénszarmazékú

oldószert (pl. fenantrént) adnak a hidrogénezés előtt. A hidrogén-felhasználás növelésével, illetve kénnek ellenálló katalizátorok (pl. volfrám-szulfid, molibdén-szulfid) alkalmazásával a kéntartalom a kiindulási szén kéntartalmától függetlenül egészen 0,25%-ig csökkenthető.

5.2.4. A szén elgázosítása

A szén cseppfolyósításánál lényegesen kiforrottabb és szélesebb körben alkalmazott eljárás a szén elgázosítása, illetve 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 a 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. A technológiákat részletesebben ismertetjük a 7. fejezetben.

5.3. A szénhamu kénlekötése

A tüzeléstechnika módjától függ a szén-dioxid, az oxigén, a nitrogén-oxidok, a szén-monoxidok mennyisége és a SO_3/SO_2 aránya. A tüzelőanyag minősége határozza meg a vízgőz mennyiségét, továbbá befolyásolja az SO_2 és SO_3 mennyiségét. Az előbbi a nedvesség- és H_2 -tartalom adja, az utóbbiak a tüzelőanyag S-tartalmából keletkeznek.

Tüzelőanyagot légfelesleggel elégetve, annak kéntartalmából (szabad, pirit-, szerves kén stb.) elsősorban kén-dioxid keletkezik és távozik a füstgázzal a szabadba. Keletkezik ezenkívül több-kesevesebb kén-trioxid is, nagyobb részben a primer SO_2 -ből, kisebb részben a szulfátkén termikus bomlásából.

A füstgáz szokásos összetétele az 5.1. táblázatban látható.

5.1. táblázat

	minimum	maximum
H_2O	2	20% (térfogatra)
CO_2	9	16% (száraz térf.)
CO	0	0,1% (száraz térf.)
O_2	0,5	8% (száraz térf.)
SO_2	0	0,6% (száraz térf.)
SO_3	0	0,06% (száraz térf.)
$\text{NO} + \text{NO}_2$	0	0,01% (száraz térf.)
N_2 és egyéb	79	84% (száraz térf.)

A barnaköszén-, feketeköszén-, lignit-, olaj- és vegyes tüzelések kémérlegének vizsgálatakor megállapítható, hogy a SO_2 -emissziót döntően a kiindulási tüzelőanyag fizikai és kémiai sajátosságai határozzák meg, de befolyásolja a tüzelőberendezés kialakítása és a tüzelés módja is. Így pl. az irodalom szerint feketeköszén salakolvasztókamrás eltüzelésénél a kéntartalom közel 100%-a, a vizsgált barnaköszének porszentüzelésénél 56–80%-a, rostély + olaj vegyestüzelés esetén 60%-a került a füstgázokba. Ennek magyarázata egyrészt az, hogy a szilárd tüzelőanyagok kéntartalma eredetileg különböző kötési formákban van jelen, és ezeknek csak egy része vezet SO_2 -, illetve SO_3 -képződéshez, másrészt a képződött kén-dioxidok jelentős része leköthető a képződött salakban, illetve szállóporban.

A SO_2 – SO_3 -konverzió még mindig nem kellően tanulmányozott, illetőleg a képződött SO_3 -at nem veszik figyelembe, vagy meg-

határozása nem kielégítő pontosságú. Ez az oxidációs reakció az erőművi tüzeléskor olyan mértékben játszódik le, hogy a tüzelőanyag kéntartalmának rostélytüzelés esetén 2–5%-a, porszentüzelés esetén pedig csak 0,8%-a alakul SO_3 -dá. Olajok tüzelésénél ez az érték 12% is lehet. A VEIKI által végzett mérések azt mutatták, hogy egyes esetekben a fentieknél lényegesen nagyobb mérvű SO_3 -konverziók is előfordulnak. Az Oroszlányi HV porszentüzelésű kazánján végzett SO_2 – SO_3 -vizsgálatok szerint a szén 3,2%-os kiindulási éghető kéntartalmának átlagban 6,5%-a alakult át kéntrioxiddá. Olajtüzelések vizsgálatánál VEIKI-tapasztalat, hogy a SO_3 -konverzió többnyire a 12%-ban megjelölt határérték alatt volt, előfordult azonban már 17% feletti érték is.

Magyar viszonylatban részletes kutatások folytak annak megállapítására, hogy a szilárd tüzelőanyagok hamutartalma milyen módon befolyásolja a füstgáz SO_2 -tartalmát, tehát mód van-e a szilárd tüzelési maradványokban megkötni a SO_2 -ot. A befolyás egyik módja a hamu bázikus alkotóival szulfátképződés útján való egyesülés, a másik az az elvi lehetőség, hogy a finomszemcsés, nagy felületű, aktív pernye adszorpció útján is lekötethet SO_2 -t.

A kéntartalom viselkedése annyiban függ a tüzelés módjától, hogy rostélytüzelésnél a salakkal és pernyével kisebb felületen rövidebb ideig érintkező kén-oxidok kevésbé reagálhatnak a szilárd fázissal, míg szénportüzelésnél elsősorban a SO_3 -tartalom egy része megkötődik. Ezért azonos szénrel tüzelve, a füstgáz harmatpontja rostélytüzelésnél magasabb, mint szénportüzelésnél, és ez a vaslemez füstcsatornák és a kémények korróziós sebessége szempontjából gyakorlatilag kimutatható különbséget jelent.

Az éghető kén g/MJ fűtőértékegységre vonatkozó mennyiségével közelítőleg arányos a füstgáz SO_2 -tartalma a légf feleslegtől függően. A SO_2 -emisszió kg/h értékét tehát a GJ/h egységben adott felszabadított tüzelőanyag hő és a g/MJ egységben mért éghető kéntartalom határozza meg.

Szénportüzelés esetén a kéntartalom nagyobb része, a kiörlési finomságtól és a hamu bázicitásszámától függően, a füstgáz SO_2 -tartalmaként jelenik meg. Ennek becsült értéke 40–94%. Hazai jellemző tüzelőanyagokra kísérleti úton tisztáztuk ennek számsze-

rúságét. A kén fennmaradó része SO_3 formában vagy a szilárd maradványokban kerül a füstgázba. Meg kell azonban jegyezni, hogy a meglévő szénportüzelésű berendezéseknél a kiörlési finomság tüzeléstechnikai adottságnak tekintendő, a "túlörlés" új erőművek malmainál is évi több milliós többletköltséggel járna energiafogyasztás és karbantartási költségek vonatkozásában.

Részletes vizsgálatok folytak annak megállapítására, hogy a magyar erőművek SO_2 -emisszióját milyen mértékben befolyásolja az eltüzelt szén fajtája. Kizárólag a fűtőértékre vonatkoztatott kéntartalom a döntő, vagy milyen szerepet játszanak a tüzeléstechnikai és üzemi paraméterek, a kazán konstrukciója és az eltüzelt szénfajta hamualkotóinak kénlekötő képessége? A különböző szénfajták viselkedésének megismerésére, a mérések elvégzésére a pécsi (feketeszen), Ajkai, Oroszlányi (barnaszenek) és a Gagarin Hőerőműben (lignit) került sor.

A vizsgált erőművekben eltüzelt szén fajlagos kéntartalma 2,1 g/MJ-tól (Gagarin) 4,1 g/MJ-ig (Oroszlány) változott.

A tényleges értékeket az 5.2. táblázat mutatja.

Az egymástól eltérő tulajdonságú szenekkel végzett vizsgálatok szerint általánosan megállapítható, hogy a kén-dioxid-emisszió szempontjából nem az éghető kéntartalom, hanem az összes kéntartalom a mérvadó (5.3. táblázat).

A kazán terhelésével a SO_2 -emisszió lineárisan növekszik. Határozott összefüggés a légfeleslegtényező változása és az emisszió között nem található, habár úgy tűnik, hogy a Gagarin Hőerőműben növekvő légfelesleggel csökken az emisszió.

A hamualkotókban lekötött kén az emittált és lekötött kénmennyiség összegére vonatkoztatva 7,7%-tól (Pécs) 28,6%-ig (Ajka) változott. A vizsgálatok szerint a hamuban ténylegesen lekötött kén és hamualkotók által elméletileg leköthető kénmennyiség között — a vizsgált kazánberendezések különbözősége ellenére — határozott kapcsolat mutatható ki. Úgy tűnik, hogy az emittált kén-dioxid mennyisége döntő mértékben a hamu összetételétől és a fajlagos összes kéntartalomtól függ.

Tehát a kénlekötési folyamatot alapvetően a felhasznált tüzelőanyag hamujának vegyi összetétele határozza meg. Ezenkívül jelen-

5.2. táblázat

Erőmű	Fűtőérték (F) [kJ/kg]	Hamutartalom [%]	S_8/F [g/MJ]
Pécs	9 622–11 846	49,1–58,7	2,10–2,49
Gagarin	5 617–7 503	20,1–31,2	1,07–1,98
Oroszlány	9 171–11 035	41,0–44,2	3,52–4,14
Ajka	11 273–12 101	27,1–29,1	0,93–1,57

5.3. táblázat

Erőmű	Kazánteljesítmény [t/h]	Kénlekötés [kg%]	1–k [%]
Pécs (feketeszen)	65	7,70 ± 0,87	92,3
Pécs	210	5,77 ± 1,17	94,23
Gagarin (lignit)	600	12,35 ± 2,70	87,65
Oroszlány	230	11,54 ± 0,96	88,46
Ajka (barna szenek)	42	28,60 ± 1,88	71,4
Ajka	100	24,80 ± 1,80	75,2

tős szerepe van a hamu tartózkodási idejének a tüztérben és a gázfázisban, valamint a szilárd fázis és a gázfázis hőmérsékletének. A tüztéri hőmérséklet és a tartózkodási idő szabja meg a hamuban lévő szulfátok és karbonátok viselkedését.

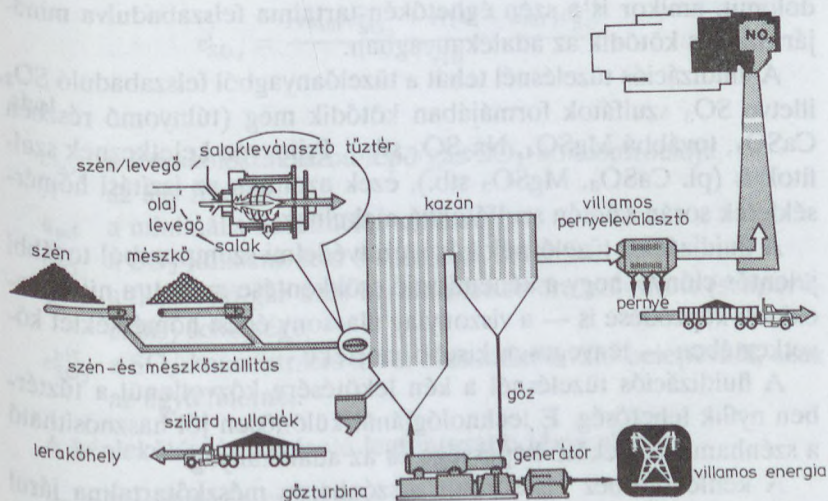
A szulfátok 1200 °C felett elbomlanak, és a keletkező SO₂ növeli a füstgáz kéntartalmát. Alacsonyabb hőmérsékleteken (250–500 °C) elméletileg visszakötődés is megvalósulhat a maradék hamualkotókba valamilyen fizikai-kémiai alapon, pl. felületi adszorpció révén. A felületi adszorpció lejátszódásában a hamuszemcse vagy pernye méretének (felületének) lehet döntő szerepe. Pl. az ajkai kénlekötési vizsgálatok során gyűjtött ciklonpernyeminták szemcsefrakciók szerinti vizsgálata is azt mutatta, hogy a 2–13 μm közötti fi-

nomabb frakció 2%-kal több ként tartalmazott, mint a 13–56 μm közötti méretű szemcsék.

A hamuban lévő karbonátok 800 °C felett kalcinálódhatnak, majd a fém-oxidok (CaO , MgO) kén-dioxidot vagy kén-trioxidot köthetnek le. Ha a kalcinálódás nem megy végbe (túl alacsony a tüztérhőmérséklet) vagy "túlégetés" áll elő (túl nagy, 1400 °C hőmérséklet), vagy a fém-oxidok reakcióképessége csökken, és kisebb mértékű lesz a kénlekötés.

A túl magas hőmérséklet miatt a hamu részleges vagy teljes olvadása is gátolhatja a $\text{SO}_2 + \text{CaO}$ reakciót, pl. a reagálási felületek csökkenése következtében [8], [13].

A szénhamuval lekötött és eltávolított kénmennyiség növelését salakleválasztó eltüzelő ciklonnal lehet elérni, mint az az 5.3. ábrán látható [31]. Ez a rendszer nem terjedt el.



5.3. ábra. Salakleválasztó előtüzelés [31]

(A konvencionális erőművel való összehasonlítás: SO_2 -emisszió csökkenése 50–90%, NO_x -emisszió mérsékelten csökken, erőművi hatások kissé csökken, energiakiadás kissé csökken, erőmű-élettartam meghosszabbodik)

5.4. Kéntelenítés fluidizációs tüzeléssel

A 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 befúvatás minimális sebessége kb. 1/70-ed része a szemcse lebegtetési sebességének. A létrehozott fluidréteget földgáz- vagy olajéggel lehet begyűjtani. 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 fluidágmagasság tartása érdekében esetleg inert, nem éghető anyagokat is elhelyeznek. Ez az inert anyag lehet pl. mészkő vagy 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 szulfidok is (pl. CaSO_3 , MgSO_3 stb.), ezek azonban az izzítási hőmérsékletek során szintén szulfátokká alakulnak.

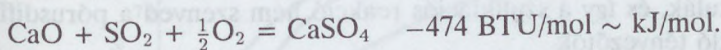
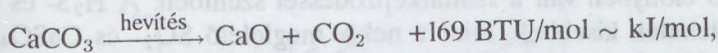
A fluidizációs tüzelésnek környezetvédelmi szempontból további jelentős előnye, hogy a kénemisszió csökkentése mellett a nitrogén-oxidok képződése is — a viszonylag alacsony égési hőmérséklet következtében — lényegesen kisebb mértékű.

A fluidizációs tüzelésnél a kén lekötésére közvetlenül a tüztérben 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 viszonylag egyszerűen leírhatók:



A fluidágyban a kénlenítéshez ideális hőmérséklet 800–900 °C között van. A fluidizációs tüzelésnél a kénlenítés magában a fluidágyban történik, de jelentős szerepe van különösen a finom szemcsék által történő kénlekötésben a "freeboard"-nak.

Szilárd adalékanyaggal történő kénlekötésre különböző fluidizációs tüzeléseknél több számítási modell létezik. A [15]-ben közölt végeredményt a következőkben foglaljuk össze.

A távozó gáznak a fröcskölőszakaszba való belépésekor a kén-dioxid koncentrációja:

$$c_{\text{SO}_2}^f = \frac{A u_{\text{mf}} c_{\text{SO}_2}^p + A(u - u_{\text{mf}}) c_{\text{SO}_2}^{\text{bH}}}{A u},$$

ahol

- $c_{\text{SO}_2}^f$ a fröcskölőszakaszba lépő gáz SO_2 -koncentrációja,
- A az ágy felülete,
- u_{mf} a minimális fluidizációs sebesség,
- $c_{\text{SO}_2}^p$ a SO_2 -koncentráció a szemcsés fázisban,
- u a fluidizáló gáz üres keresztmetszetére számított (szuperficiális) sebessége,
- $c_{\text{SO}_2}^{\text{bH}}$ a SO_2 -koncentráció a buborékfázisba való belépésnél, azaz az ágyfelületnél.

A kénlekötést befolyásoló legfontosabb tényezők:

- a kalcium/kén molarány,
- az ágymagasság,
- a fluidizációs sebesség,
- az adalékanyag szemcseeloszlása,
- az ágyhőmérséklet,
- esetleg katalitikus hatások.

Az égési feltételek igen fontosak. Oxigénszegény ágy esetén a CaO-nak H_2S -dal történő szulfidációs reakciója révén keletkező CaS előnyben van a szulfátképződéssel szemben. A H_2S - és CaS-molekulák kisebbek, mint a nekik megfelelő SO_2 - és $CaSO_4$ -molekulák, és így a szulfidációs reakció nem szenved a pórusdiffúziót gátló tényezőtől.

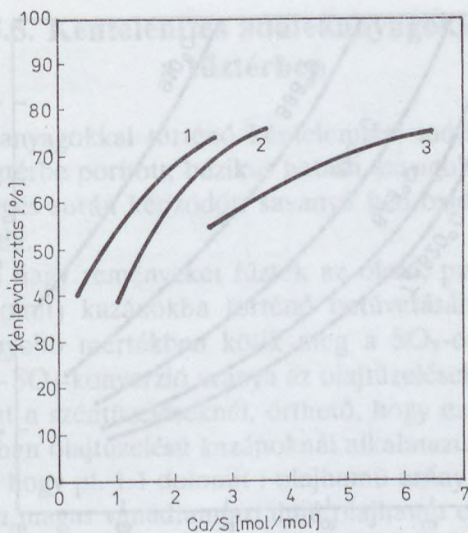
A cirkulációs fluidtűzelésnél a kénlekötést a tüzelőanyag-hamu kalcium, az adalékanyag és a visszacirkuláltatott, még fel nem használt kalcium biztosítja. A [15]-ben közölt kísérleteknél a különböző mésztartalmakat figyelembe véve számított kénlekötések értékét mutatja az 5.4. ábra.

A mészkő, illetve adalékanyag minősége jelentősen befolyásolja a kénlekötést. Különböző forrásokból származó mészkővel különböző eredmények érhetők el. Emellett az adalékanyag előkészítését, különösen a szemcseméretét kell kiemelni. Tájékoztató információt mutat be az 5.5. ábra. A 10 és 100 μm közötti minimum érték szembetűnő, de okáról nem ad tájékoztatást. Mivel számos kémiai és fizikai paraméter hatása érvényesül (tartózkodási idő, felület stb.), így feltehetően azok eredő hatása eredményezte a bemutatott jelleget. Kísérletek és közelítő számítások alapján elsősorban a mészkő minősége mellett a Ca/S molarány és a hőmérséklet szerepe jelentős. E két paraméter tisztázására végzett kísérletekről számol be a [13] közlemény. Az eredményt az 5.6. ábra mutatja. Az ábra alapján a kénlekötés mértékére a T hőmérséklet és a Ca/S molarány függvényében közelítő képlet is felírható:

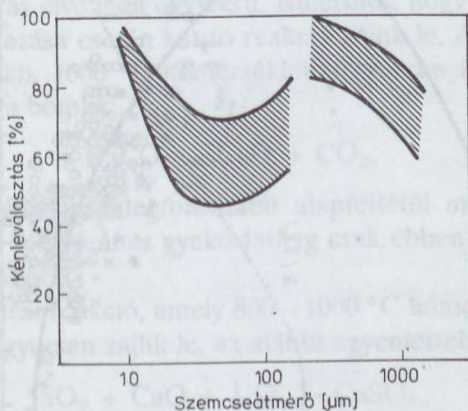
$$\eta(T_1, Ca/S) = 0,33 + 0,67\{1 - \exp[-k(T) \cdot Ca/S]\}.$$

A $k(T)$ függvényt befolyásoló egyéb paraméterek állandósága mellett csak a hőmérséklettől és a Ca/S aránytól függ a kénlekötés.

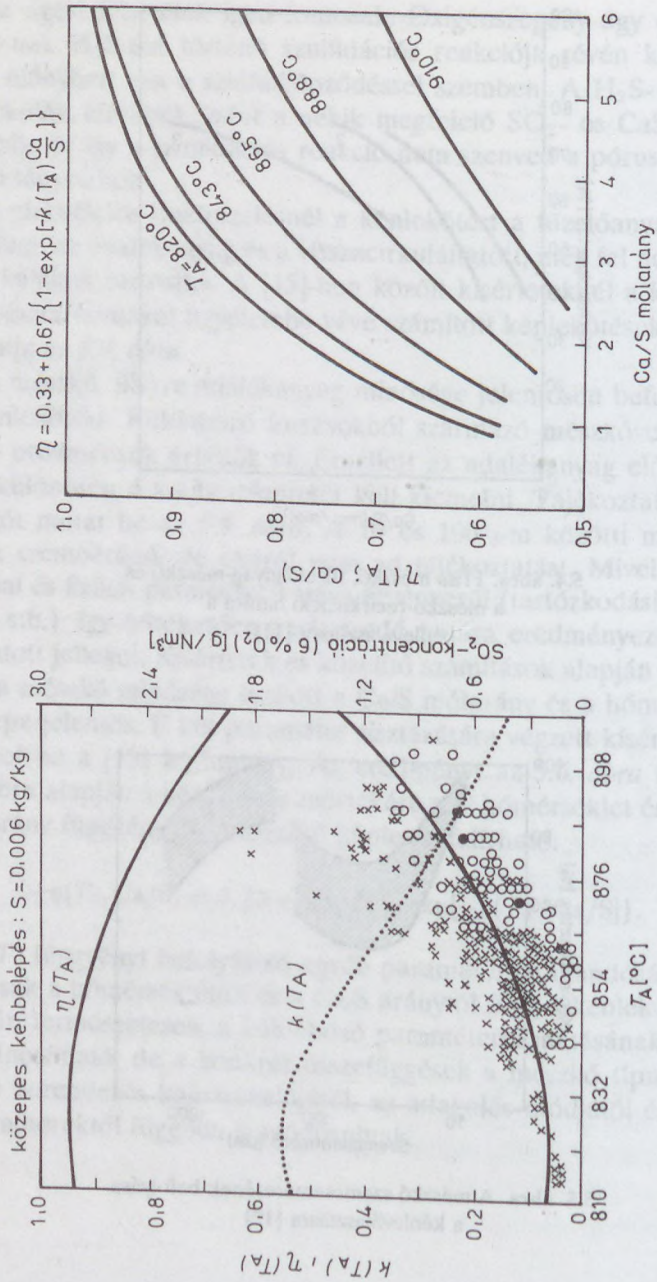
Bár, természetesen, a különböző paraméterek hatásának jellege általánosítható, de a konkrét összefüggések a mészkő típusa mellett a berendezés konstrukciójától, az adagolás módjától és egyéb paraméterektől függően is módosulnak.



5.4. ábra. Friss mészkő, tüzelőanyag-mészkő és a mészke-recirkuláció hatása a kénleválasztásra [11]



5.5. ábra. A mészke szemcseméretének befolyása a kénleválasztásra [12]



5.6. ábra. A hőmérséklet befolyása a kénválasztásra [13]

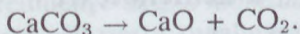
5.5. Kéntelenítés adalékanyagokkal a tűztérben

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

Kezdetben nagy reményeket fűztek az olcsó, porított adalékok (mészke, dolomit) kazánokba történő befúvatásához. Miután az adalékok nagyobb mértékben kötik meg a SO_3 -ot, mint a SO_2 -ot, és a $\text{SO}_2 - \text{SO}_3$ -konverzió aránya az olajtüzeléseknél lényegesen nagyobb, mint a széntüzeléseknél, érthető, hogy ezeket a módszereket elsősorban olajtüzelésű kazánoknál alkalmazták. A kísérletek azt mutatták, hogy pl. 1:1 dolomit : olajhamu arány általában megfelelő, csupán magas vanádiumtartalmú olajhamu esetén kellett az arányt 2:1-re emelni. Egyes esetekben a dolomitot vizes pép alakjában juttatták a tűztérbe (5.7. ábra).

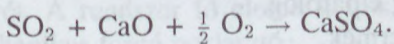
A későbbiekben kiderült, hogy ezek a megoldások többnyire a fűtőfelületek elrakódására és ezáltal súlyos üzemzavarokra vezettek. Így az adagolóberendezéseket leállították vagy átalakításukkal kísérleteztek.

A fenti eljárás elve igen egyszerű. Ismeretes, hogy a természetes mészke alkalmazása esetén két fő reakció zajlik le. A befúvott kalciumkarbonát kb. 1000°C hőmérsékleten gyorsan kalcium-oxidra és szén-dioxidra bomlik:

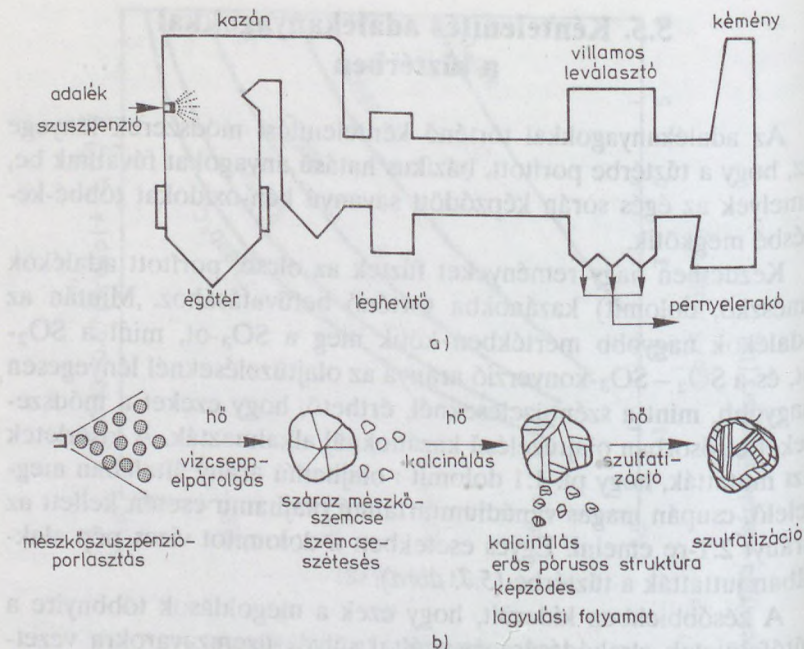


Ez az ún. kalcinálás a legfontosabb alapfeltétel mészkeadagolás esetén, mert a kéntelenítés gyakorlatilag csak ebben az aktivált állapotban lehetséges.

A kéntelenítési reakció, amely $800 - 1000^\circ\text{C}$ hőmérsékleti tartományban igen gyorsan zajlik le, az alábbi egyenlettel fejezhető ki:



A fenti egyenletből kitűnik, hogy ha a sztöchiometrikus arány 1, akkor 1 kg kén lekötéséhez 1,75 kg CaO szükséges.



5.7. ábra. A szuszpenzióbefűvés folyamatábrája (a) és a fizikai-kémiai folyamatok (b) [32]

5.6. Félszáraz mészköbefűvációs eljárások a kénlekötésre

5.6.1. NIRO-eljárás

Az eljárás egyszerű és hatékony füstgáz-kéntelenítést biztosít beporlasztott, de leszáradó abszorbens használatával. Előnyei:

- 90% feletti SO_2 -megkötés,
- a nedvesség elpárolg,
- száraz végtermék,
- alacsony energiafogyasztás,
- alacsony beruházási és üzemköltség.

5.4. táblázat

Tüzelőanyag	Kéntartalom [%]	SO ₂ -leválasztás [%]
Lengyel alacsony kéntartalmú szén	0,6	90
Illinois magas kéntartalmú szén	4,2	85–90
Montana közepes kéntartalmú szén	2,3	93
Venezuela olaj magas kéntartalommal	5,3	90
Nord Dakota alacsony kéntartalmú szén	0,5	85–92
Német barnaszén	0,6–1,5	95
Német kőszén	1,5	97
Wyoming bitumenes szén	1,2	80–90
Sarpy Creek szubbitumenes szén	1,2	84–92

A rendszerrel több mint 6000 MW_e villamos teljesítményű blokkot szereltek fel. A felhasznált tüzelőanyagok kéntartalma 0,8–4,6% között változott. Az USA-ban történt megvalósítások után az első NIRO Atomizert a Verbundkraft Elektrizitätswerke GmbH alkalmazta Ausztriában, 1984-ben, egy 405 MW_e blokknál. Az emisziós korlát 400 mg/Nm³ SO₂.

A rendszer lényege egy forgó porlasztó, amely abszorbeáló anyagzagyot a füstgázba porlasztva intenzív reakciót biztosít. A végtermék száraz pernye, amely a szokásos leválasztókkal leválasztható. A berendezést 50 fajta szénrel kipróbálták, igen jó eredménnyel.

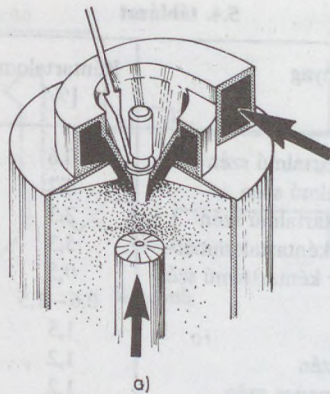
Néhány kísérlet eredménye az 5.4. táblázatban látható.

A rendszer a terhelésváltozásra rugalmasan reagál. A porlasztó elvi felépítését és a rendszert az 5.8. ábra mutatja.

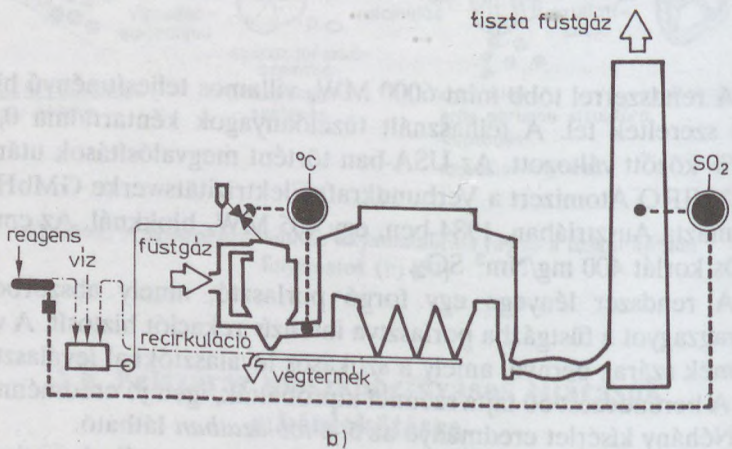
5.6.2. Fläkt-eljárás

A Fläkt Industrie AG az 1970-es években fejlesztette ki a kén-telenítő rendszerét. A rendszer fő eleme kettős fluidizáló furatos porlasztó és mechanikus forgó porlasztó.

Az eljárás a félszáraz módszerek közé tartozik. A rendszer alkal-



a)



b)

5.8. ábra. A porlasztó elvi felépítése (a) és a rendszer vázlata (b)

mas anhidrit és szulfát végtermék előállítására. A CaS akkor keletkezik maximális mennyiségben, ha a hőmérséklet $600 - 700\text{ }^{\circ}\text{C}$.

A folyamat két fontos lépéssel rendelkezik:

- pernyeleválasztással,
- oxidációs rendszerrel.

Az első üzemi berendezést a H. K. W-Sandreuth, Nürnberg (Németország) szállította az Energie- und Wasserversorgung AG részére. Itt egy 106 MW_t széntüzelésű kazánál szerelték fel, három szűrőtoronnyal és szövetszűrős pernyeleválasztóval. A SO₂-emisszió alacsonyabb volt, mint 200 mg/Nm³.

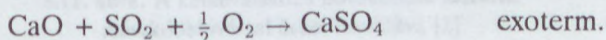
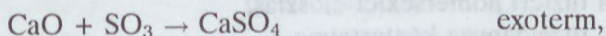
5.6.3. Tampella LIFAC eljárás

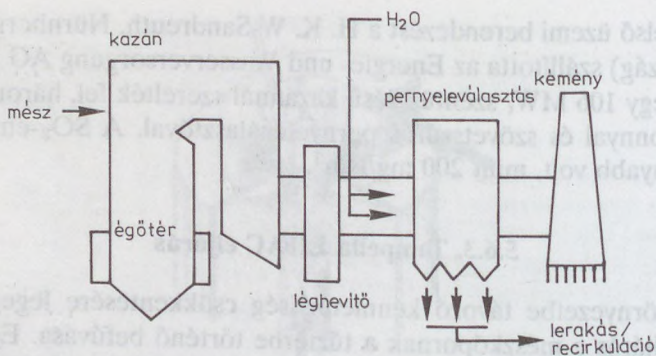
A környezetbe távozó kénmennyiség csökkentésére legegyszerűbb eljárás a mészkőpornak a tüztérbe történő befúvása. Egyszerűsége mellett azonban az eljárás hatásossága alacsony és nagy hamutartalmú szénnél tüzelési stabilitás csökkentést, salakosodásnövekedést okozhat. A Tampella cég új, egyszerű kéntelenítési eljárást dolgozott ki, amellyel magas hatékonyságot ér el. Az eljárás kétfázisú módszer. Az első fázis mészkőörleménynek a tüztérbe való befúvása, ahol a kalcium-karbonát kalcium-oxiddá alakul, és egy része már itt a kén-dioxiddal kalcium-szulfáttá alakul át. A további kén-dioxid-leválasztás a levegő-előmelegítő után elhelyezett reaktorban történik, vízgőz jelenlétében. Az első berendezést 1985-ben a Pohjolan Voima erőmű 252 MW_t blokkjánál helyezték üzembe.

A félig száraz eljárás kapcsolását az 5.9. ábra mutatja. A tüztérbe fűjt mészkő a kén egy részét megköti, majd a maradék kalcium-oxid az aktiváló reaktorban vízbefecskendezéssel további jelentős kénlekötést biztosít.

Az aktiváló reaktor a villamos pernyeleválasztó előtt van elhelyezve, a füstgázhőmérséklet ezen a helyen 200 °C alatt van. A reakciótermék száraz, és így a porleválasztóval leválasztható. A végtermék a szállópernye, kalcium-szulfít, kalcium-szulfát és egy kevés kalcium-hidroxid száraz keveréke.

A folyamatban a következő reakciók játszódnak le. A tüztérbe befúváskor végbemenő reakciók:

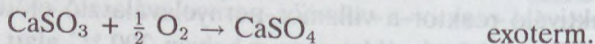
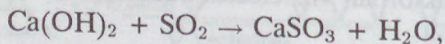
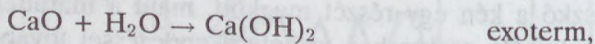




5.9. ábra. Félig száraz mészkőbefűvósos kénlekötési eljárás folyamatábrája [33]

A reakciók 800–1200 °C között játszódnak le. 1200 °C felett megkezdődik az adalék olvadása és a reakciótermékek bomlása, 800 °C alatt a reakció lecsökken.

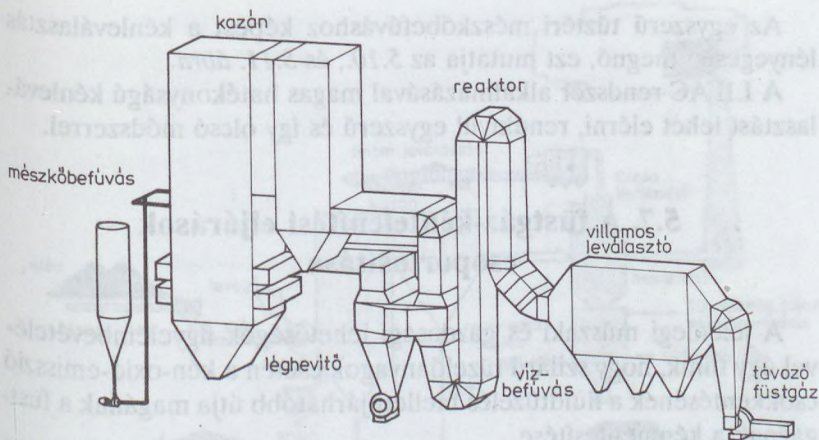
Az aktiváló reaktorban, vízbefecskendezés mellett, a maradék kalcium-oxiddal és a kén-oxidokkal a következő reakciók játszódnak le:



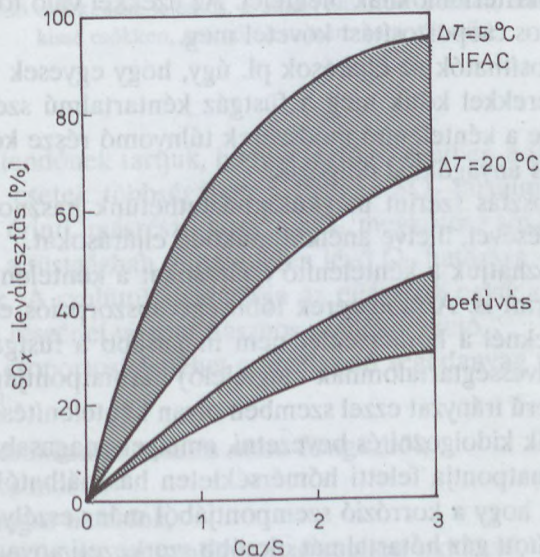
A kénleválasztást a relatív nedvességtartalom és a Ca/S mólarány befolyásolja.

A teljes folyamatot befolyásoló legfontosabb tényezők:

- a mészkő fajtája,
- a mészkőőrlemény finomsága,
- a befűvésnél lévő hőmérséklet,
- a tűztéri hőmérséklet-eloszlás,
- a tüzelőanyag kéntartalma.



5.10. ábra. A Tampella LIFAC eljárás folyamatábrája



5.11. ábra. A kénleválasztás növekedése a száraz mész-kőbefűvással összehasonlítva [2]

Az egyszerű tüztéri mészkőbefűváshoz képest a kénleválasztás lényegesen megnő, ezt mutatja az 5.10., és 5.11. ábra.

A LIFAC rendszer alkalmazásával magas hatékonyságú kénleválasztást lehet elérni, rendkívül egyszerű és így olcsó módszerrel.

5.7. A füstgáz-kéntelenítési eljárások csoportosítása

A jelenlegi műszaki és gazdasági lehetőségek figyelembevételével úgy tűnik, hogy szilárd tüzelőanyagok esetén a kén-oxid-emisszió csökkentésének a fluidtüzelés mellett járhatóbb útja magának a füstgáznak a kénmentesítése.

Füstgázkéntelenítéssel (5.12. ábra) már kb. 60 éve foglalkoznak, egyre növekvő intenzitással. Az idők folyamán megjelent publikációk száma sok ezerre, az eljárások száma több százra tehető.

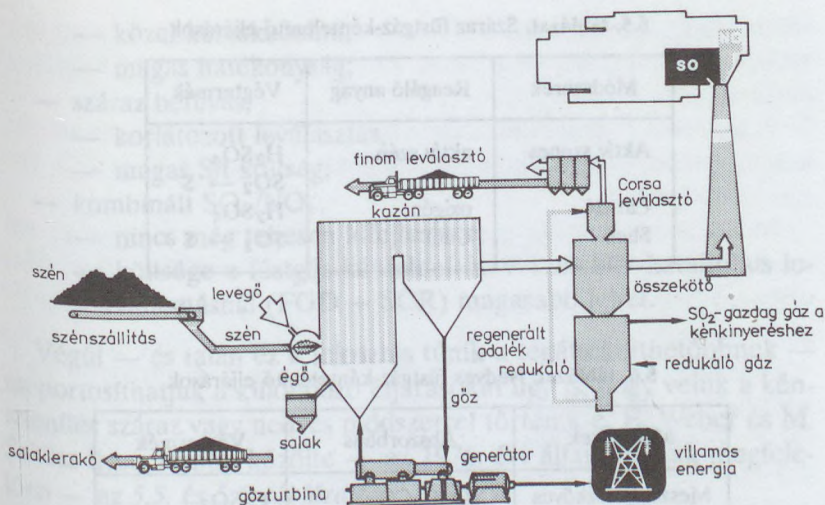
Jelenleg mintegy 60 – 70 olyan eljárás ismeretes a világon, amely az említett kritériumoknak megfelel. Az ezekkel való foglalkozás is már bizonyos csoportosítást követel meg.

Csoportosíthatók az eljárások pl. úgy, hogy egyesek csupán fizikai módszerekkel kötik meg a füstgáz kéntartalmú szennyező vegyületeit, de a kéntelenítő módszerek túlnyomó része kémiai folyamatokkal és anyagokkal dolgozik.

Más felosztás szerint megkülönböztethetünk hasznosítható termék kinyerésével, illetve anélkül működő eljárásokat.

Osztályozhatjuk a kéntelenítő eljárásokat a kéntelenítés hőmérséklete szerint is. A módszerek többsége abszorpciós elven működik, amelyeknél a hőmérséklet nem magasabb a füstgáz neutrális (csak a nedvességtartalomnak megfelelő) harmatpontjánál.

A korszerű irányzat ezzel szemben olyan kéntelenítési módszereket igyekszik kidolgozni és bevezetni, amelyek magasabb, a füstgáz valódi harmatpontja feletti hőmérsékleten használhatók. Így lehetővé teszik, hogy a korrózió szempontjából már veszélytelenné tett és megtisztított gáz hőtartalmát olcsóbb szerkezeti anyagból készült berendezésben jobban hasznosítani lehessen. Ez különösen a nagy kén- és nedvességtartalmú szénknél jelentős.



5.12. ábra. Füstgáz-kéntelenítés egyszerűsített vázlata [31]

(A konvencionális erőművel való összehasonlítás: SO_2 -emisszió csökkenése 90%, NO_x -emisszió csökkenése jelentős, erőművi hatásfok csökken, energiakiadás kissé csökken, erőmű-élettartam nem változik)

Megemlítenünk tartjuk, hogy a legtöbb esetben a füstgáz-kéntelenítés az esetek többségében a füstgáz SO_2 -tartalmát és SO_3 -tartalmát is érinti, másrészt, hogy a SO_2 megkötése során képződő szulfitek — a füstgázban mindig jelen lévő O_2 hatására — könnyen oxidálódnak. A szulfitek oxidációja az eljárások egyik részénél zavaró, másik részénél viszont hasznos mellékreakció.

Egyfajta csoportosítás lehet a leválasztó segédanyag mennyisége alapján [33]:

- SO_2 -csökkentés tüzelés utáni füstgázból;
- nedves mosás,
 - magas hatásfok,
 - mészkővel vagy inhibitorral segített oxidáció,
 - magnézium — mész;
 - szárítós beporlasztás,

5.5. táblázat. Száraz füstgáz-kéntelenítő eljárások

Módszerek	Reagáló anyag	Végtermék
Aktív szenes	aktív szén	H_2SO_4 $SO_2 \rightarrow S$
Cat-ox	oxigén	H_2SO_4
Shell	CuO	$SO_2 \rightarrow S$

5.6. táblázat. Nedves füstgáz-kéntelenítő eljárások

Módszerek	Abszorbens	Végtermék
Meszes/mészköves	CaO , $CaCO_3$	$CaSO_3$ $CaSO_4$
Kettős alkáli	H_2SO_4 , $CaCO_3$ Na_2SO_3 , $CaCO_3$ Na_2SO_3 , CaO $NaOH$, $CaCO_3$ $(NH_4)_2SO_3$ $Al_2(SO_4)_3$, $CaCO_3$	$CaSO_3$ $CaSO_4$
Wellmann MKK Wellmann SCEC	Na_2SO_3	H_2SO_4 $SO_2 \rightarrow S$
Nátrium-karbonát	Na_2CO_3	Na_2SO_3 Na_2SO_4
Nátrium-hidroxid	$NaOH$	Na_2SO_3 Na_2SO_4
Magnézium-oxid	MgO $Mg(OH)_2$	H_2SO_4 $SO_2 \rightarrow S$
Ammóniák	NH_3	$(NH_4)_2SO_4$ $(NH_4)_2SO_3$ + bomlástermék

- közel kereskedelmi,
- magas hatékonyság;
- száraz befűvés,
- korlátozott leválasztás,
- magas S/t költség;
- kombinált SO_x/NO_x ,
- nincs még teljesen kifejlesztve,
- költsége a füstgáz-kéntelenítés + szelektív katalitikus leválasztásnál (FGD + SCR) magasabb lehet.

Végül — és talán ez a felosztás tűnik a legáttekinthetőbbnek — csoportosíthatjuk a különböző eljárásokat úgy is, hogy velük a kén-telenítés száraz vagy nedves módszerrel történik-e. E. Weber és M. Schütz ilyen alapon közölte — az 1976. évi állapotoknak megfelelően — az 5.5. és 5.6. táblázatot.

A száraz eljárások közül az aktív szenes, míg a nedves eljárások közül a meszes/mészköves módszer a teljes kapacitás kétharmadát képviseli.

5.8. Száraz eljárások

5.8.1. Aktív szenes adszorpció

Füstgázok kén-oxid-tartalmának adszorbeáltatására jelenleg kizárólag karbon tartalmú adszorbenseket alkalmaznak. A szervesetlen abszorbensekkel (pl. szilikagél, zeolitok stb.) végzett kísérleteknél műszaki szempontból nehézségek léptek fel. Aktív szén előállítására elsősorban fiatalabb geológiai korú szénféléseket (barnaszenet, tőzeget, lignitet) svéleznek, és az így nyert svélkoksztot alkalmazzák megkötésre.

A kén-dioxid első lépésben az adszorpciós anyag belső felületén kötődik meg. Ezzel párhuzamosan a füstgázban lévő oxigén és vízgőz egy része szintén elnyelődik. Második lépésben a megkötött SO_2 — az ugyancsak megkötött vízgőzzel és oxigénnel — kénsavat ad. A SO_2 adszorpciós leválasztása maximálisan 160°C hőmérsékletig végezhető el hatásosan. Az adszorpciós eljárások csak akkor

váltak gazdaságossá, amikor sikerült a kimerült aktív koksz regenerálását biztonságosan megoldani. Ennek három útja van: termikus, mosásos és redukciós.

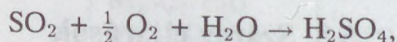
A termikus regenerálás 250–650 °C hőmérséklet-tartományban lehetővé teszi, hogy karbonium jelenlétében SO₂, H₂O és CO₂ deszorbeálódjon.

Mosásos regenerálás esetében lehetőség van arra, hogy az adszorbeált állapotában 70% körüli kénsav-koncentrációt vízzel eltávolítsuk. Regenerátumként ebben az esetben maximum 20 súly-%-os kénsav adódik.

A reduktív regenerálásnál a kénsavat kénhidrogénnel vízgőz keletkezése mellett redukálják. A kivált ként vízgőzzel kb. 650 °C-on távolítják el, és az adszorpciós anyagon maradt részt valamilyen redukáló gázzal (pl. hidrogénnel) kénhidrogénné alakítják.

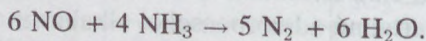
Aktív koksz és ammónia együttes alkalmazásával kén és nitrogén-oxid leválasztására alkalmas eljárást dolgoztak ki.

A kén-dioxid-leválasztáshoz először azt kénsavvá kell oxidálni, azaz 120–150 °C hőmérsékleten:

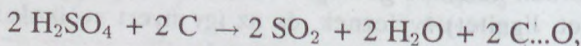


ami az aktív kokszon adszorbeálódik.

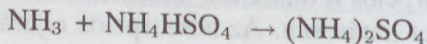
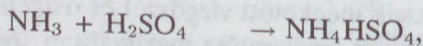
A füstgázban ammóniaadagolással a nitrogén-oxiddal lejátszódó reakció:



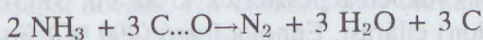
A folyamatban felhasznált aktív kokszot regenerálni kell, amely a következő reakcióval történik:



A rendszerben az



reakciókkal keletkező ammóniumsók elbomlanak kénsavvá és ammóniává, és ez a



reakcióval az aktívkosz-vesztéseget csökkenti.

5.8.2. Katalitikus oxidáció

A szokásos körülmények között a kén-dioxidnak levegőoxigénnel SO_3 -dá való jó hatásfokú oxidálásához kb. 450°C hőmérséklet és katalizátor kell. A kazán $400 - 500^\circ\text{C}$ -os terén áthaladó füstgáznak nincs elég ideje és katalitikus hatású porral is ritkán érintkezik ahhoz, hogy kielégítő hatásfokkal kén-trioxidá alakuljon.

Az amerikai Monsanto cég katalitikus oxidációs eljárásának elve lényegében azonos a kontakt kénsavgyártásával, gyakorlata pedig a fenti $\text{SO}_2 - \text{SO}_3$ -konverzió feltételeinek a SO_3 -képződés irányába történő eltolásán alapul.

A kazán füstjáratának kb. 480°C -os szakaszán először a pernyét választják le mechanikusan (ciklon), majd magas hőmérsékleten működő elektrosztatikus porleválasztón. Erre azért van szükség, mert a továbbiakban a pernye katalizátorméregként szerepelne.

A pormentes füstgáz kb. 470°C -on kerül a katalitikus konverterbe, ahol különböző hordozókra (SiO_2 , porcelán, zeolitok stb.) leválasztott K_2O -dal vagy K_2SO_4 -tal kombinált vanádium-pentoxid katalizátort használnak. Ennek hatására a tisztított füstgáz SO_2 -tartalma kén-trioxidá oxidálódik. A füstgáz a konverterben kb. $0,3$ s-ig tartózkodik, átlagosan 450°C hőmérsékleten. A konverterből kilépő gáz keresztülhalad a luvon, ahol hőmérséklete 90°C -ra csökken. Ennek eredményeként a kén-trioxid a lekondenzált vízgőzzel kénsavvá alakul, amely elektromos savleválasztóval távolítható el. A tisztított füstgáz a kéményen távozik.

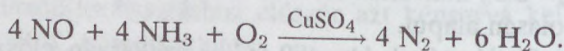
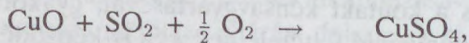
Bár az eljárás kidolgozott, a rendszer bonyolultsága miatt nem tudott széles körben elterjedni. A keletkezett kénsav értékét tekintve a gazdaságosság nem igazolható.

5.8.3. Réz-oxidos kéntelenítés

A legutóbbi években fejlesztették ki az ún. SFGD (Shell Flue Desulphurisation) eljárást. Ennél a forró (400 °C) füstgázt egy réz-oxid-tartalmú hordómasszán vezetik keresztül, amikor is a SO₂ kemisorpcióval mint rézszulfát kötődik meg. A szulfát regenerálása kén-dioxiddá egy hidrogén/gőz eleggyel történik.

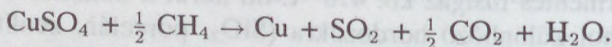
Az üzemben három, párhuzamosan kapcsolt reaktort üzemeltetnek, ezek közül kettőt adszorpcióra, egyet deszorpcióra kapcsolva. A töltetek kosarakban helyezkednek el. A deszorpció folyamán felszabaduló SO₂ koncentrációja kb. 50%, és közvetlenül Claus-berendezésbe vezethető, ahonnan elemi kén formájában ki nyerhető.

A rézoxidos SO₂-leválasztás reakciói NO-leválasztással együtt:



Ez utóbbi a szelektív katalitikus reakciók közé tartozik.

Az eljáráshoz felhasznált anyag visszanyeréséhez, a CuSO₄ regenerációjához metán használható:



A regenerálás után keletkező SO₂ kénygártáshoz felhasználható.

5.9. Nedves eljárások

Minden nedves eljárás a kén-oxidoknak vízben való abszorbeáltságából indul ki. A SO₂ fizikai oldódását kénessav képződése követi. A H₂SO₃ vizes oldatban H₃O⁺-, HSO₃⁻-, SO₃²⁻-ionok alakjában van jelen, ezért az oldhatóság nemcsak a hőmérséklet, hanem az oldat pH-jának is függvénye. A SO₂ oxidációjából képződött kénsav a kénessavnál jobban disszociálva, utóbbi oldódását visszaszorítja. Lúgos kémhatású vízben viszont a SO₂ jobban oldó-

dik, mint semlegesben, mert a lúgos közeg szabad OH^- -ionjai a kénessav disszociációjából képződött H_3O^+ -ionokat lekötve, a kén-dioxid oldhatóságát növelik. Növekszik a SO_2 oldhatósága vízben a gáz SO_2 -tartalmának növekedésével is.

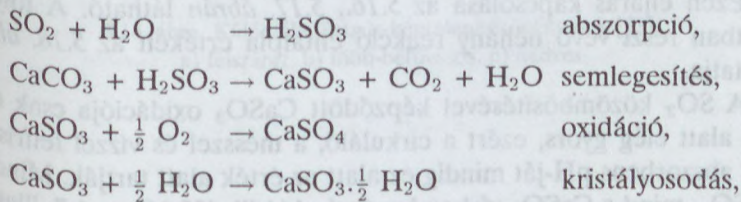
Az abszorpció paraméterei:

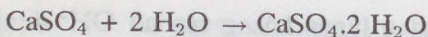
- az áramlási sebesség,
- a hőmérséklet,
- a SO_2 parciális nyomása,
- a kemoszorbens koncentrációja,
- a gáz- és folyadékfázis közötti érintkezési felület nagysága.

E paraméterek közül gyakorlatban a hőmérséklet és a SO_2 parciális nyomása adott, az áramlási sebesség és a kemoszorbens koncentrációja viszonylag szűk határok között változtatható, tehát az abszorpció mértékét leginkább a gáz–folyadék érintkezési felület határozza meg.

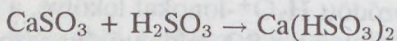
5.9.1. Meszes/mészköves eljárások

A SO_2 és a SO_3 megkötésére legolcsóbb bázis a mész. A legáltalánosabban használt mész/mészkő mosórendszerekben a meszet vagy a mészkövet mésztej, illetve mészpép formájában közvetlenül vezetik be a mosási körfolyamatba. Nincs egyértelmű tendencia arra vonatkozóan, hogy abszorbensként a meszet vagy mészkövet részesítik-e előnyben. Ebből a szempontból a két legfontosabb tényező az abszorbensek helyi rendelkezésre állása és költsége. A kén-dioxid-közömbösítésnek primer terméke a CaSO_3 , amely igen könnyen oxidálódik $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ -vá, azaz gipsszé. A SO_3 közömbösítéséből közvetlenül gipsz képződik. A lejátszódó folyamatok:



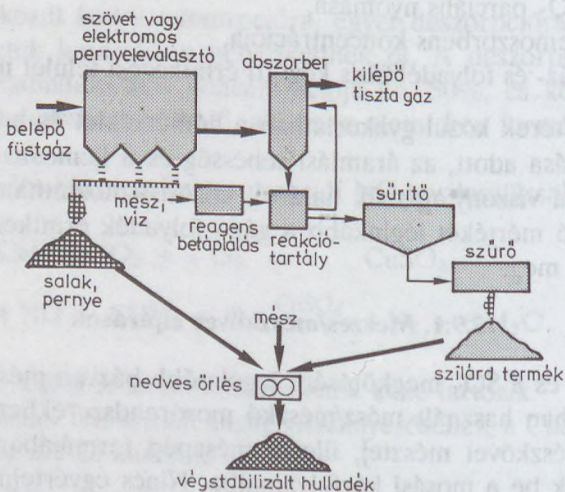


kristályosodás,



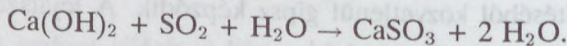
pH ellenőrzés.

A kéntelenítő elhelyezését a kapcsolási sémában az 5.13. és az 5.14. ábra mutatja. Az elvi felépítése az 5.15. ábrán látható.



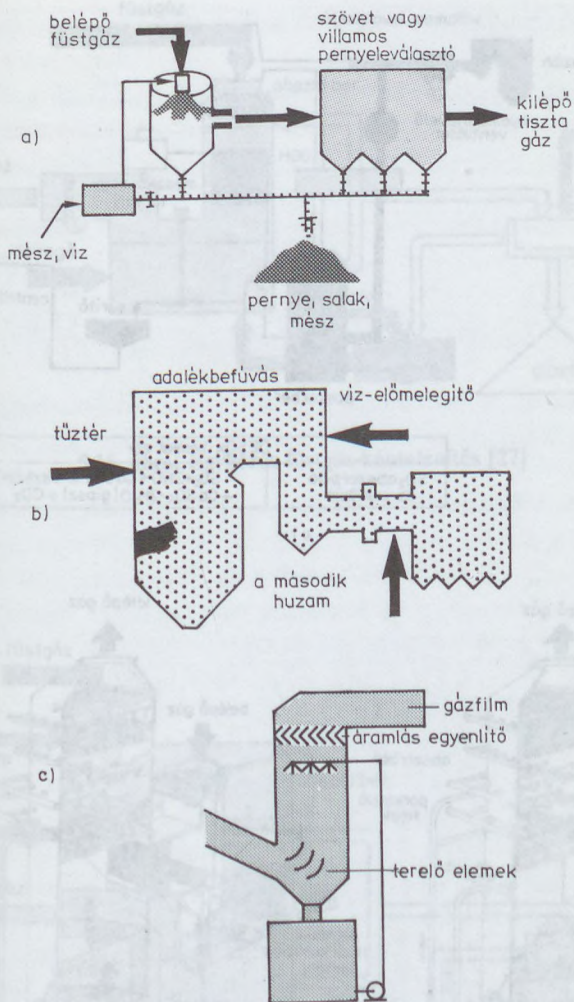
5.13. ábra. A kéntelenítő elhelyezése a füstgázrendszerben [33]

Ha a folyamathoz oltott mésztejet használnak, akkor a reakció:

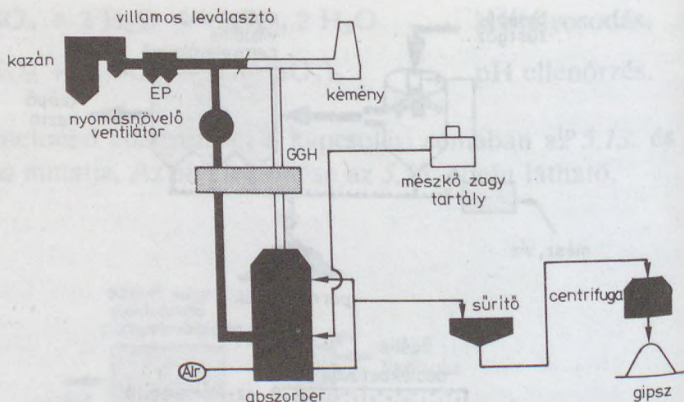


Ezen eljárás kapcsolása az 5.16., 5.17. ábrán látható. A folyamatban részt vevő néhány reakció entalpia értékeit az 5.18. ábra mutatja.

A SO_2 közömbösítésével képződött CaSO_3 oxidációja csak 6,4 pH alatt elég gyors, ezért a cirkuláló, a mésszel és vízzel felfrissített abszorbens pH-ját mindig ez alatt az érték alatt tartják. Mind a CaSO_3 , mind a CaSO_4 vízben kevésbé oldódik (20 °C-on 1,7, illetve

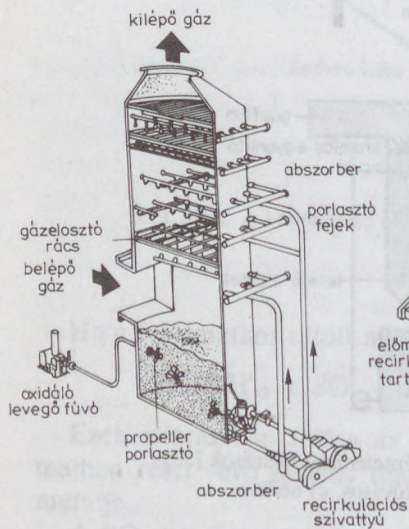


5.14. ábra. Különféle füstgáz-kéntelenítési eljárások [33]:
a) félszáraz, b) több-befúvásos, c) nedves

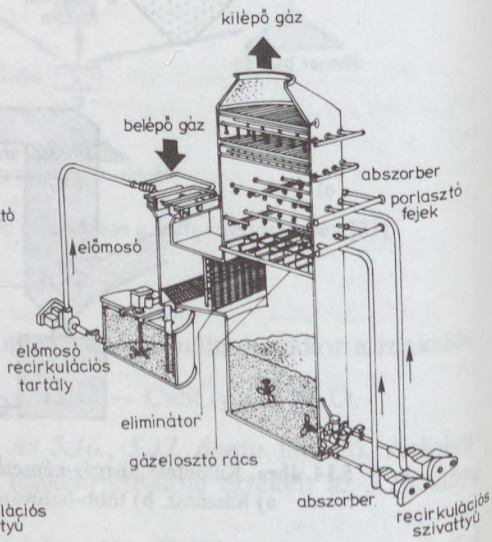


DESOx kémiai elv	
SO ₂ abszorpció és oxidáció	$\text{SO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + \text{CaCO}_3 (\text{mészke}) + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} (\text{gipsz}) + \text{CO}_2$

a)

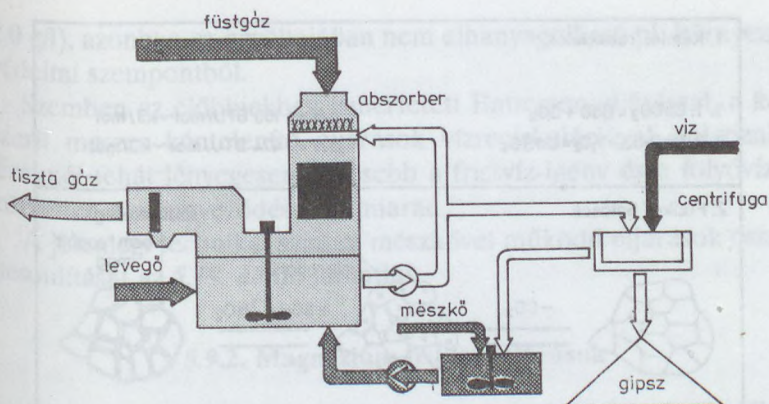


b)

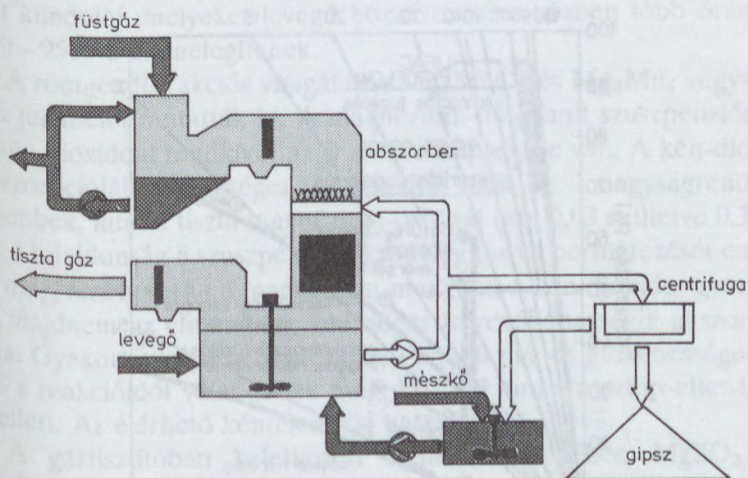


c)

5.15. ábra. A füstgáz-kéntelenítő szerkezeti felépítése [7]: a) folyamatábra, b) poros gázkeverő rendszer vázlata (fejlett porlasztótorny) c) porleválasztó rendszer vázlata, (konvencionális porlasztótorny)

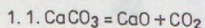


5.16. ábra. Egykörös füstgáz-kéntelenítés [27]

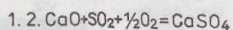


5.17. ábra. Kétkörös füstgáz-kéntelenítés [27]

1. Kémiai reakciók

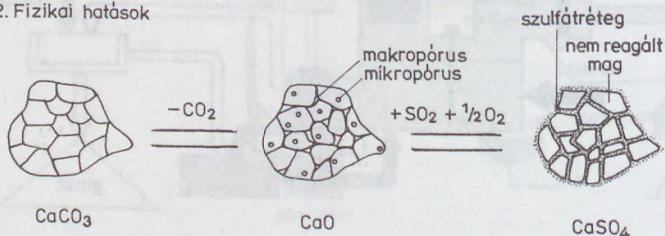


$$\Delta H = +169 \text{ BTU/mol} \sim \text{kJ/mol}$$

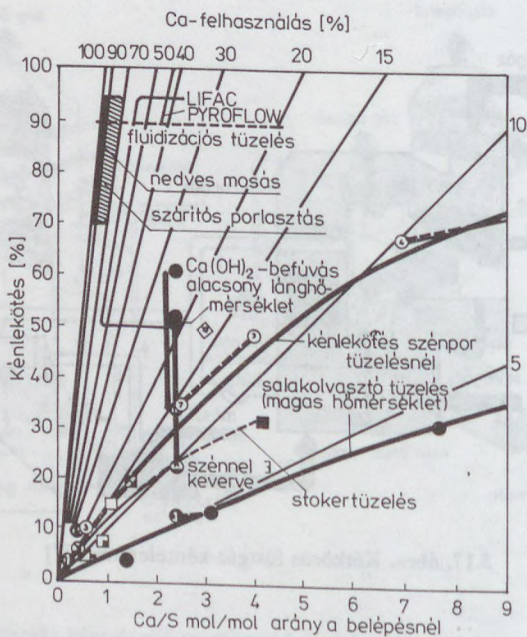


$$\Delta H = -474 \text{ BTU/mol} \sim \text{kJ/mol}$$

2. Fizikai hatások



5.18. ábra. A mészkőszemcsén végbemenő kémiai és fizikai folyamatok [8]



5.19. ábra. A különböző kéntelenítési eljárások hatásosságának összehasonlítása [35]

2,0 g/l), azonban ez egyáltalában nem elhanyagolható pl. környezetvédelmi szempontból.

Szemben az előbbieken ismertetett Battersen-eljárással, a korszerű meszes kéntelenítő eljárások vízrecirkulációval dolgoznak. Ezeknél tehát lényegesen kevesebb a frissvíz-igény és a folyóvizek közvetlen elszennyeződése is elmarad.

A jelenlegi technikai szinten mészkővel működő eljárások összehasonlítását az 5.19. ábrán láthatjuk.

5.9.2. Magnézium-oxidos eljárások

A magnézium-oxiddal működő kéntelenítő eljárások általában költségesebbek, mint a mész/mészkövesek, miután ezek az abszorbeáló anyag visszanyerésével működnek.

A Grillo-eljárásnál — a pernye eltávolítása után — a SO_2 abszorpciója egyenáramban történik a permetező vízzel, olyan feliszapolás alkalmazásával, ahol 1 mol MnO_2 -ra 3–6 mol MgO jut. Az abszorbens létrehozására mechanikusan elkevert elegyekből lehet kiindulni, melyeket levegő hozzávezetése közben több órán át 850–950 °C-ra melegítenek.

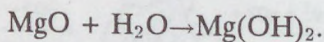
A röntgendiffrakciós vizsgálatok Mg_6MnO_8 és Mg_3Mn_5 vegyületek jelenlétét mutatták ki. A magnézium-manganit szuszpenzióinak a kén-dioxiddal rendkívül nagy reakcióképessége van. A kén-dioxid abszorpciójához szükséges tartózkodási idők kb. 1 nagyságrenddel kisebbek, mint a tiszta magnézium-oxidnál (kb. 0,03 s, illetve 0,3 s). Ez a tulajdonság a szuszpenzió viszonylag durva permetezését engedi meg, amely során a magnézium-manganit a kén-dioxidot gyorsan és majdnem az elméletileg lehetséges felvevőképességig abszorbeálja. Gyakorlatilag a berendezésben kb. 10 m/s-os gázsebességet és 0,8 s reakcióidőt választanak meg, kb. 200 mm vízoszlop-ellenállás mellett. Az elérhető kéntelenítési hatások 90–95%.

A gáztisztítóban keletkezett termék lényegében MgSO_3 és MnSO_4 elegyből áll. Szárítás és adalékanyagok hozzáadása után a terméket — őrölt szén bekeverése közben — kalcinálókemencébe juttatják, ahol kén-dioxidban dús hulladékgáz, valamint magnézium-manganit keletkezik. A hulladékgáz — pl. Claus-kemencében —

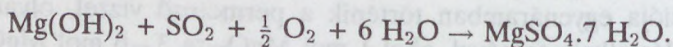
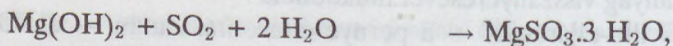
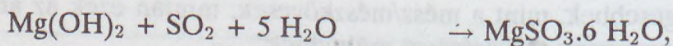
elemi kénné dolgozható fel, a regenerált abszorbens pedig recirkulációs tartályokba vezethető.

A Chemico cég a kén-dioxid eltávolítására kétféle eljárást is kidolgozott.

Az első eljárásnál a kén-dioxidot Venturi-mosóban analóg módon választják le a füstgázból, mint a meszes eljárásoknál. Első lépésben előkészítő berendezésben MgO-ból és vízből magnézium-hidroxidot állítanak elő:



Ez a magnézium-hidroxid a mosóberendezésben reagál a füstgáz SO_2 -tartalmával:



A regenerálás során a szulfit és szulfát tartalmú elegyből felszabadul az abszorbeált kén-dioxid. A MgO ismét visszavihető az abszorpciós rendszerbe, a SO_2 pedig fel lehet használhatni pl. kén-savgyártásra. Ez azáltal érhető el, hogy a folyamat előírással vezetésével 15 térf. %-os dús SO_2 -gáz nyerhető ki. Üzemi körülmények között és 7,5 pH-jú mosófolyadék esetében a kéntelenítés hatásfoka legalább 90%.

A magnézium-oxidos feliszapoláson alapuló eljárásnál kívül a Chemico cég egy olyan eljárást is kialakított, amely szilárdanyagmentes, $\text{Mg}(\text{HSO}_3)_2$, MgSO_3 és MgSO_4 tartalmú savanyú oldattal dolgozik. Ez az eljárás különösen széntüzelésű erőműveknél látszik használhatónak, minthogy mind a pernyét, mind a kén-dioxidot ugyanabban a gázmosóban lehet eltávolítani. A pernye leválasztása után az oldat a magnézium-oxid tartalmú reakcióedénybe kerül, ahol a kén-dioxiddal MgSO_3 formájában kiválik.

A csapadékot innen a regenerálóberendezésbe juttatják, miközben az anyaglúg a gázmosóba kerül visszavezetésre. Az United Engineers cég hasonló elven működő berendezést alakított ki,

amelyben a MgSO_3 -ot fluidizációs reaktorban regenerálják MgO -dá, a keletkezett MgSO_4 részarányától függően 850 és 1100 °C között.

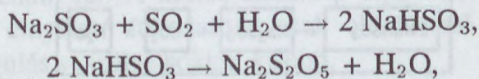
5.9.3. Eljárások alkalikus szorbensekkel

Az alkalikus abszorbensek és a kénmentesítésnél ezekből képződött szulfátok oldhatósága vízben sokkal nagyobb, mint az alkáliföldfém-vegyületeké és ezek szulfátjaié.

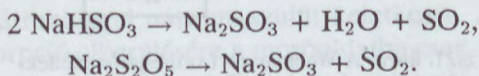
Az alkalikus abszorpciós eljárások alkalmazásánál ezért rendszerint homogén oldatokkal dolgoznak. Az eljárások így kevésbé hajlamosak eldugulásokra és eróziókra, mint a kalcium- és magnéziumvegyületekkel működő szuszpenziós eljárások. Mosófolyadék-ként hígított oldatban vagy nátronlúgot vagy kálilúgot, illetve ezek sóit használják.

Ezek közül a legismertebb a Wellmann – Lord-eljárás, amely a füstgáz SO_2 -tartalmának, Na_2SO_3 -oldatban való kemiszorpcióján alapul. Ez az eljárás a kéngyártáshoz alkalmazott folyamat, amely $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{CO}_3$ alapanyagot használ kéntelenítésre. A folyamat részben zárt, mivel az abszorbeáló anyag regenerálás után ismételt felhasználásra kerülhet. A kénleválasztás két fázisa (5.20. ábra):

— abszorpció:

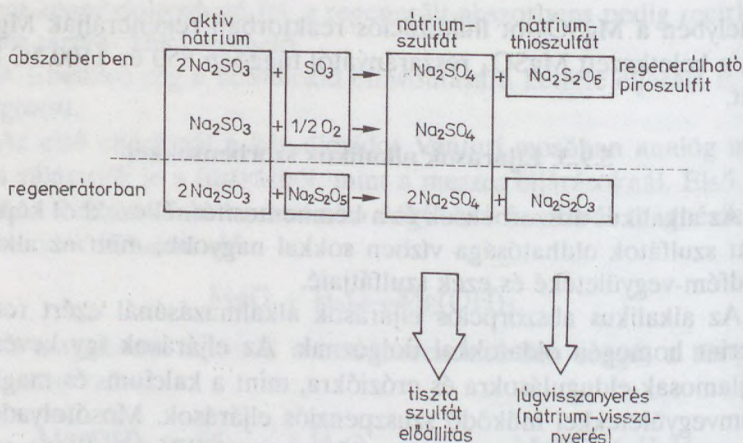


— és az ezt követő regeneráció:

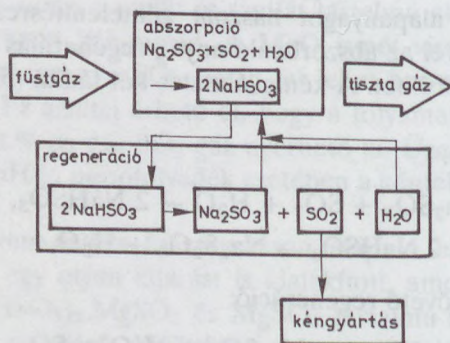


A folyamatban azonban nemkívánatos mellék-reakciótermékek is létrejönnek, ezek:

- nátrium-szulfát, Na_2SO_4 ,
- a nátrium-tioszulfát, $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$.



5.20. ábra. A Wellmann – Lord-eljárás kapcsolása [21]

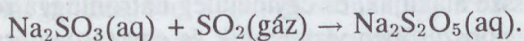


5.21. ábra. A Wellmann – Lord-eljárás mellék-
reakciói [21]

Ezek a mosási folyamatban nem aktívak. A folyamaton belül ezek külön feldolgozást igényelnek (5.21. ábra).

Első lépésben a füstgázból Venturi-mosóberendezés segítségével eltávolítják a szuszpendált anyagokat és a SO_3 -ot. Ezután a füst-

gáz egy — tálcás rendszerű — mosóberendezésbe kerül, ahol a recirkuláló alkálisóldat nátrium-biszulfit alakjában megköti a SO_2 -tartalmat:



A kimerült abszorbeáló oldat evaporátorba kerül, ahol a nátrium-biszulfit termikusan megbomlik, regenerálódik a nátrium-szulfit, egyidejűleg felszabadul a kén-dioxid koncentrált formában.

A nátrium-szulfitot recirkuláltatják a mosóberendezésben; a kén-dioxidot pedig vagy kénsavgyártásra használják fel közvetlenül, vagy elemi kénné alakítják Claus-berendezésben.

A körfolyamatban a nátrium-szulfit-oldat egy része nátrium-szulfáttá oxidálódik, ezt a rendszertől elkülönítik, kristályosítják, szárítják és értékesítik.

Az oxidáció miatti veszteséget NaOH vagy Na_2CO_3 adagolásával pótolják.

5.9.4. Kettős alkalikus eljárások

Az ún. kettős alkalikus eljárásoknál a mosóoldatot kalciumvegyületekkel történő cserebomlással regenerálják, amikor viszonylag nehezen oldódó kalcium-szulfit és kalcium-szulfát válik ki, amely gipsszé dolgozható fel. A kettős alkalikus eljárások előnye abban van, hogy az elnyelető fokozatban csak oldatokkal dolgoznak és ezért az eldugulás veszélye sokkal kisebb.

A mosóberendezésben a por és SO_2 tartalmú füstgázt nátrium-szulfát és nátrium-hidroxid tartalmú oldattal reagáltatják. A kén-dioxidból a nátronlúggal nátrium-szulfit keletkezik. A nemkívánatos CO_2 -abszorpció elkerülésére a mosóoldatba csak annyi NaOH -t adagolnak, hogy az abszorbensből eltávozó oldat pH-ja 6–7 között legyen.

A primer keletkezett nátrium-szulfit egy része már a mosóberendezésben — a gázban levő O_2 hatására — nátrium-szulfáttá alakul. A szulfit további oxidálását a mosóoldatban a mosóberendezésen kívül végzik, levegőbefúvással. A szulfát képződését az egyidejűleg kimosott por katalitikus hatása erősen meggyorsítja.

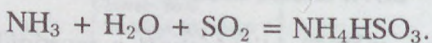
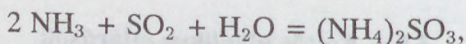
A keletkezett nátrium-szulfát-oldat egy részét — miután egy de-rítőtartályban a kimosott port belőle eltávolították — gipszleválasztó tartályba vezetik. Itt kalcium-hidroxid adagolásával a nátrium-szulfátot gipsszé alakítják, és egyidejűleg nátronlúggá regenerálják.

A gipszet dobszűrőben víztelenítik és egy tározótérre szállítják. A regenerált mosóoldatot egy további tartályba szállítják, és itt szóda adagolásával vagy CO_2 befúvatásával lágyítják. A kivált kalcium-karbonát-iszapot ugyancsak víztelenítik és a gipsziszappal együtt deponálják.

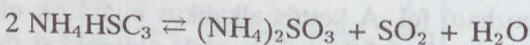
A regenerált nátronlúg visszakerül a mosókörbe, és újra a SO_2 -kimosás rendelkezésére áll.

5.9.5. Ammóniás vizes eljárások

Az ammónia és kén-dioxid reakciója a körülményektől, elsősorban az $\text{NH}_3 : \text{SO}_2$ aránytól függ:



Ezzel szemben az ammónium-biszulfít melegítéssel a



reverzibilis egyenlet értelmében forralással átalakul ammónium-szulfittá, miközben az elnyelt SO_2 fele felszabadul.

A regenerálófolyamattal már évtizedek óta foglalkoztak világ-szerte, hogy a füstgázok kéntelenítését hőregeneratív, illetve ciklikus ammóniás eljárással oldják meg.

A probléma lényege az, hogy ha az ammónium-szulfít-biszulfít abszorpciós rendszerben nő az NH_3 koncentrációja, növekszik annak SO_2 -elnyelő képessége is.

Egyúttal azonban az NH_3 gőznyomása is növekszik, ami csökkenti az elérhető regenerálási hőmérsékletet. Az ellentétesen ható tényezőknek van egy elméleti NH_3 -koncentrációs optimuma, amely-

nél a SO_2 abszorpciós kapacitás maximális és a regenerálási gőzfelhasználás minimális.

A vizes ammóniaoldattal történő SO_2 -abszorpció és az ezt követő kiforralás módszerével a kén-dioxidnak egy része kötődik meg ammónium-biszulfid alakban, más része ammónium-szulfidra alakul, amelynek SO_2 -tartalma kiforralással nem szabadítható fel. Kiforralással az ammónium-biszulfidból a benne lévő SO_2 -nak szintén csak egy része nyerhető ki, míg más része itt is ammónium-szulfid alakban marad vissza.

Végtermékben az ammónium-szulfid formában kötött kén-dioxid kinyerése ammónium-szulfid alakban történhet. Az ammónium-szulfid a szulfid-biszulfid oldaton áthajtott füstgáz O_2 -tartalmának hatására képződik, és miután az oldatban feldúsul, kikristályosítható.

A kristályos termék szűrőprésszel vagy centrifugálással választható el, és közvetlenül értékesíthető. Régebben ennek nem volt akadálya, mert az ammónium-szulfidat nitrogénműtrágyaként lehetett hasznosítani. A mai felfogás szerint azonban ilyen típusú műtrágyával több kárt lehet okozni, mint hasznot, mert a talaj szulfidkoncentrációját megengedhetetlenül növeli.

Az ammóniás vizes SO_2 -elnyelés mosóoldatának regenerálása történhet savas megbontással is. A savak a kén-dioxidot felszabadítják, és ez melegítéssel eltávolítható. A savas regenerálás történhet kénsavval, salétromsavval és foszforsavval. Első esetben ugyanazok a problémák merülnek fel, mint a hőregeneratív eljárásnál, azaz nagy mennyiségű ammónium-szulfid keletkezik. A salétromsavas és a foszforsavas regenerálásnál a műtrágyaként jobban értékesíthető ammónium-nitrát, illetve ammónium-foszfát végtermék keletkezik, viszont mindkét regenerálási mód lényegesen költségesebb.

5.9.6. Kénsavas abszorpció eljárások

A SO_2 vizes abszorpciója során képződött kénessav oxidációja kénsavvá már elég alacsony hőmérsékleten ($60-80^\circ\text{C}$) bekövetkezik, ha az oxidációs folyamatot katalitikusan is elősegítik. A leggyakrabban használt katalizátort, a Fe(III) -iont, célszerűen fer-

riszulfát alakban alkalmazzák. Ugyancsak jó katalizátor hatásúak a Mn(II)-ionok is.

A Lurgi – Sulfacid-eljárás már régóta ismert, ipari gázokból származó kén-dioxid eltávolítására (kohászat, vegyipar).

Az előzetesen tisztított füstgázt a hűtőként ható koncentrátorban 60 – 70 °C-ra lehűtik, és a katalizátormasszát tartalmazó reaktorban a SO₂-t kénsavvá alakítják át.

A reaktortöltet folyamatos vízzel történő permetezésével 10 – 20%-os kénsavat kapnak. Ezt a híg savat végül a koncentrátorban hűtésre használják, ennek során a híg sav koncentrációja növekszik. 150 – 200 °C-os gázhőmérsékletek esetén 60 – 75%-os H₂SO₄-koncentrációt lehet elérni. A berendezésben az áramlási ellenállás 150 – 200 mm. v. o. A kéntelenítés foka 90% feletti.

5.9.7. Karbonátolvadékos abszorpció

A vizes abszorpciós módszerek alkalmazása az erőművek hőgazdálkodása szempontjából kedvezőtlen. Ezért a North American Rockwell Atomics International részlege olvasztott karbonátos módszerrel javasolt a SO₂ eltávolításához, illetve hidrogén-szulfiddá történő átalakításához, amelyből Claus-berendezésben közvetlenül kén nyerhető ki.

Az eljárás lítium-, nátrium- és kálium-karbonátok elegyének a füstgázban lévő SO₂-dal való kb. 430 °C hőmérsékletű abszorpcióján alapul. A füstgázt mindenekelőtt nagy hőmérsékletű elektrosztatikus leválasztó és mechanikus portalanító segítségével igen alaposan meg kell tisztítani. Ezt követően a nagy hőmérsékletű abszorberben a SO₂ primer szulfitok és szulfátok képződése közben elnyelődik. Ezt követően vízgázreakció segítségével — amelyet petrokokszból és vízgőz befúvatásával nyernek — a szén-monoxid és a hidrogén a szulfitokat szulfidokká, illetve kénhidrogénné redukálja, egyidejűleg az olvadékot karbonáttá regenerálja.

A rendszer problémája, bonyolultsága mellett, hogy magas hőmérsékletű elektrosztatikus porleválasztást is igényel. Ennek üzemi alkalmazása még nem megoldott.

5.9.8. Kéntelenítés harmatpont feletti hőmérsékleten ammóniával

A harmatpont feletti — ammóniagázzal történő — füstgáz-kéntelenítés lehetőségei már több mint 50 éve ismeretesek. 1929 óta használnak olyan eljárást, amely gázfázisban termel ammónium-szulfátot. Az eljárás a kén-dioxidot előbb oxidálja, és csak ezután ad a gázelegyhez ammóniát, így nem illékony ammónium-szulfátot kap, amely ciklonban vagy elektrosztatikus szűrőben könnyen leválasztható. A kén-dioxid oxidációja ionizált levegőoxigénnel és ózonnal történik, amelyet úgy nyernek, hogy a füstgázt ívfényen vezetik keresztül.

Az ívfény hőmérsékletén az ionos oxigén és ózon oxidáló hatása igen jelentős, mivel az oxidáció sebessége igen nagy.

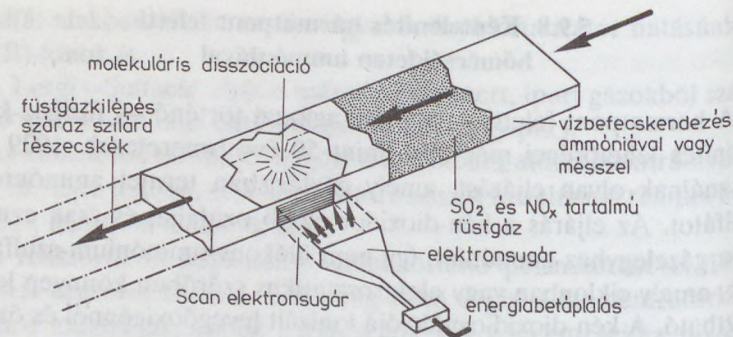
5.9.9. Kén-dioxid és nitrogén-oxid egyidejű eltávolítása füstgázokból elektronbesugárással

A japán Atomenergia Kutató Intézet és a japán Ebara Manufacturing Co. együttesen dolgozott ki eljárást nehézelégetésekor keletkező füstgázokból a SO_2 és a NO_x egyidejűleg történő eltávolítására, elektronbesugárzás útján.

Az eljárás folyamatábráját az 5.22. ábra tünteti fel. A megvalósított kísérleti berendezésben az elektronnyaláb-gyorsító max. 3 MeV energiával és 5mA áramerősséggel volt üzemeltethető. A besugárzóhelyiségben a besugárzótartály be- és kimenő csővezetékéből 2-2 gázanalizátor-készülék folyamatosan vett mintákat a SO_2 - és a NO_x -eltávolítás mérvének megállapítására.

A kísérletek eredményei az alábbiak voltak:

- A besugárzott tartályon átáramoltatott füstgáz kezdeti kén-tartalmának jellemző értékei a következők voltak: 1000 ppm SO_2 és 80–150 ppm NO_x . A füstgázt 10 m³/h sebességgel cirkuláltatták, miközben 2 MeV és 2 mA energiájú elektron-sugárral besugárzásnak vetették alá. A SO_2 90%-át, a NO_x -nak csaknem 100%-át sikerült a füstgázból eltávolítani. Azt



5.22. ábra. Kén-oxidok és nitrogén-oxidok csökkentése elektronbesugárással [31]

találták, hogy a besugárzás viszonyainak változtatásával még nagyobb kéntelenítési fok érhető el.

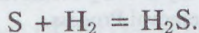
- A SO_2 és a NO_x eltávolításakor aeroszol képződik, mely — mint szilárd anyag — a gázból elektrosztatikus szűrő útján leválasztható.
- Mivel az eljárás száraz eljárás, szennyvíz-eltávolítási problémák nem merülnek fel.
- Megközelítő költségszámítások azt mutatták, hogy a kísérlet költségei sokkal nagyobbak, mint a szokványos füstgáz-kéntelenítő eljárásoké. De ha tekintetbe vesszük, hogy a SO_2 -dal egyidejűleg a NO_x is eltávolítható, akkor az eljárás előnyösnek mutatkozik.
- Az eljárás költségeiben kompromisszumos megoldás adódhat, ha megelégszünk 10%-nál kisebb kéntelenítési fokkal.

5.9.10. A szén kéntelenítése gőz-metán keverékkel

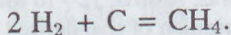
Az eljárás laboratóriumi körülmények közötti állapotban van. Alacsony hőmérsékletű pirolízis és gőz-metán keverék a folyamat lényege. A kARBONT vízgőzzel reagáltatva H_2 és CO keletkezik:



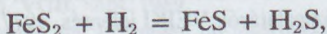
A hidrogén a kénnel reakcióba lépve hidrogén-szulfid keletkezik:



A karbonnak a hidrogén általi elgázosításával metán nyerhető:

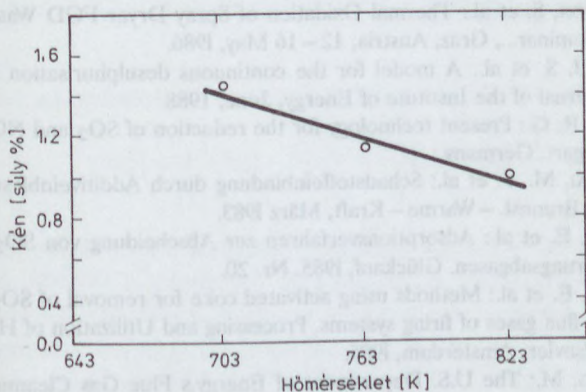


A karbon-vízgőz reakció eredményeként keletkezett hidrogén a hamuban lévő kénvegyületekkel a következő reakciókba lép:



A reakció a hőmérséklettől, a reakcióidőtől, a vízgőz és a metán parciális nyomásának arányától függ.

A hőmérsékletfüggést az 5.23. ábra mutatja.



5.23. ábra. A gőz-metán keverékkel való kéntelenítési reakció függése a hőmérséklettől [4]

Irodalom az 5. fejezethez

1. Mitsubishi: Dry Selective Catalytic NO_x Removal System.
2. The Tampilia LIFAC SO₂ Removal Process.
3. HAMALA, S.—KENNAKALA, T.: A new limestone injection system for flue gas desulphurization. Fourth Seminar on the Control of Sulphur and Nitrogen Oxide from Stationary Sources. Graz, Austria, 12—16 May, 1986.
4. ALAM, M. et al.: Desulphurization of coal-derived char using mixtures of steam and methane, Fuel, November 1988.
5. DÉR Á. B. et al.: Hőerőművek által okozott kénszennyezés csökkentésének műszaki lehetőségei. VEIKI Report, 11.97-O93-2. 1977. December.
6. SZABOLCS G.—VÖRÖS L.: Széntüzelésű erőművek által okozott kén-dioxid-emisszió és a kénlekötés vizsgálatáról. VEIKI jelentés, 1977.
7. HITACHI: Environmental Control Equipment for Thermal Power Plants.
8. Lurgi Express Information: Circulating Fluid Bed Combustion.
9. RÜCKERT, H.: Berechnungssystem Rauchgasentschwefelung mit Calcium-additiven für Staub-, Rost- und Wirbelschichtfeuerung. Teil 1, 2, 3. Mitt. a. d. KAB, 1989, 2. 1990. 2.
10. SEATON, P.: Reduction of sulphur and Nitrogen oxide emissions from Fluidized bed Boilers by Control of Combustion Conditions. Fourth Seminar..., Graz, Austria, 12—16. May, 1986.
11. VOGT, M.: Dampferzeuger mit integrierter Wirbelschichtfeuerung in einem Industriekraftwerk. VGB Kraftwerkstechnik, Mai, 1986.
12. WAAGNER-BIRÓ, A. G.: Wirbelschichtfeuerung.
13. HULSBOSH, J. G.: Energy for Coal Mine Refuse in a FBC. The 8th I. C. on Coal Research, Tokyo, Japan, 16—20. Oct., 1988.
14. BENGSTON, S. et al.: Thermal Oxidation of Spray Dryer FGD Waste Product. Fourth Seminar..., Graz, Austria, 12—16 May, 1986.
15. DENNIS, J. S. et al.: A model for the continuous desulphurisation of fluidized bed... Journal of the Institute of Energy, June, 1988.
16. HEIN, K. R. G.: Present technology for the reduction of SO₂ and NO_x. University Stuttgart, Germany.
17. CHUGHTAI, M. Y. et al.: Schadstoffeinbindung durch Additiveinblasung um die Flamme. Brennst. — Wärme — Kraft, März 1983.
18. RICHTER, E. et al.: Adsorptionsverfahren zur Abscheidung von SO₂ und NO_x aus Feuerungsabgasen. Glückauf, 1985. Nr. 20.
19. RICHTER, E. et al.: Methods using activated coke for removal of SO₂ and NO_x from the flue gases of firing systems. Processing and Utilization of High sulphur Coals. Elsevier, Amsterdam, 1985.
20. PERLSWIG, M.: The U.S. Department of Energy's Flue Gas Cleanup Research and Development Program. Fourth Seminar..., Graz, Austria, 12—16 May, 1986.
21. WAHE, D. J. et al.: Erfahrungen mit der Rauchgasentschwefelung nach dem Wellman-Lord-Verfahren. VGB, Januar 1990.

22. WAHL, D. J.: Rauchgasentschwefelung der Braunkohlenkraftwerke Buschhaus und Ofleben C. Betriebserfahrungen REA.
23. HACKL, A.: Desulphurization of industrial sources. Fourth Seminar..., Graz, Austria, 12–16 May, 1986.
24. General Electric Szimpózium: GE IFO füstgáz-kéntelenítési folyamat. Budapest, 1989. IX. 12.
25. CHUGHTAI, Y.: In Furnace Injection of Additives for SO₂ Reduction. Fourth Seminar..., Graz, Austria, 12–16 May, 1986.
26. Shell Briefing Service: Coal and the Environment, 1991. No. 1.
27. Mitsubishi: Wet flue gas desulphurization system. Tokyo, Japan.
28. EVT: Flue Gas Desulphurization Plants. EVT, Stuttgart.
29. KNOSPE, J.: Erfahrungen aus Betrieb und Instandhaltung von Rauchgasentschwefungsanlagen. VGB, Sept. 1989.
30. WIEHN, H. et al.: Trends und Lösungen im internationalen Dampferzeugerbau. VGB, Dezember 1985.
31. U.S. Department of Energy: Clean coal technology. Washington, 1989. 1991.
32. MOZES, M. S. et al.: Ontario Hydro's SONO_x Process for controlling acid gas emissions. Energy and Environment Conference, Prague, 20–23. April, 1992.
33. LEVESTÉK, D. F.: Sorbent injection technologies for SO_x emission control. Energy and Environment Conference, Prague, 20–23. April, 1992.
34. DALTON, S. M. et al.: Evolution of fluegas desulfuration design recent changes in the U.S.A. Energy and Environment Conference, Prague, 20–23. April, 1992.
35. BRENDOW, K. et al.: Peat and forest biomass as an energy source Finnish Experience. Finnish Min. of Trade and Ind. and Techn. Res. Centr. of Finland, Helsinki, 1988.

6. A NITRÓGÉN-OXIDOK KELETKEZÉSE ÉS A CSÖKKENTÉSI LEHETŐSÉGEK

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, és pedig az erőművekből emittált nitrogén-oxidokból körülbelül 95% NO és 5% NO₂.

6.1. A nitrogén-oxidok keletkezésének mechanizmusai

A jelenlegi ismeretek szerint három különböző mechanizmus létezik:

- a "termikus NO",
- a "prompt NO",
- a "tüzelőanyag-NO"

mechanizmusa.

A termikus NO a nitrogénmolekulákból a Zeldovich-mechanizmus szerint képződik. Az átalakulás körülbelül 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 [5].

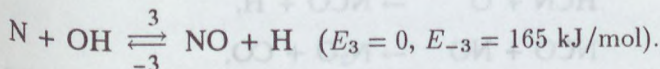
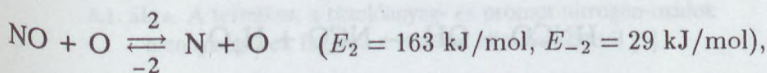
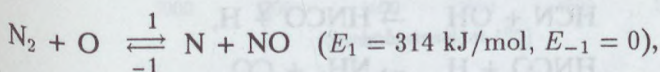
A tüzelőanyag-NO a nitrogén részleges oxidációjaként organi-

kus formában képződik a tüzelőanyagban. Mind az illóban, mind a koksztmaradékban megtalálható. A koksztmaradékban lévő nitrogén átalakulhat NO-dá és N₂-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.

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

6.1.1. A termikus NO_x

A termikus NO_x forrása az égési levegő nitrogénje. A reakció a Zeldovich-mechanizmusnak megfelelően írható le:



Közelítő számításokhoz használható képlet:

$$[\text{NO}] = K_1 \exp(-K_2/T) [\text{N}_2][\text{O}_2]^{1/2} t,$$

ahol

[] molfrakció,

K₁, K₂ állandók, földgázra:

$$K_1 = 5,74 \cdot 10^{14} \text{ J/mol}, \quad K_2 = 6747,65 \text{ K},$$

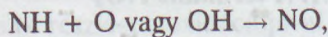
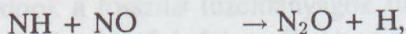
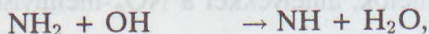
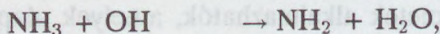
T a hőmérséklet,

t a tartózkodási idő.

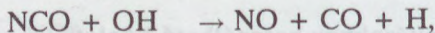
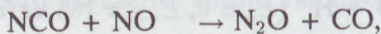
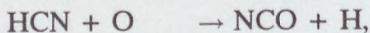
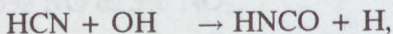
A csökkentést tehát alacsony nitrogén- és oxigénkoncentrációval, a hőmérséklet csökkentésével és a tartózkodási idő csökkentésével lehet elérni.

6.1.2. A tüzelőanyag- NO_x főbb egyenletei

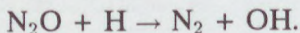
NH_3 reakciók:



HCN reakciók:

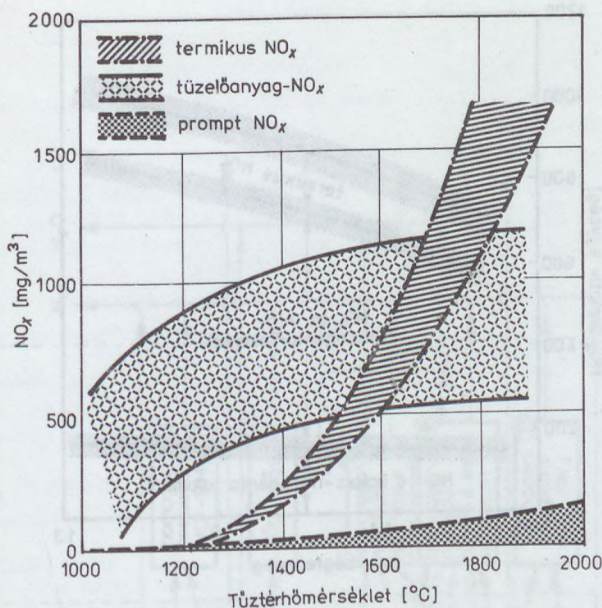


N_2O bomlás:



A tüzelőanyag-nitrogén szerepe elsősorban széntüzelésnél és néhez fűtőolajoknál jelentős. A belőle keletkező oxidok jelentős mértékben függenek a tüzelési feltételektől. A különböző módon keletkező nitrogén-oxidokat a 6.1. ábra mutatja.

A tüzeléseknél tehát döntő mértékben a termikus és a tüzelőanyag-nitrogén-oxid keletkezésével kell számolnunk. E két nitrogén-oxid mennyiségének megoszlását széntüzelés esetére szemlélteti a

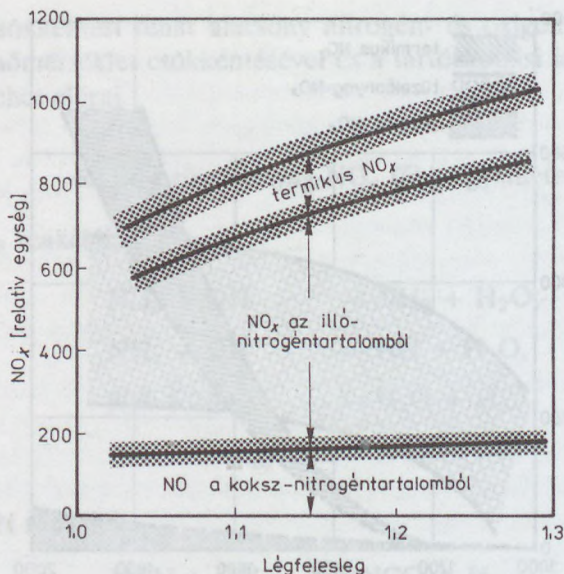


6.1. ábra. A termikus, a tüzelőanyag- és prompt nitrogén-oxidok mennyiségének függése a tüzelési hőmérséklettől [5]

6.2. ábra. Természetesen gáztüzelésnél a termikus nitrogén-oxid mennyisége jelentősen megnő. Különösen széntüzelésnél jelentős szerepe van a tüzelőanyag-nitrogén-oxidok keletkezésében a tüzeléstechnikai körülményeknek. A környezetszennyezés csökkentésének szempontjából tehát a tüzeléstechnika szerepe döntő. A lehetséges intézkedések megtételéhez — a keletkezési folyamatok áttekintésével — nyújt segítséget a 6.3. ábra [5], [6].

A NO , N_2O , HCN és NH_3 legfontosabb reakcióit fluidizációs tüzelésre a 6.1. táblázat tartalmazza.

A képződési folyamatokat tekintve különösen a CO szerepe látszik jelentősnek, az NH_3 -ból keletkező NO redukciója révén. Így az égési hőmérséklet növekedése nemcsak a levegőbeli nitrogénből keletkező NO_x képződését növeli, hanem a CO -koncentráció



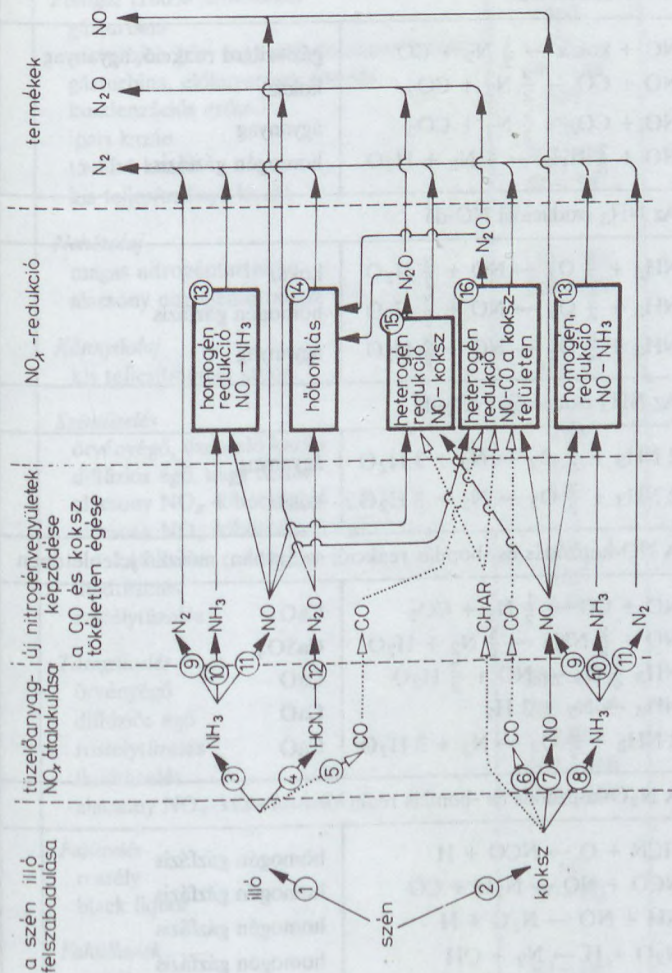
6.2. ábra. A termikus és a tüzelőanyag-nitrogén-oxidok mennyiségének függése a légfeleslegtől [5]

csökkenése révén növeli a tüzelőanyag-nitrogénből keletkező NO_x mennyiségét is.

A különböző tüzelési rendszereknél a jelenlegi technikai szintén jó tájékoztató értéket mutat be a 6.2. táblázat. Ez felhívja a figyelmet arra, hogy a nitrogén-oxidok mennyiségét jelentősen változtatni lehet a tüzelési móddal, illetve a tüzelési körülményekkel.

A nitrogén-oxidok mellett különös figyelmet érdemel még a tüzeléskor keletkező hidrogén-cianid és a N_2O , az ún. kéjgáz is. Ez utóbbi lehetséges forrásai:

- a koksznitrogén oxidációja N_2O -dá,
- a N reakciója a koksznitrogénnel,
- az illófelszabadulás, elgázosodás vagy a koksznitrogén gázfázisú reakciója.



6.3. ábra. A nitrogén-oxid-kezelés folyamatábrája [6]

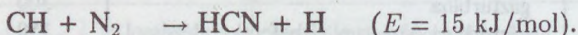
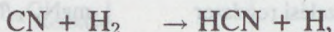
6.1. táblázat

Reakció	Katalizátor
A NO redukciója	
$\text{NO} + \text{koks} \rightarrow \frac{1}{2} \text{N}_2 + \text{CO}$	gáz-szilárd reakció, ágyanyag koks ágyanyag homogén gázfázis
$\text{NO} + \text{CO} \rightarrow \frac{1}{2} \text{N}_2 + \text{CO}_2$	
$\text{NO} + \text{CO} \rightarrow \frac{1}{2} \text{N}_2 + \text{CO}_2$	
$\text{NO} + \frac{2}{3} \text{NH}_3 \rightarrow \frac{5}{6} \text{N}_2 + \text{H}_2\text{O}$	
Az NH ₃ oxidációja NO-dá	
$\text{NH}_3 + \frac{5}{4} \text{O}_2 \rightarrow \text{NO} + \frac{3}{2} \text{H}_2\text{O}$	koks
$\text{NH}_3 + \frac{5}{4} \text{O}_2 \rightarrow \text{NO} + \frac{3}{2} \text{H}_2\text{O}$	homogén gázfázis
$\text{NH}_3 + \frac{5}{4} \text{O}_2 \rightarrow \text{NO} + \frac{3}{2} \text{H}_2\text{O}$	ágyanyag
Az NH ₃ oxidációja NO ₂ -dá	
$2 \text{NH}_3 + \frac{3}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{N}_2 + 3 \text{H}_2\text{O}$	ágyanyag
$2 \text{NH}_3 + \frac{3}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{N}_2 + 3 \text{H}_2\text{O}$	koks
A NO-képződés és -bomlás reakciói az ágyban, mészkő jelenlétében	
$\text{NO} + \text{CO} \rightarrow \frac{1}{2} \text{N}_2 + \text{CO}_2$	CaO
$\text{NO} + \frac{2}{3} \text{NH}_3 \rightarrow \frac{5}{6} \text{N}_2 + \text{H}_2\text{O}$	CaSO ₄
$\text{NH}_3 + \frac{5}{4} \text{O}_2 \rightarrow \text{NO} + \frac{3}{2} \text{H}_2\text{O}$	CaO
$\text{NH}_3 \rightarrow \text{N}_2 + 3 \text{H}_2$	CaO
$2 \text{NH}_3 + \frac{3}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{N}_2 + 3 \text{H}_2\text{O}$	CaO
A N ₂ O-képződés és -bomlás reakciói	
$\text{HCN} + \text{O} \rightarrow \text{NCO} + \text{H}$	homogén gázfázis
$\text{NCO} + \text{NO} \rightarrow \text{N}_2\text{O} + \text{CO}$	homogén gázfázis
$\text{NH} + \text{NO} \rightarrow \text{N}_2\text{O} + \text{H}$	homogén gázfázis
$\text{N}_2\text{O} + \text{H} \rightarrow \text{N}_2 + \text{OH}$	homogén gázfázis
$2 \text{NO} + \text{koks} \rightarrow \text{N}_2\text{O}$	gáz-szilárd reakció
$\text{koks} + \text{N} + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{N}_2\text{O}$	gáz-szilárd reakció
$\text{illó N} + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{N}_2\text{O}$	koks

6.2. táblázat

Tüzelőanyag/tüzelési rendszer	mgNO _x /MJ
<i>Földgáz (100% terhelésnél)</i>	
gázturbina	300
gázturbina gőz- vagy vízbefecskendézéssel	150
gázturbina, előkeveréses tüzelés	60 – 100
kondenzációs erőmű	260
ipari kazán	150
távfűtő kazán	50 – 100
kis teljesítményű kazán	30 – 50
<i>Nehézolaj</i>	
magas nitrogéntartalom	150 – 300
alacsony nitrogéntartalom	100 – 200
<i>Könnyűolaj</i>	
kis teljesítményű kazán	50 – 70
<i>Széntüzelés</i>	
örvényégő, üzemelő kazán	450
diffúziós égő, nagy tűztér	230
alacsony NO _x -kibocsátású égő	140
alacsony NO _x -kibocsátású égő	
+ katalitikus redukció	60
fluidtüzelés	115
rostélytüzelés	150
<i>Tőzegtüzelés</i>	
örvényégő	200 – 300
diffúziós égő	200 – 400
rostélytüzelés	200
fluidtüzelés	100 – 160
alacsony NO _x -kibocsátású égő	130 – 160
<i>Fatüzelés</i>	
rostély	60
black liquor	50 – 80
<i>Fahulladék</i>	
rostély	80 – 100

A hidrogén-cianid reakciói:



A hibrid fluidtüzelés a kazánszintben több magasságban elhelyezett szénadagolással a N_2O képződési mechanizmusába úgy avatkozik be, hogy annak elbomlása a normál cirkulációs fluidtüzeléshez képest lényegesen nagyobb mértékben megtörténjék.

6.1.3. A prompt NO_x

A prompt NO_x keletkezésében a lángfrontnak a szerepe jelentős, és elsősorban a tüzelőanyag-nitrogén-oxid mechanizmus mellékterméke [16].

6.2. A keletkező nitrogén-oxidok mennyiségének csökkentése

A tüzeléskor keletkező nitrogén-oxidok mennyiségének csökkentésére számos lehetőség áll rendelkezésre. Erre vonatkozólag a tüzelési folyamat és a reakcióegyenletek adnak jó támpontot. A fizikai kémiai paraméterek közül a legfontosabbak, amelyekkel befolyásolni tudjuk a NO_x -képződés folyamatát, a következők:

- léglelesleg-tényező:
 - a teljes oxigénmennyiség csökkentése,
 - a helyi oxigénmennyiség szabályozása.
- hőmérséklet:
 - a csúcsértékek csökkentése,

- az átlagértékek csökkentése,
- a gradiens változtatása.
- nitrogén-oxid-redukálás:
 - a képződési feltételek változtatása,
 - ellenhatások képzése.

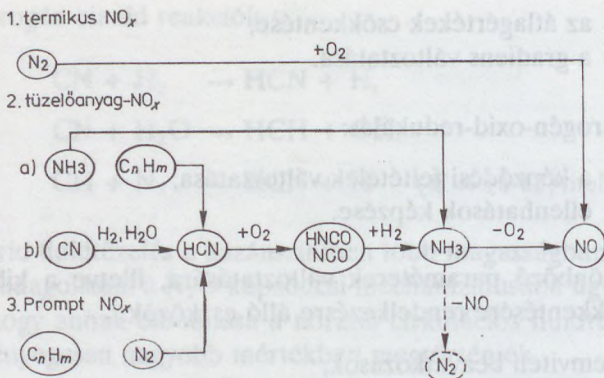
A különböző paraméterek változtatására, illetve a kibocsátott NO_x csökkentésére rendelkezésre álló eszközök:

- üzemviteli beavatkozások,
- konstrukciós lehetőségek,
- leválasztás.

A továbbiakban az utóbbi három csoport kerül részletesebb tárgyalásra.

6.3. Üzemviteli lehetőségek a NO_x -emisszió csökkentésére

A szénpor finomórlése nemcsak a kiégésre hat kedvezően, hanem a szénpor gyors pirolízisét is segíti. A kigázosodás gyorsabban megy végbe, és az illó és kokszt égése párhuzamosan megkezdődik. A gyors oxigénigény következménye a NO_x -emisszió csökkenése a nem sztöchiometrikus égés NO_x -bomlást segítő hatása miatt. Az eredményt a 6.4. ábra mutatja. A folyamat kezdetén a gyulladás után az intenzívebb égés a finomfrakciók esetén kezdetben nagyobb NO_x -képződést eredményez. A finomórlemény gyorsabb oxigénfelhasználása miatt több NH_2 radikál keletkezik. Ezután a NO_x bomlása is nagyobb mérvű, mint a durvább őrlemény égésekor. Ennek eredményeként, ellentétben az első pillanatban vártakkal, a finom őrlemény tüzelésekor az éghetőveszteségek csökkenése mellett a NO_x -emisszió csökkenése is bekövetkezik [16]. Természetesen az őrlemény finomságának egyéb befolyása is van, pl. növeli a salakosodási veszélyt.



6.4. ábra. A legfontosabb NO_x-képződési reakciók [16]

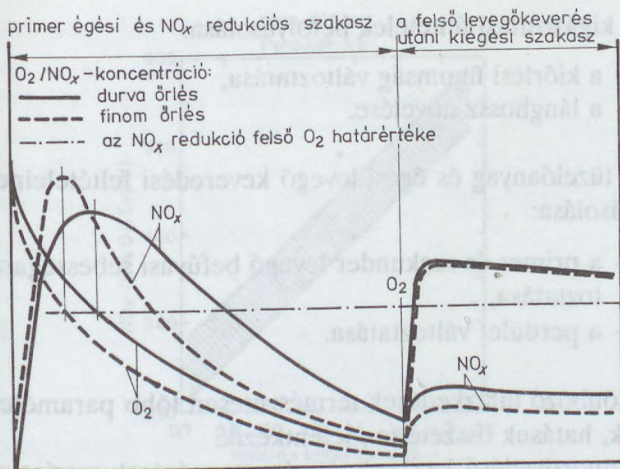
A NO_x-emisszió csökkentésének üzemviteli lehetőségei tehát:

- a légfeslegtényező beállítása,
- az égőperdület változtatása,
- az őrlési finomság beállítása,
- a primer és szekunder levegő sebességének és arányának beállítása,
- a tüztéri égéseloszlás szabályozása.

Az átalakulás foka a nitrogéntartalom növekedésével csökken. A késleltetett égési levegő-tüzelőanyag keveréssel csökkenteni lehet az ezúton keletkező NO_x mennyiségét (6.5. ábra) [5].

A nitrogén-oxid-csökkentés lehetőségeit felmérve elsősorban az égési levegő nitrogénjéből és a tüzelőanyag-nitrogénből keletkezőre kell tekintettel lenni, a prompt NO_x keletkezése az ipari tüzeléseknél alárendelt szerepet játszik. Ennek megfelelően a következő lehetőségek állnak rendelkezésre:

- Az égési hőmérséklet csökkentése:
 - a tüzelőanyag-fűtőérték csökkentése,
 - léghiányos tüzelés,



6.5. ábra. A késleltetett égésilevegő-bekeverés hatása a nitrogén-oxidok mennyiségére [5]

- az égési levegő-előmelegítési hőmérséklet csökkentése,
- a hőelvonás növelése,
- füstgáz-recirkuláció.
- Az oxigénkoncentráció szabályozása:
 - az oxigénkoncentráció-csökkentés füstgáz-recirkulációval,
 - a léghéleslegtényező csökkentése,
 - fokozatos égést biztosító égő,
 - fokozatos égés biztosítása a tűztérben,
 - fokozatos tüzelőanyag-adagolás.
- A magas hőmérsékletű zónában a tartózkodási idő csökkentése:
 - égőkonstrukcióval,
 - a láng szétoztásával.

— A kigázósítási feltételek befolyásolása:

- a kiörlési finomság változtatása,
- a lánghossz növelése.

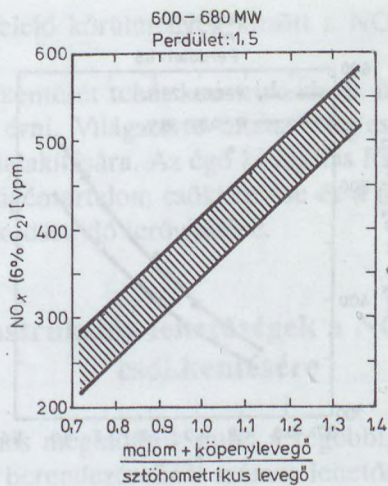
— A tüzelőanyag és égési levegő keveredési feltételeinek befolyásolása:

- a primer és szekunder levegő befúvási sebességarány változtatása,
- a perdület változtatása.

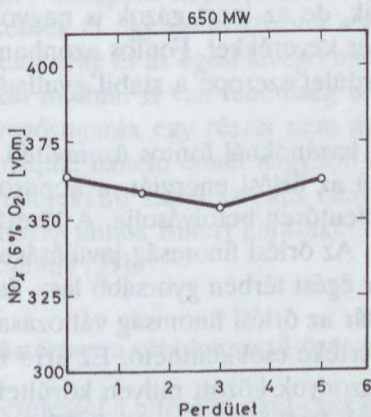
A különböző intézkedések természetesen több paramétert befolyásolnak, hatásuk összetetten jelentkezik.

A szénportüzelésű kazánoknál végzett mérések szerint a kazán-terhelés változásával a NO_x -emisszió közel lineárisan változik. A tüzelőanyag nitrogéntartalmának átalakulása a nitrogéntartalom növekedéssel részarányában kissé csökken, de a szénfajtának, az illótartalomnak is szerepe van. Az átalakulás változását a 6.3. ábrán láthattuk. A légfelesleg-tényező befolyása is általánosan ismert. A légfelesleget azonban nem elegendő az átlagos értékével figyelembe venni, hanem az égési folyamat során történő változásának hatása is jelentős. Szerepe elsősorban a primer égési zónában rendkívül nagy. Egy 700 MW-os blokkon közel állandó 660–680 MW terhelésen végzett mérések eredményei láthatók a 6.6. ábrán. Az abszcisszán a malomból és a köpenylevegőből a primer zónába jutó levegőmennyiség értékének a sztöchiometrikus mennyiséghez való viszonya szerepel. A köpenylevegő perdülete 1,5 volt. A különböző primer légfeleslegeknél változtatták a tűztéri légfelesleg-tényező értékét. Az a rendkívül fontos megállapítás adódott, hogy alapvető szerepe a légfelesleg-tényezőnek a primer égési zónában van, és a NO_x -képződés gyakorlatilag már független a tűztéri légfelesleg-tényezőtől.

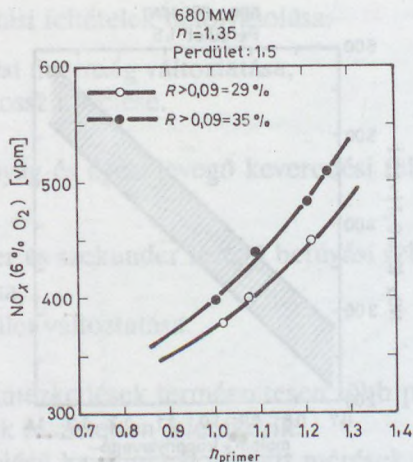
A tüzelőberendezés kialakítása szempontjából további fontos paraméter az égő köpenylevegőjének perdülete. A kísérletek eredményeit a 6.7. ábra mutatja. A keletkező NO_x mennyiségére a perdületnek kis hatása van, ami azzal magyarázható, hogy bár a köpeny-



6.6. ábra. A primer levegő hatása a keletkezett NO_x mennyiségre [9]



6.7. ábra. Az égőperdület hatása a keletkezett NO_x mennyiségre [9]



6.8. ábra. Az őrlési finomság hatása a keletkezett NO_x mennyiségre [9]

levegő perdületének növekedésével az égési levegő bekeveredése jelentősen növekszik, de az inert gázok is nagyobb mennyiségben keverednek a primer keverékkel. Fontos azonban figyelemmel lenni arra, hogy a perdület szerepe a stabil gyulladás szempontjából alapvető [9].

Szénportüzelésű kazánoknál fontos üzemviteli paraméter az őrlési finomság, mivel az őrlési energiát, a kopásokat, a gyulladást, salakosodást stb. jelentősen befolyásolja. A kísérletek eredményeit a 6.8. ábra mutatja. Az őrlési finomság javulásával az égési reakció különösen a primer égési térben gyorsabb lesz, és az effektív légfelesleg lecsökken. Bár az őrlési finomság változása nem jelentős, de javításával a NO_x értéke csökkenthető. Ez arra is rámutat, hogy a valóságos üzemi viszonyok között milyen körültekintően kell a különböző paraméterek értékelésével eljárni. Első pillanatra az őrlési finomság romlásától az égés elnyújtásának és a helyi hőmérséklet csökkenésének hatásaként a NO_x csökkenését várnánk. Tehát nem mindegy, hogy a különböző paraméterek változtatását miként érjük el. Az őrlési finomság növelése növeli a tüzelés stabilitását, de

láthatóan megfelelő körülmények között a NO_x csökkenéséhez is vezethet.

A NO_x csökkentését tehát konstrukciós és üzemviteli eszközökkel is el lehet érni. Világszerte intenzív fejlesztés folyik a NO_x -szegény égők kialakítására. Az égő kialakítás fő szempontja a reakcióterben az oxigéntartalom csökkentése és a magas hőmérsékletű terben a tartózkodási idő lerövidítése.

6.4. Konstrukciós lehetőségek a NO_x -emisszió csökkentésére

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

6.4.1. Saroktüzelés

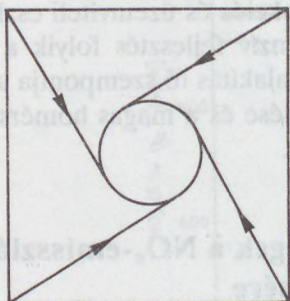
A korábbi saroktüzeléseket úgy alakították ki, hogy az égők tengelyei egy a tüztér közepére képzelt kb. 1 m átmérőjű kör érintőjeként helyezkedtek el. Így üzem közben a tüztérben egy örvény képződött, a tüzelőanyag és az égési levegő mielőbbi, jó keveredése mellett. E tüzelési módnál is van lehetőség 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 léghianyos zónát létrehozva ennek ismert hatásaként a NO_x csökkenését lehet elérni (6.9. ábra) [31].

6.4.2. A tüztérben a többfokozatú égés megvalósítása

A tüztéri tűzvezetéssel a nitrogén-oxid-csökkentés különböző paraméterei közül a következők befolyásolhatók:

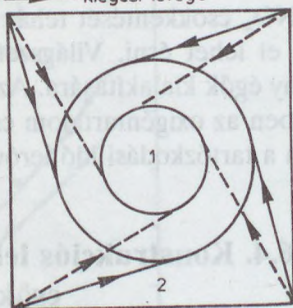
- az átlagos oxigénmennyiség csökkentése,
- a helyi oxigénfelhasználás dinamikája,

→ minden sarokban
tüzelőanyag- és
levegőbefúvás van



a)

→ tüzelőanyag-
gazdag áram
→ kiégési levegő



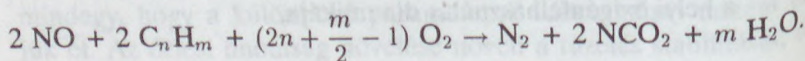
b)

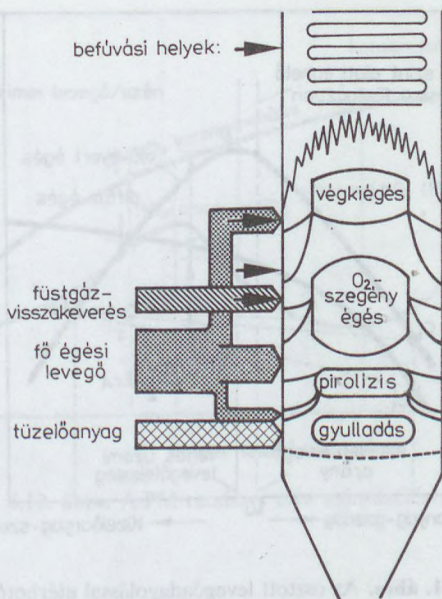
6.9. ábra. NO_x-csökkentő tüzelési rendszer saroktüzelésnél [31]:
a) hagyományos, b) továbbfejlesztett

- fokozatos oxigénadagolás,
- az átlagos hőmérséklet csökkentése,
- a hőmérsékletcsúcsok csökkentése,
- a NO_x-képződést csökkentő kémiai elemek keletkezése,
- a NO_x-képződést csökkentő gázkörnyezet létrehozása.

E feltételek megteremtését biztosítja a 6.10. ábrán látható tüzelési elrendezés. E rendszerekben az égés főbb szakaszai: gyulladás, pirolízis (az illó nitrogénvegyületek felszabadulásával). Az oxigén-szegény környezetben alacsony NO_x-képződés mellett folyik a pirolízist követő égés. Ezt azonban még a megfelelő kiégést biztosító szakasz kell kövesse [30]. Az égési levegő adagolása megválasztásának azonban a szénfajta égési tulajdonsága is korlátot szab.

A tűztéri NO_x csökkentésére számos változatot dolgoztak ki. A rendszer fejlődését és lényegét igen jól lehet követni az ún. MACT (Mitsubishi Advanced Combustion Technology) tüzelési rendszerben. A rendszert működtető alapreakció:



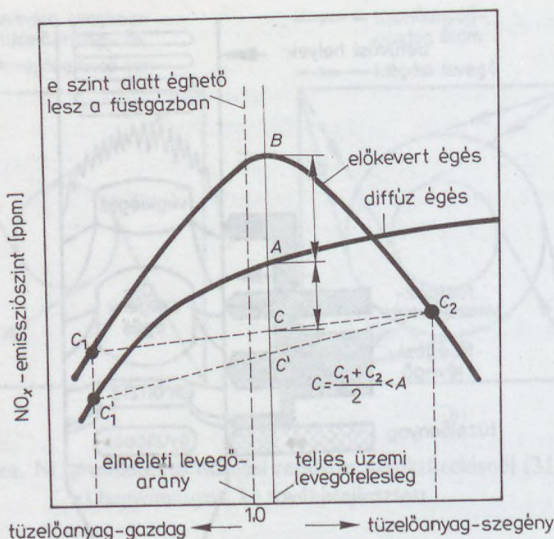


6.10. ábra. Többfokozatú égés az égésilevegő-adagolás megosztásával [30]

A rendszert szénre, olajra, gázra és COM tüzelőanyagra is kidolgozták. Nem szükséges adalékanyag-befűvás és katalizátor. Az elérhető NO_x -szintek:

gáz PM + MACT	10 – 20 ppm,
olaj PM + MACT	40 – 60 ppm,
szén PM + MACT	60 – 150 ppm.

Az égőrendszernek ún. PM égőt, alacsony NO_x -képződésű tüzelést biztosító égőt alkalmaznak, amelyet gázra, olajra és szénre is kifejlesztettek. Az alapvetően a tüzelőanyag – levegő keverék mértékének a NO_x -képződésre gyakorolt hatása képezi. Ennek megfelelően a tüzelőanyag – levegő áramot több részre bontják, és a különböző feltételek között történő égés eredményeként keletkező NO_x

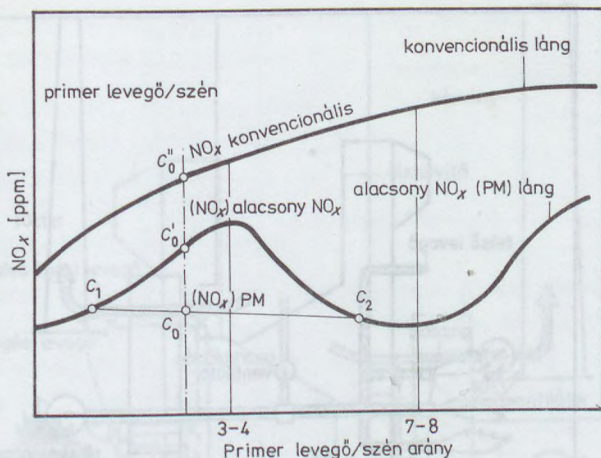


6.11. ábra. Az osztott levegőadagolással elérhető NO_x -csökkentés alapelve gáz- és olajtüzelésre [11]

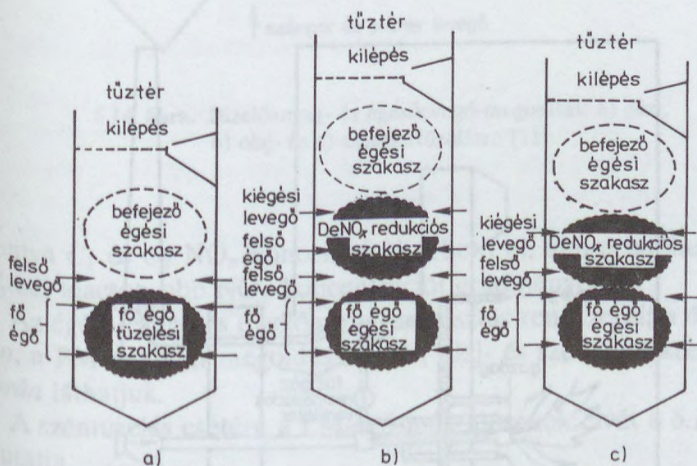
eredőben alacsonyabb kibocsátást biztosít, mint az egész keverék együttes égésekor keletkezne.

Az eredményt gáz- és olajtüzelésre a 6.11. ábra alapján érthetjük meg. Előkevert tüzelésnél az adott X légfeszlegetre a B pontnak megfelelő diffúz égővel az A pontnak megfelelő NO_x keletkezik. Ha a tüzelőanyag–levegő áramot tüzelőanyagban gazdag és szegény áramra osztjuk, úgy a C_1 és C_2 pontoknak megfelelő NO_x -képződéssel eredőben a C pontnak megfelelő NO_x keletkezik. Az eredő NO_x tehát a keverési aránynak megfelelően súlyozva alakul ki [11].

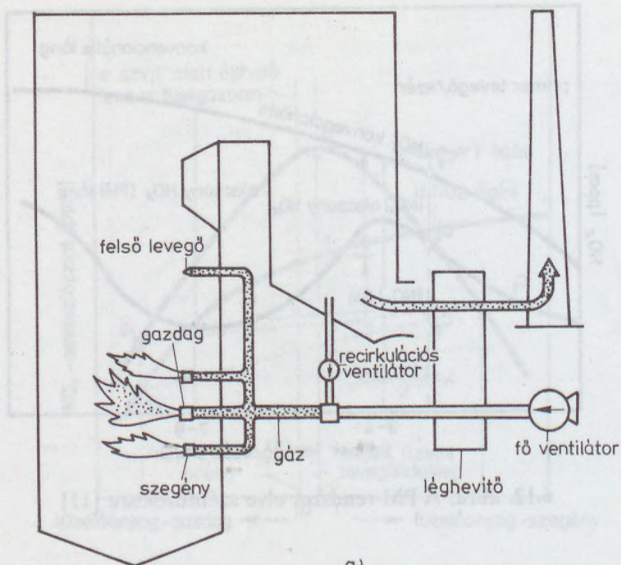
A PM-rendszer elvét széntüzelésre a 6.12. ábrán láthatjuk. Az adatok egy bizonyos szénfajtára adnak tájékoztató értékeket. Az adott primer levegő/szén aránynál üzemelő konvencionális égő C''_0 az alacsony NO_x -képződésű égő (PM) C'_0 mennyiségű NO_x értékkel üzemel. A tüzelőanyag-áramot itt is gazdag és szegény részre



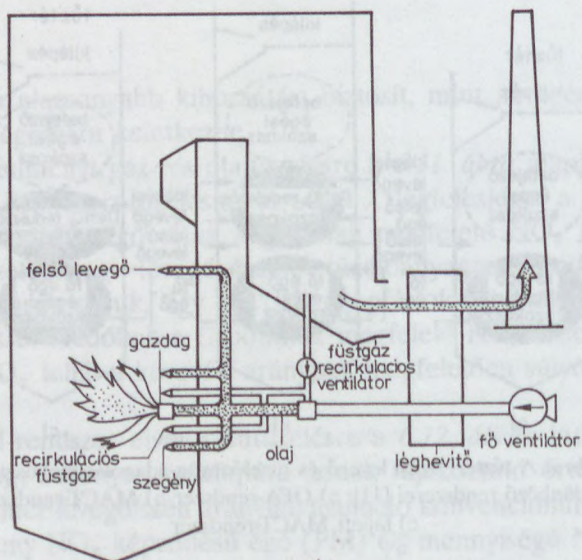
6.12. ábra. A PM-rendszer elve széntüzelésre [11]



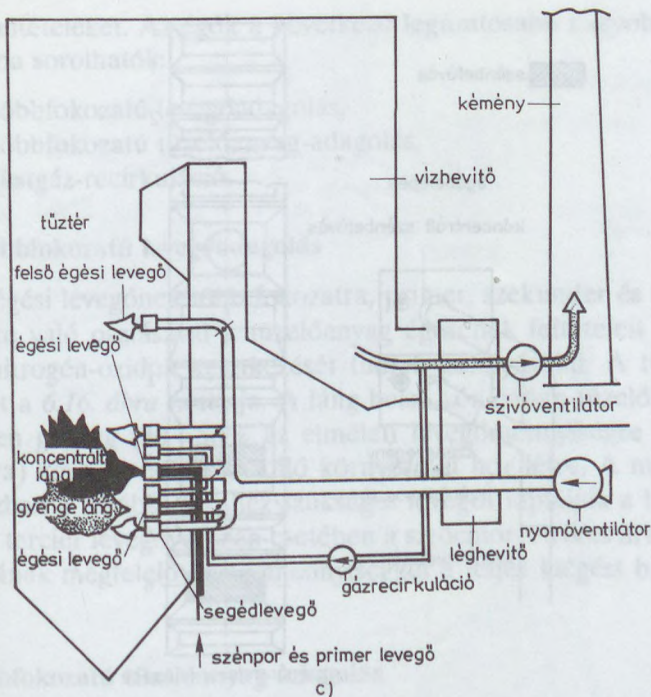
6.13. ábra. A tűztéri égési levegő és tüzelőanyag-adagolás megosztásának különböző rendszerei [11]: a) OFA-rendszer b) MACT-rendszer c) fejlett MACT-rendszer



a)



b)

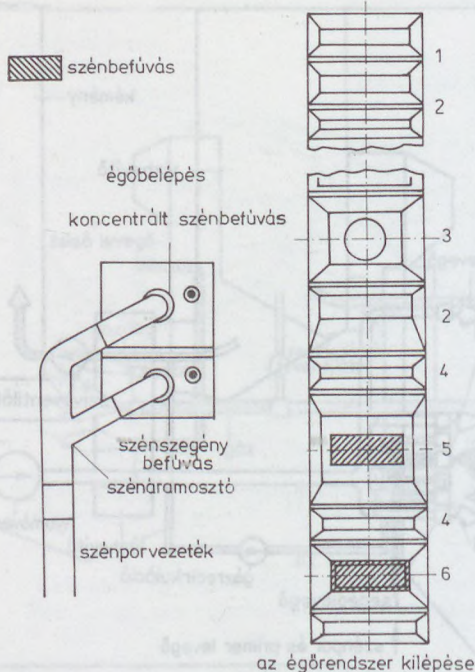


6.14. ábra. Tűzelőanyag- és égésilevegő-megosztás: a) gáz-,
b) olaj- és c) szénportűzelésre [11]

bontva C_1 és C_2 NO_x -koncentráció érhető el, ami eredőben C_0 , a C'_0 -nél alacsonyabb NO_x -koncentrációt eredményez.

Az égési levegő és tüzelőanyag-megosztás rendszereit a 6.13. ábrán, a PM-rendszer megoldásait gáz-, olaj- és széntűzelésre a 6.14. ábrán láthatjuk.

A széntűzelés esetére a PM-éű működésének elvét a 6.15. ábra mutatja.



6.15. ábra. A PM-égő alapelve szénportüzelésre
 1- felső levegő, 2- segédlevegő, 3- olaj,
 4- füstgáz-recirkuláció, 5- szénporban gazdag,
 6- szénporban szegény

6.4.3. Alacsony NO_x -képződésű égőkonstrukciók

Az égőknek a következő legfontosabb feltételeket kell kielégíteni:

- a tüzelőanyag gyulladását és a lángstabilitást,
- széles terhelési tartományban biztonságos működést,
- minimális éghetővesztéséget,
- 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.

A többfokozatú levegőadagolás

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 6.16. 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.

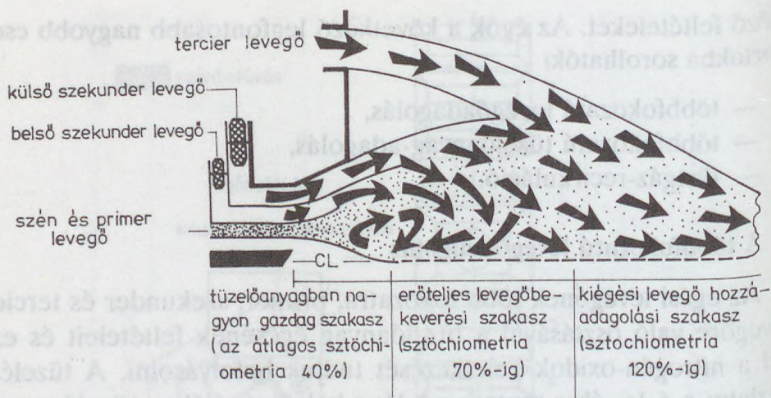
Többfokozatú tüzelőanyag-adagolás

Ezeknél az égőknél a levegőadagolás több fokozatra történő osztása mellett a tüzelőanyagot is több fokozatban táplálják a tüztérbe. A megoldás vázlatát a 6.17. ábra mutatja. Ezzel a megoldással az égési zónában a környezeti viszonyok jelentősen változtathatók, és jól megteremthetők az alacsony NO_x -képződés feltételei [11].

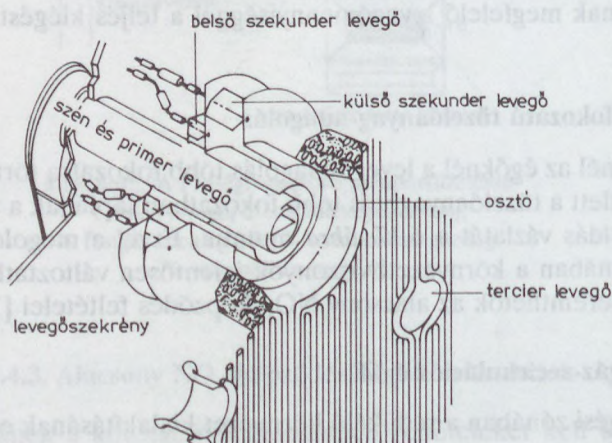
Füstgáz-recirkulációs égők

Az égési zónában a redukáló környezet kialakításának egyik eszköze közvetlen az égőn keresztül betáplált füstgáz-recirkuláció is lehet. Ezt a megoldást mutatja a 6.18. és 6.19. ábra. A központi nyíláson a primer levegő és tüzelőanyag kerül betáplálásra. A visszakevert füstgáz a szekunder és terciér levegővel kerül a tüztérbe.

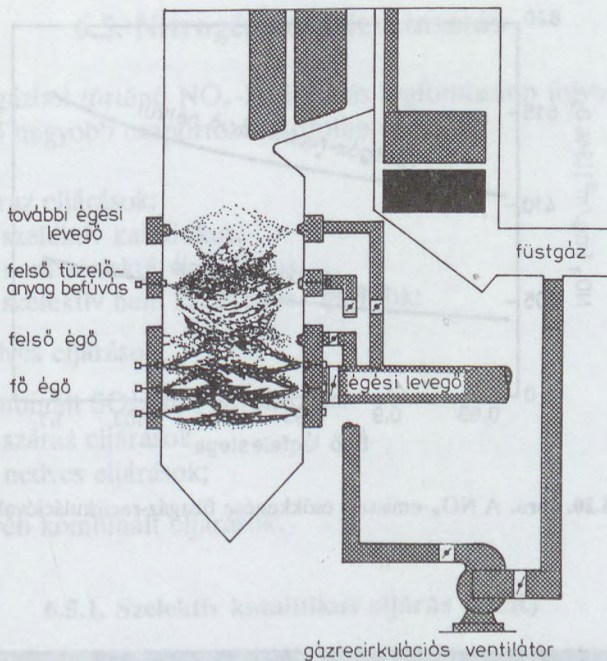
A füstgáz-recirkulációval elérhető NO_x -emisszió csökkenését a 6.20. ábra mutatja. A tüzeléssel elérhető NO_x -csökkentések összehasonlítását a 6.21. ábrán láthatjuk.



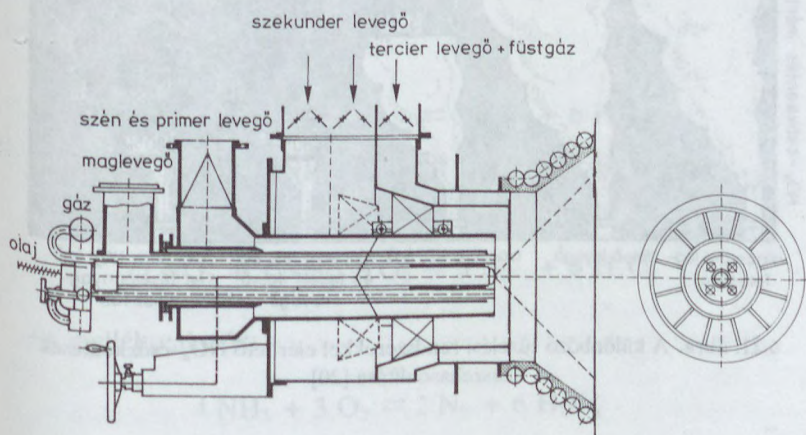
6.16. ábra. Az égési levegő több fokozatra történő osztása [11]



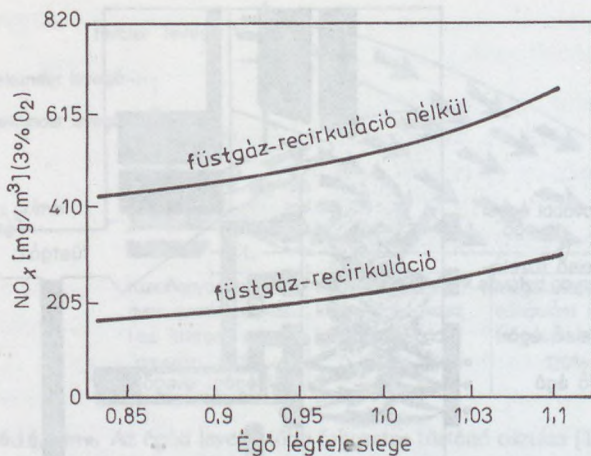
6.17. ábra. A tűzelőanyag több fokozatra való osztása [11]



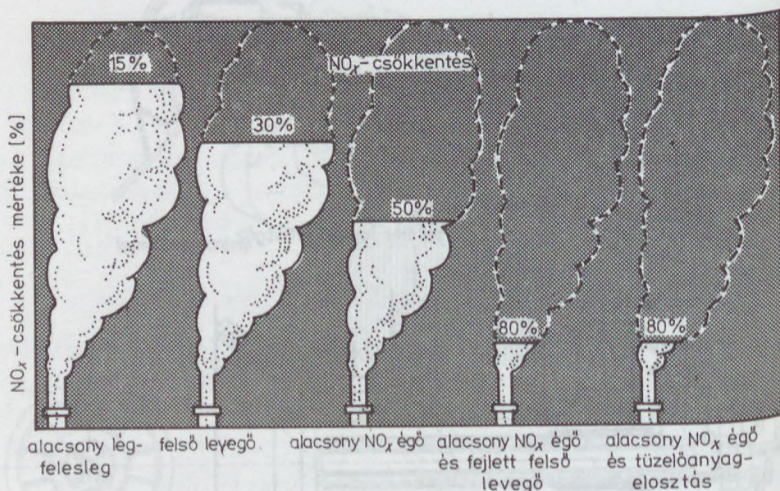
6.18. ábra. Füstgáz-recirkulációs tüzelési rendszer



6.19. ábra. Többfokozatú levegőadagolású égő



6.20. ábra. A NO_x-emisszió csökkenése füstgáz-recirkulációval



6.21. ábra. A különböző tüzelési rendszerekkel elérhető NO_x-csökkentések összehasonlítása [20]

6.5. Nitrogén-oxid-leválasztás

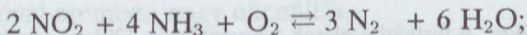
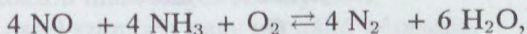
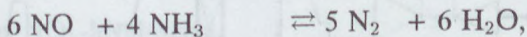
A füstgázból történő NO_x -leválasztás legfontosabb folyamatai a következő nagyobb csoportokba sorolhatók:

- száraz eljárások:
 - szelektív katalitikus,
 - nem szelektív katalitikus,
 - szelektív nem katalitikus eljárások;
- nedves eljárások;
- kombinált SO_x/NO_x -leválasztás:
 - száraz eljárások,
 - nedves eljárások;
- egyéb kombinált eljárások.

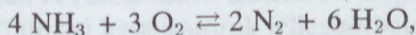
6.5.1. Szelektív katalitikus eljárás (SCR)

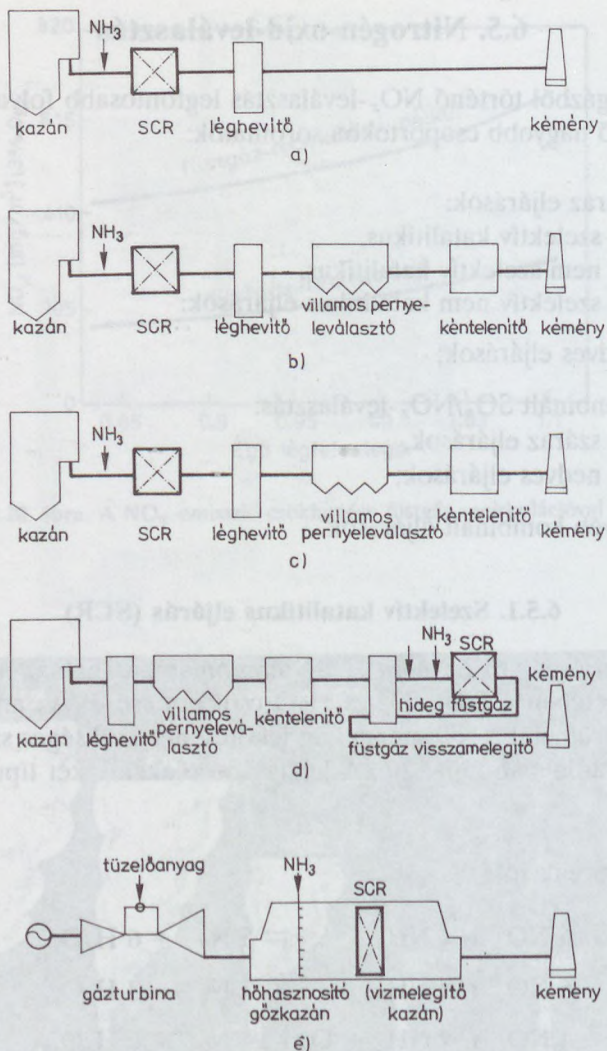
Az eljárásnál (6.22. ábra) [29] ammóniát használnak katalizátor jelenlétében a NO_x , N_2 és H_2O csökkentésére. Az ammóniát (NH_3) körülbelül a NO -mennyiség lekötéséhez szükséges sztöchiometrikus arányban fűjják be. A lejátszódó reakciók két típusba sorolhatók:

- alapreakciók:

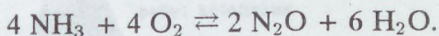
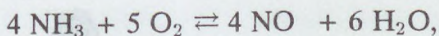


- mellékreakciók:





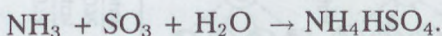
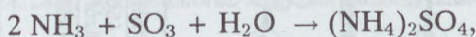
6.22. ábra. A füstgázkezelések folyamatábrája [29]: a) gáztüzelés, b) olajtüzelés, c) széntüzelés, nagy koncentrációs kazánrendszer, d) széntüzelés, alacsony koncentrációs kazánrendszer, e) gáz-gőz kombinált ciklus és cogenerációs rendszer



A folyamat 300–400 °C hőmérsékleten folyik le. A legfontosabb befolyásoló paraméterek:

- a reakció hőmérséklete,
- a katalizátor (típus, kémiai összetétel stb.),
- az NH_3/NO_x arány,
- a füstgáznak a katalizátoron való átáramlási körülményei (sebesség, út stb.).

A katalizátor segíti a SO_2 -nak SO_3 -dá való oxidációját, ami a harmatpont emelkedéséhez vezet, és ammónium-szulfát és -biszulfát képződéséhez:



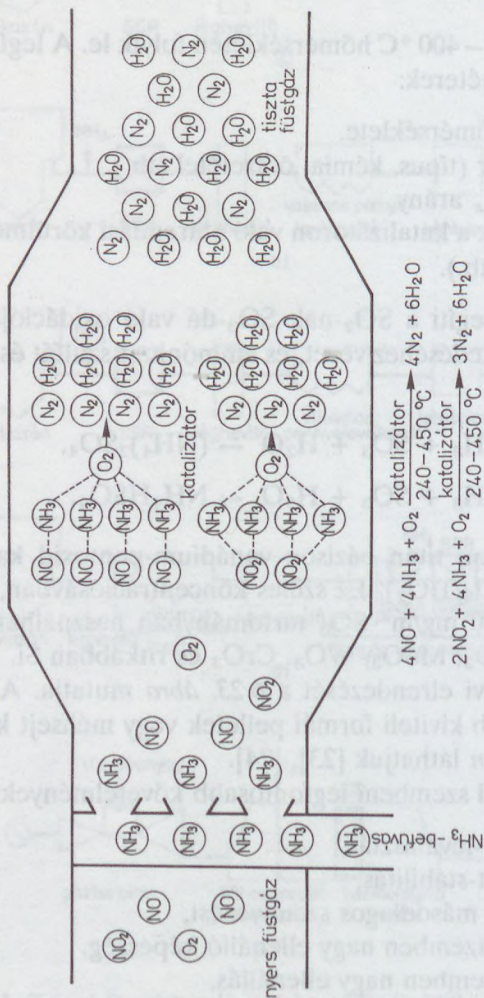
A leggyakrabban titán bázison vanádium-pentoxid katalizátort alkalmaznak ($\text{V}_2\text{O}_5/\text{TiO}_2$). Ez széles koncentrációsávban, kb. 5700 mg/m^3 SO_2 és 360 mg/m^3 SO_3 tartományban használható. Egyéb katalizátorok: FeO_3 , MoO_3 , WO_3 , CrO_3 és ritkábban Si.

A leválasztó elvi elrendezését a 6.23. ábra mutatja. A katalizátorok leggyakoribb kiviteli formái pelletek vagy méhsejt kivitelűek, amint a 6.24. ábrán láthatjuk [23], [24].

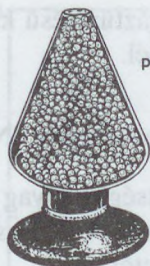
A katalizátorral szembeni legfontosabb követelmények:

- magas NO_x -leválasztás,
- hőmérséklet-stabilitás,
- ne okozzon másodlagos szennyezést,
- a SO_x -szel szemben nagy ellenálló képesség,
- erózióval szemben nagy ellenállás,
- biztonságos kezelési lehetőség.

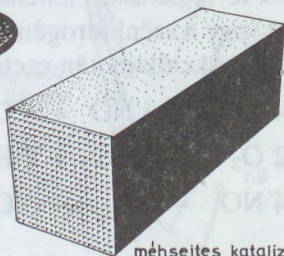
A katalizátorok hatékonysága a hőmérséklet függvényében jelentősen változhat. A részletesebb ismeretek megadása nélkül közöljük pl. különböző típusú katalizátorok jelleggörbéjét (6.25. ábra).



6.23. ábra. A szelektív katalitikus eljárás vázlata [24]

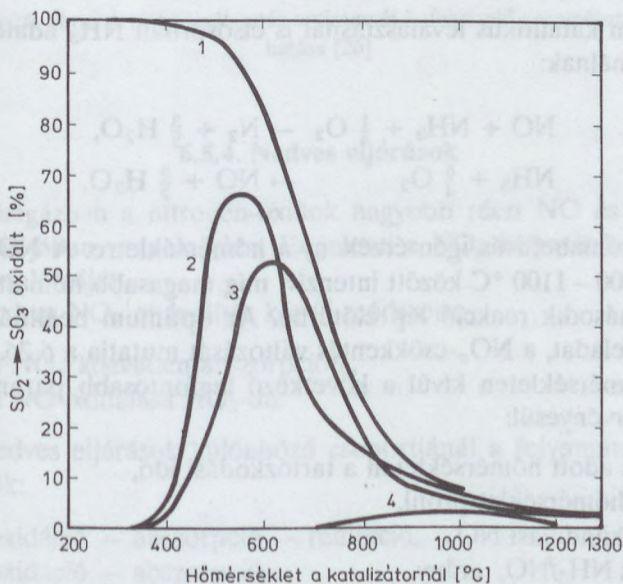


pellet katalizátor



méhsejtes katalizátor

6.24. ábra. A katalizátorok leggyakoribb megoldásai [23]

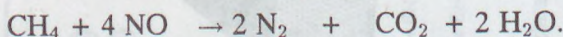
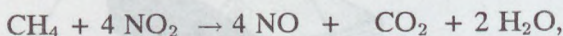


6.25. ábra. A katalizátor hatékonysága a hőmérséklet függvényében
1- egyensúlyi görbe, 2- V_2O_5 -katalizátor, 3- Fe_2O_3 -katalizátor,
4- kvarckatalizátor

A katalizátorok élettartama 6–7 év gáztüzelésű kazánnál, kb. 5 év olajtüzelésnél és kb. 3 év széntüzelésnél.

6.5.2. Nem szelektív katalitikus leválasztás (NSCR)

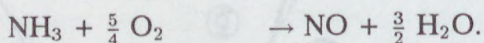
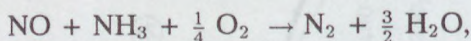
A nitrogén-oxidok leválasztására lehetséges anyag lehet a hidrogén, a szén-monoxid vagy a szénhidrogén is. A leválasztás 200–500 °C között történik. A reakciók metán esetében:



Mivel általában oxigén is jelen van a füstgázban, így az uralkodó a második reakció.

6.5.3. Szelektív nem katalitikus leválasztás

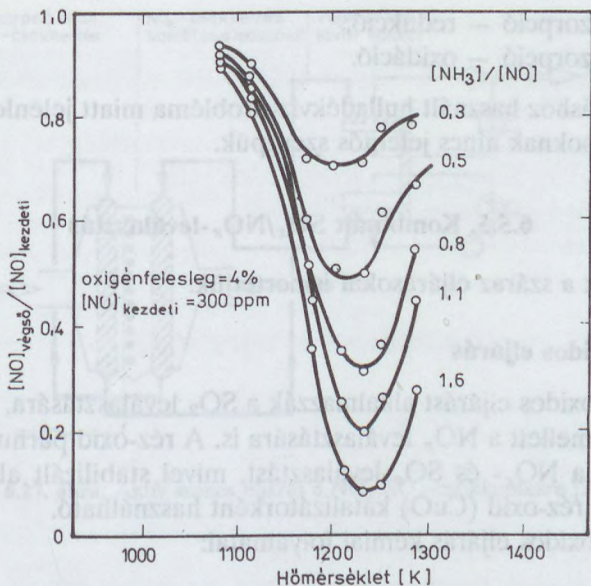
A nem katalitikus leválasztásnál is elsősorban NH_3 adalékanyagot használnak:



Az ammóniabefúvás igen érzékeny a hőmérsékletre. A NO_x -csökkentés 800–1100 °C között intenzív, míg magasabb hőmérsékleteken a második reakció lép előtérbe. Az optimum beállítása igen kényes feladat, a NO_x -csökkentés változását mutatja a 6.26. ábra.

A hőmérsékleten kívül a következő legfontosabb paraméterek hatása érvényesül:

- az adott hőmérsékleten a tartózkodási idő,
- a hőmérséklet-profil,
- a kiindulási NO_x ,
- az NH_3/NO_x arány,
- a keveredési feltételek.



6.26. ábra. A NO_x -leválasztás optimumát befolyásoló paraméterek hatása [26]

6.5.4. Nedves eljárások

A füstgázban a nitrogén-oxidok nagyobb részt NO és kevésbé NO_2 alakjában vannak jelen. Ez jelenti a NO_x kimosásának alapvető problémáját.

A nedves NO_x -eltávolítás két fő módszere:

- a NO_x közvetlen abszorpciója,
- a NO oxidálása NO_2 -dá.

A nedves eljárások különböző csoportjánál a folyamatok a következők:

- oxidáció — abszorpció — redukció,
- oxidáció — abszorpció,

- abszorpció — redukció,
- abszorpció — oxidáció.

A mosáshoz használt hulladékvíz-probléma miatt jelenleg a nedves eljárásoknak nincs jelentős szerepük.

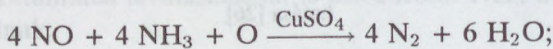
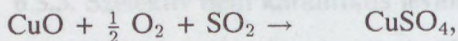
6.5.5. Kombinált SO_x/NO_x -leválasztás

Itt csak a száraz eljárásokat ismertetjük.

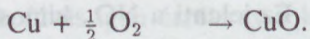
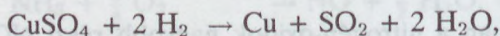
Réz-oxidos eljárás

A réz-oxidos eljárást alkalmazzák a SO_2 leválasztására, de NH_3 -adagolás mellett a NO_x leválasztására is. A réz-oxid párhuzamosan biztosítja a NO_x - és SO_x -leválasztást, mivel stabilizált alumínium bázison a réz-oxid (CuO) katalizátorként használható.

A réz-oxidos eljárás kémiai folyamatai:



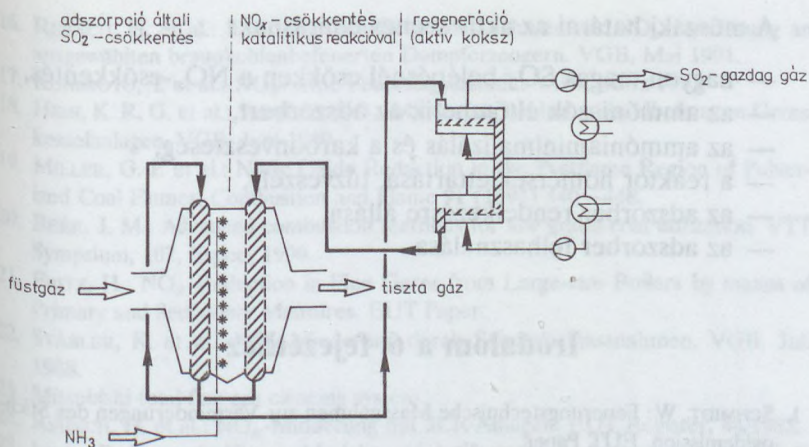
és a regenerálás:



A füstgázhőmérséklet a reaktorba belépésnél kb. 385°C , és a CuO katalizátorként működik a NO_x -nak NH_3 -val történő csökkentésében. A folyamatban keletkező SO_2 kén- vagy kénsavgyártásra használható.

Aktív szén eljárás

A NO_x/SO_x párhuzamos csökkentésére az aktív szén eljárás is jól használható. A SO_x abszorbeálódik a karbonon. A karbon



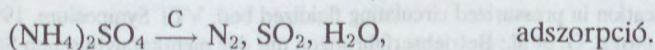
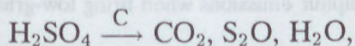
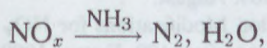
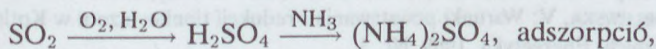
6.27. ábra. Aktív szenes eljárás a NO_x/SO_x-csökkentésre [26]

katalizátorként hat ammónia adagolása mellett a NO_x-nak N₂-né való redukálásakor. A folyamat vázlatát a 6.27. ábra mutatja [26].

A folyamat két szakasza:

- adszorpció,
- deszorpció.

Az optimális hőmérséklet 120–140 °C. A fő reakciók a következők:



A műszaki határai az aktív szenes eljárásnak:

- nagyon magas SO_2 -belépésnél csökken a NO_x -csökkentés,
- az ammóniasók eltömhetnek az adszorbert,
- az ammóniaminimalizálás és a karbonvesztés,
- a reaktor hőmérséklettartása, tűzveszély,
- az adszorber rendelkezésre állása,
- az adszorber felhasználása.

Irodalom a 6. fejezethez

1. SCHMIDT, W.: Feuerungstechnische Massnahmen zur Verminderungen des Stichoxidemission. EUT. Paper.
2. STÖHR, M. et al.: N_2O in der Umwelt. VGB, Februar 1993.
3. ABBAS, T. et al.: The Influence of Near Burner Region Aerodynamics on the Formation and Emission of Nitrogen Oxides in a Pulverized Coal-Fired Furnace. Combustion and Flame 85 (1991) 346–363.
4. KREMER, H. et al.: Neigung von Kraftwerkskohlen zur NO_x -Bildung. VGB, Juli 1990.
5. ALBRECHT, W.: NO_x -Emissionen aus Kohlenstaubflammen. VGB, Juli 1992.
6. AMAND, L. E. et al.: Nitrogen oxides from a fluidized bed boiler. Combustion and Flame 84 (1991) 181–196.
7. Report on a Study Tour of the ECE: Peat and Forest Biomass as an Energy Source Finnish Experience. Tech. Research Centr. of Finland, 1988.
8. KRAMLICH, I. C. et al.: Nitrousoide in Coal Flames. Combustion and Flame 77 (1989) 375–384.
9. LEIKERT, K. et al.: Low NO_x emission of fossil fuels in the Federal Republic of Germany. Fourth Seminar..., Graz, Austria, 12–16 May, 1986.
10. WROBLEWSKA, V.: Warunki powstawania i redukcji tlenkow azotu w Kotlah energetycznych. Energetyka, 1989. Nr. 3.
11. Mitsubishi Products for Power Generation 1989. August.
12. HEIN, K. R. G.: The application of Combustion Modifications for NO_x Reduction to low Rank Coal Fired Boilers. VTT Symposium 108, Espoo, 1990.
13. KENAKKALA, T. et al.: Removal of sulphur emissions when firing low-grade fuels. VTT Symposium, 1990.
14. SHAKARYAN, R. Y. et al.: A mathematical model of the process of low-grade fuel gasification in pressurized circulating fluidized bed. VTT Symposium, 1990.
15. ZELLINGER, G. et al.: Betriebserfahrungen mit der nichtkatalytischen Stichoxygenreduktion in den Dampfkraftwerken der Österreichischen Drankraftwerke A. G. VGB, Dezember 1989.

16. REIDICH, H. et al.: Feuerungstechnische Massnahmen zur NO_x -Minderung an ausgewählten braunkohlenbefeuerten Dampferzeugern. VGB, Mai 1991.
17. KUNIMOTO, T. et al.: NO_x -arme Feuerungstechnik. VGB. März 1991.
18. HEIN, K. R. G. et al.: Stand der NO_x -Minderung bei braunkohlbeheizten Grosskesselanlagen. VGB, Juni 1989.
19. MILLER, G. P. et al.: Nitric Oxide Reduction in the Postflame Region of Pulverized Coal Flames. Combustion and Flame **91** (1991) 440–448.
20. BEÉR, J. M.: Advanced combustion methods for low grade coal utilization. VTT Symposium, 107, Espoo, 1990.
21. FRITZ, H.: NO_x Reduction in Flue Gases from Large-size Boilers by means of Primary and Secondary Measures. EUT Paper.
22. STÄBLER, K. et al.: NO_x -Minderung durch Sekundärmassnahmen. VGB, Juli 1988.
23. Mitsubishi total flue gas cleaning system.
24. REIDICH, H. et al.: NO_x -Minderung mit SCR-Anlagen. EUT Register, 44/1985.
25. LYON, R. K. et al.: Kinetic Modeling of Artifacts in the Measurement of N_2O From Combustion Sources. Combustion and Flame **76** (1989) 139–143.
26. Economic Commission for Europe: NO_x Task Force, July, 1986.
27. ZELDOWSKI, J.: NO_x -Bildung bei der Kohleverbrennung und NO_x Emissionen aus Schmelzfeuerung. VGB, August 1986.
28. GERKE, B. et al.: Einfluss der primären NO_x -Minderung bei Kohlenstaubfeuerungen auf Mahl- und Feuerungsanlage. VGB, Januar 1987.
29. EGE, H.D.: Combustion modification for NO_x Control. Energy and Environment Conference, Prague, April, 20–23. 1992.
30. HEIN, R. G.: Reduction of NO_x -emission from low calorie coal fired boilers research and subsequent large scale experience. Energy and Environment Conference, Prague, April, 20–23. 1992.
31. ALLEN, J. W.: The environmental Impact of Fossil Fuel Combustion in Power generation. Energy and Environment Conference, Prague, April 20–23. 1992.
32. Mitsubishi: Dry selective catalytic NO_x removal system. Tokyo, Japan.

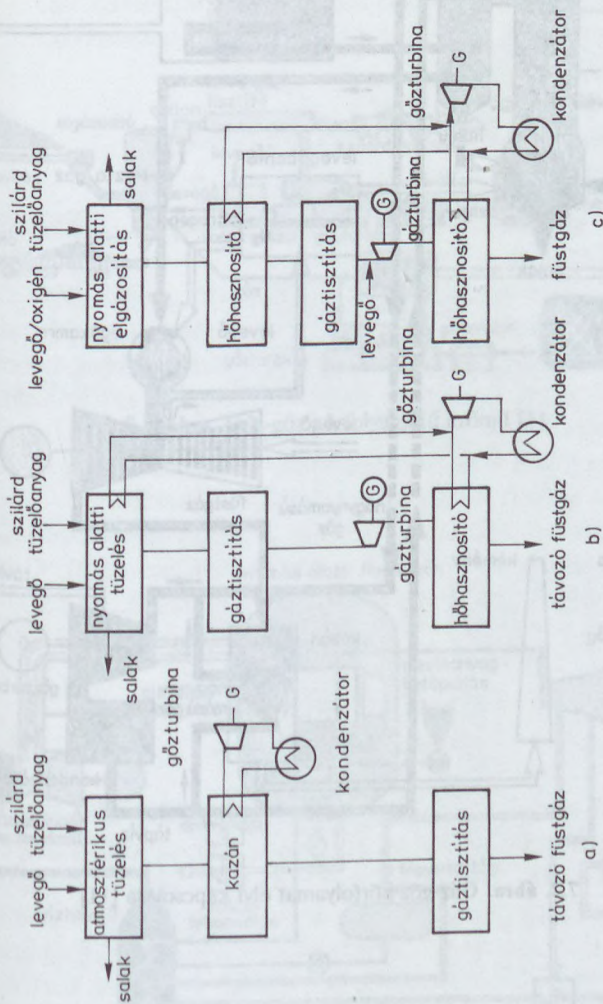
7. A SZÉN ELGÁZOSÍTÁSA ÉS A GÁZ-GŐZ KÖRFOLYAMATBAN TÖRTÉNŐ HASZNOSÍTÁSA

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 megoldást valamely szokásos gőzfejlesztővel és gőzturbinával, nyomás alatti fluidizációs tüzeléssel megvalósított gáz-gőz körfolyamatot és szénelgázosítással megvalósított gáz-gőz körfolyamatot mutat egyszerű vázlatokkal a 7.1. ábra. Külön az elgázosítással megvalósított erőmű kapcsolása a 7.2. és 7.3. ábrán látható [1], [4], [11].

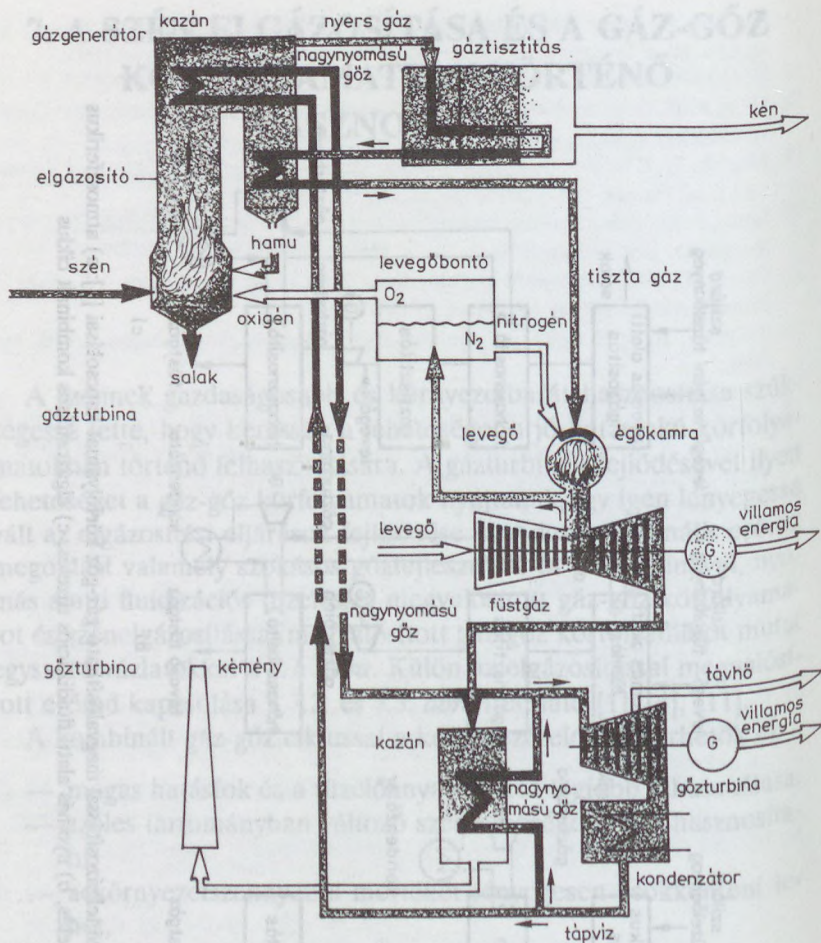
A kombinált gáz-gőz ciklussal a következő előnyök érhetők el:

- 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,
- 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 közvetlen a gázturbinára vezethető. Ilyen eljárással ipari méretű kísérletek három jelentős helyen

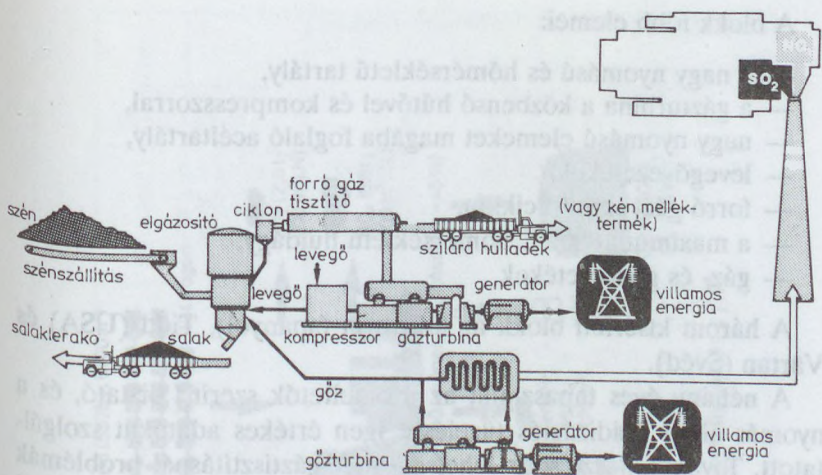


7.1. ábra. A szénelgázosítással megvalósítható gáz-gáz körfolyamat kapcsolásai [4]: a) atmoszférikus tüzelés, b) nyomás alatti fluidizációs tüzelés, c) elgázosítós kombinált ciklus

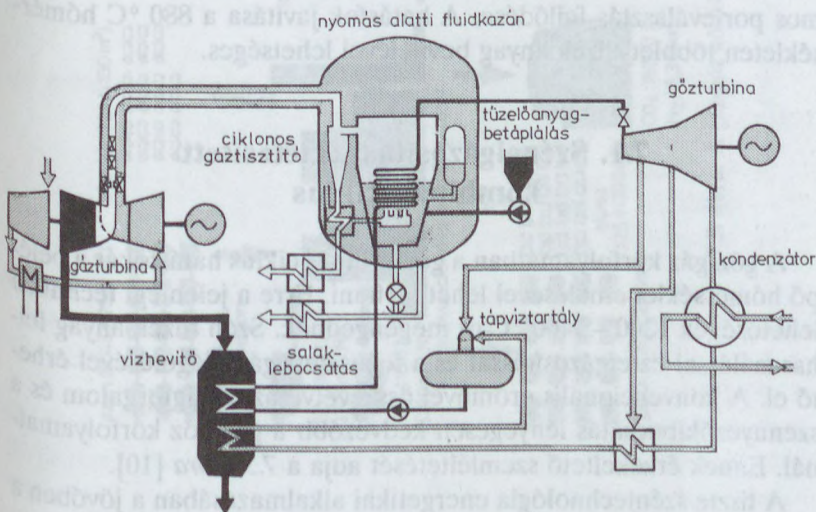


7.2. ábra. Gáz-gőz körfolyamat elvi kapcsolása [11]

Spanyolországban, az USA-ban és Svédországban folynak. E megoldásnál a tüzelőanyagot nyomás alatti fluidizációs tüzeléssel égetik el, és az szolgál a gáz- és gőzturbina hőforrásául. A rendszer kapcsolását a 7.4. ábra mutatja [5].



7.3. ábra. Gáz-gőz körfolyamatú erőmű [1]



7.4. ábra. Nyomás alatti fluidtüzeléssel közvetlen gáz-gőzturbinás erőmű [5]

A blokk főbb elemei:

- a nagy nyomású és hőmérsékletű tartály,
- a gázturbina a közbenső hűtővel és kompresszorral,
- nagy nyomású elemeket magába foglaló acéltartály,
- levegővezetékek,
- forró gázt tisztító ciklon,
- a maximum $880\text{ }^{\circ}\text{C}$ hőmérsékletű fluidágy,
- gáz- és gőzvezetékek.

A három kísérleti blokk az Escatron (spanyol), Tidd (USA) és Värtan (Svéd).

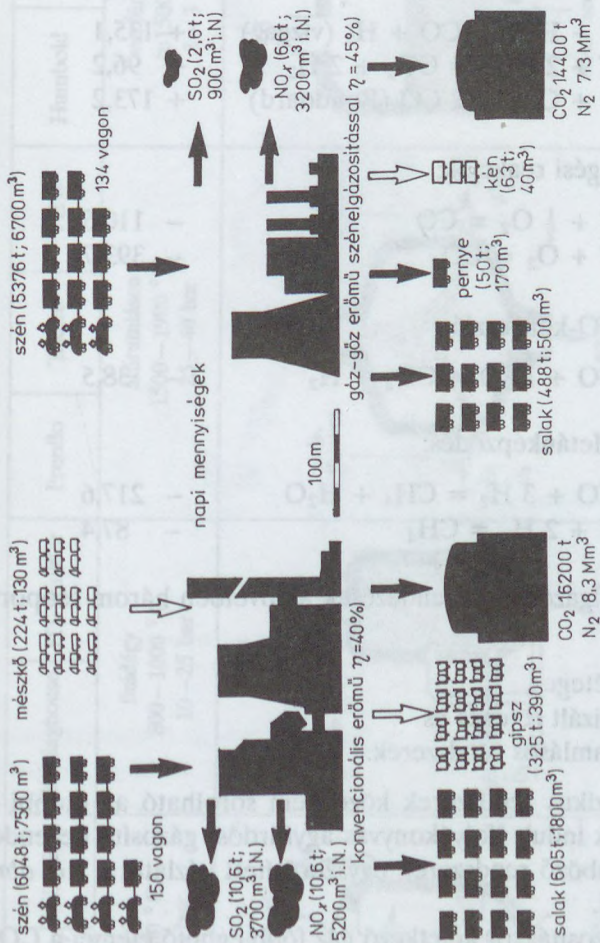
A néhány éves tapasztalat az üzemeltetők szerint biztató, és a nyomás alatti fluidizációs tüzelésre igen értékes adatokat szolgáltatott. Továbbfejlesztése is lehetséges. A gáztisztításnál problémák jelentkeztek, mivel kezdetben az Escatron-nál a gázturbinára jutó füstgáz portartalma lényegesen meghaladta az 50 mg/m^3 -t. Ugyancsak korlátot jelent a fluidtüzelés miatt a maximális $880\text{ }^{\circ}\text{C}$ hőmérséklet, ami a körfolyamat gazdaságosságát behatárolja.

Elősegítené az eljárás elterjedését a magas hőmérsékletű villamos porleválasztás fejlődése. A hatásfok javítása a $880\text{ }^{\circ}\text{C}$ hőmérsékleten többlet-tüzelőanyag bevitelével lehetséges.

7.1. Szénelgázosítással létesített kombinált ciklus

A gőz-gáz körfolyamatban a gázturbinás ciklus hatásfokát a belépő hőmérséklet emelésével lehet javítani. Erre a jelenlegi technikai lehetőségek $1200 - 1400\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ot megengednek. Szén tüzelőanyag felhasználással ez elgázosítással és a fejlesztett gáz elégetésével érhető el. A konvencionális erőművel összevetve az anyagforgalom és a szennyezőkibocsátás lényegesen kedvezőbb a gáz-gőz körfolyamatnál. Ennek érzékeltető szemléltetését adja a 7.5. ábra [10].

A tiszta széntekológia energetikai alkalmazásában a jövőben a szénelgázosítás jelentős szerepet fog játszani.



7.5. ábra. A gáz-gőz körfolyamat hatása az anyagforgalomra [10]

A szénelgázosítás legfontosabb reakciói:

Reakció	Reakcióhő, ΔH [kJ/mol]
$C + H_2O = CO + H_2$ (vízgáz)	+ 135,1
$C + 2 H_2O = CO_2 + 2 H_2$	+ 96,2
$C + CO_2 = 2 CO$ (Boudoard)	+ 173,2

Égési reakciók:

$C + \frac{1}{2} O_2 = CO$	- 110,5
$C + O_2 = CO_2$	- 393,7

CO-konverzió:

$CO + H_2O = CO_2 + H_2$	- 38,5
--------------------------	--------

Metánképződés:

$CO + 3 H_2 = CH_4 + H_2O$	- 217,6
$C + 2 H_2 = CH_4$	- 87,4

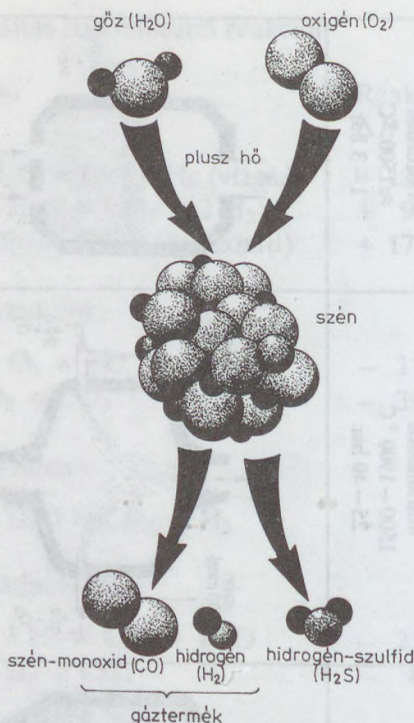
A szénelgázosító berendezések alapvetően három csoportba sorolhatók:

- fix réteges,
- fluidizált réteges és
- átáramlásos rendszerek.

E klasszikus rendszerek közé nem sorolható az utóbbi időben fejlődésnek indult "folyékonyvas-ágyfürdős" gázosító berendezés.

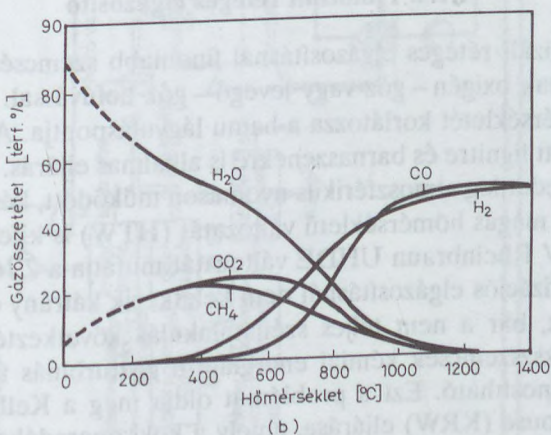
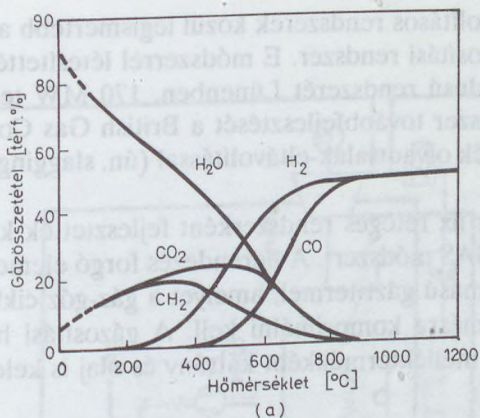
A különböző rendszerek egyszerűsített vázlatát a 7.6. ábrán láthatjuk [20].

Az elgázosításkor keletkező gáz főbb éghető elemei a CO , H_2 és CH_x (7.7. ábra). A mennyiségük a felhasznált tüzelőanyagon kívül erősen függ az elgázosítási eljárástól és a fizikai-kémiai paramétereiktől. Jelentős szerepe van a beadagolt oxigén és gőz mennyiségének. A szén illótartalmának növekedése általában növeli a gáz fű-



7.7. ábra. A szénelgázosítás folyamata [1]

tőértékét és lehetővé teszi a befűvott oxigén mennyiségének csökkentését. Ez előnyös abból a szempontból is, hogy magasabb hőmérsékleteknél a gázösszetételben csökkenne a metántartalom, ami pedig igen értékes összetevője a fejlesztett gáznak. Az elgázosításnál alkalmazott nyomás szerepét mutatja a 7.8. a., b. ábra, amelyen 1 bar és 20 bar nyomás esetére láthatók a gázösszetételek. Megfigyelhető, hogy pl. 20 bar esetén a hőmérsékletnek $950\text{ }^\circ\text{C}$ -ről $850\text{ }^\circ\text{C}$ -ra való csökkentésével a metántartalom 4%-ról kb. 10%-ra növekszik [1], [7]. A fejlesztett gáz energiatartalmának növelése alapvető cél.



7.8. ábra. A gázösszetétel változása a hőmérséklettel [7]:
a) 1 bar nyomáson, b) 20 bar nyomáson

7.1.1. Fix réteges elgázosító

Jelenleg a leginkább elterjedt eljárás a szénből szintézisgáz fejlesztésére. Az elgázosítás folyamatában szárítás, karburálódás, elgázosodás és kis részben égés történik. Az alkalmazott módszertől függően a salak száraz vagy olvadt formában távozik. A szá-

raz salakeltávolítós rendszerek közül legismertebb a nyomás alatti Lurgi elgázosítási rendszer. E módszerrel létesítették a világ első kombinált ciklusú rendszerét Lünenben, 170 MW teljesítménnyel. A Lurgi-rendszer továbbfejlesztését a British Gas Cooperation-nal együtt végezték olvadtsalak-eltávolítással (ún. slagging gasifier) (7.9. ábra) [6].

Ugyancsak fix réteges rendszerként fejlesztették ki az USA-ban az ún. KILnGAS módszert. A berendezés forgó elemet tartalmaz és alacsony nyomású gázt termel, amelyet a gáz-gőz ciklus gázturbina belépési nyomásra komprimálni kell. A gázosítási hőmérséklet is alacsony, így melléktermékként kátrány és olaj is keletkezik.

7.1.2. Fluidizált réteges elgázosító

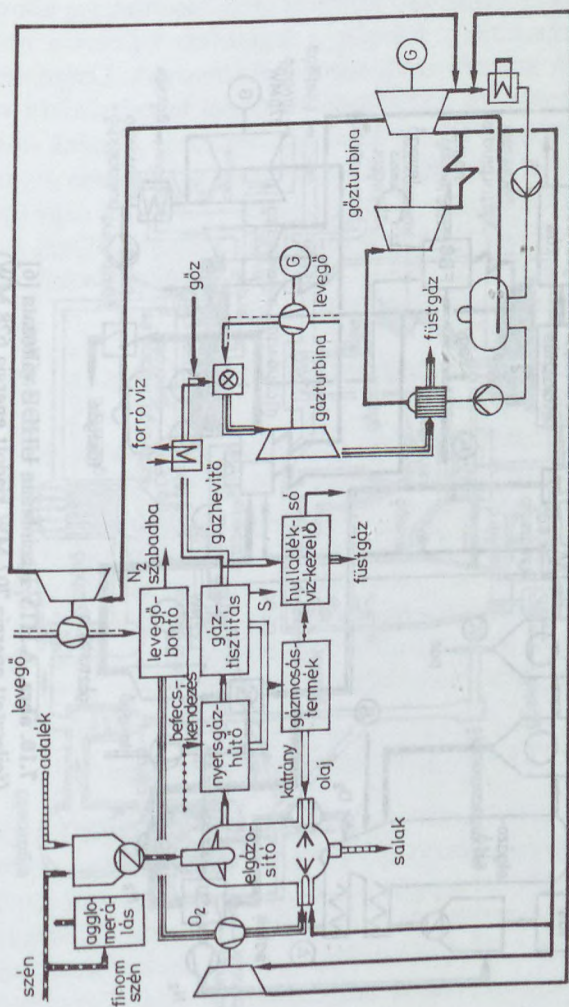
A fluidizált réteges elgázosításnál finomabb szemcsézetű szenet alkalmaznak oxigén – gőz vagy levegő – gőz befúvással. Az elgázosítás hőmérsékletét korlátozza a hamu lágyuláspontja. A feketeszenek mellett lignitre és barnaszenekre is alkalmas eljárás. A Winkler-eljárás eredetileg atmoszférikus nyomáson működött, később a nagy nyomású, magas hőmérsékletű változatát (HTW) is kifejlesztették.

A HTV Rheinbraun UHDE változatát mutatja a 7.10. ábra [6].

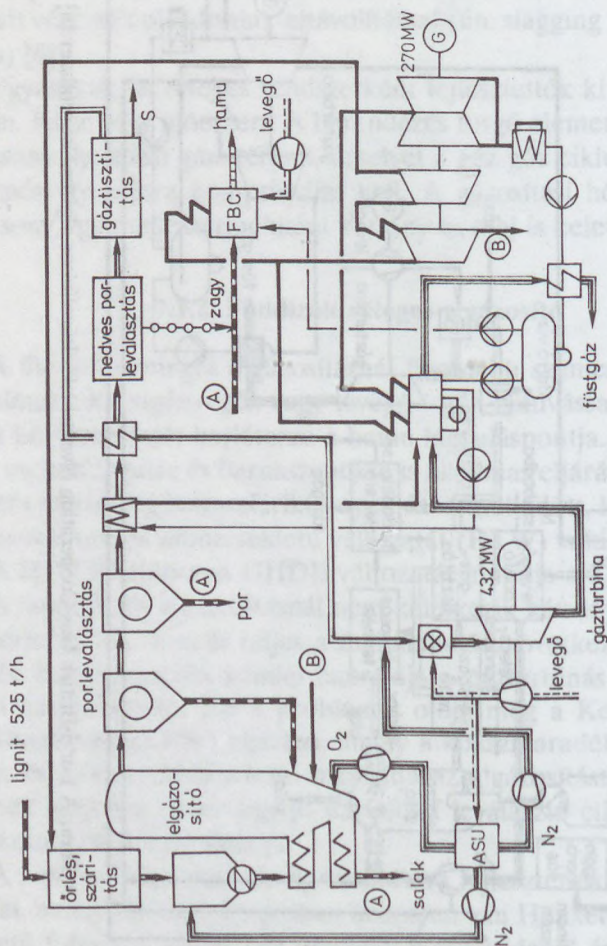
A fluidizációs elgázosításnál nem keletkezik kátrány és olaj melléktermék, bár a nem teljes szénátalakulás következtében a maradék kokszzsemcsék kémiai energiája a gázturbinás folyamatban nem hasznosítható. Ezt a problémát oldja meg a Kellogg, Rust és Westinghouse (KRW) eljárása, amely a kokszzmaradékot visszatáplálja, és külön gőzbefúvással biztosítja az elgázosítást. A berendezésnek lényeges eleme egy jó hatásfokú leválasztó ciklon, amely a kokszzsemcséket leválasztja.

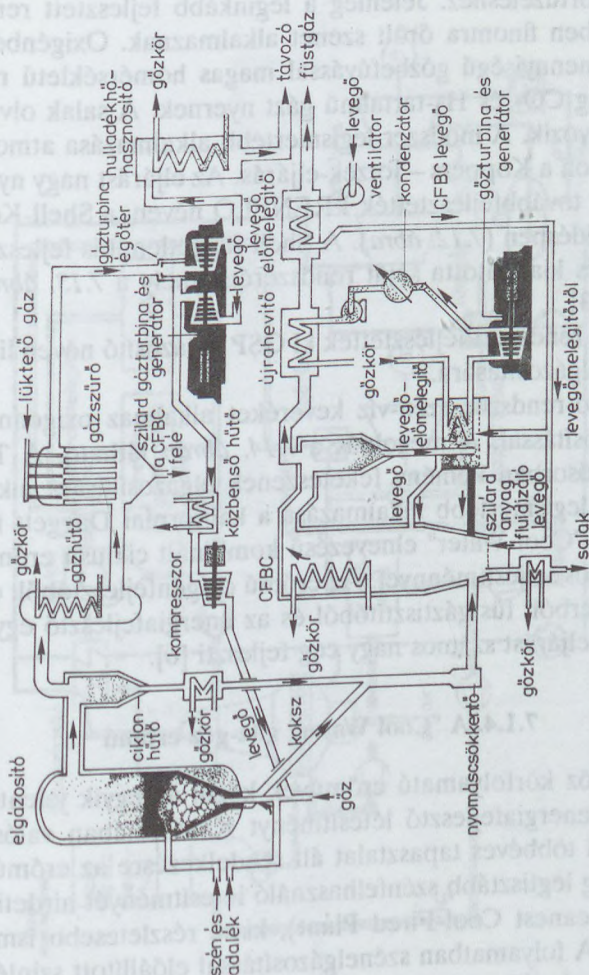
A kemény feketeszenek elgázosítására fejlesztették ki a CGT eljárást, amely kísérleti állapotban üzemben van Hünxében. Ez kétfokozatú folyamat, amely egy fluidizált elgázosításból és egy átáramlásos elgázosításból áll.

A British Coal Topping Cycle-ben alkalmazott elgázosító és cirkulációs fluidberendezések kombinációját a 7.11. ábra mutatja [21].



7.9. ábra. A Lurgi-British Gas Cooperation olvadtalak-eltávolításos elgázosítási rendszer [6]





7.1.3. Átáramlásos elgázosító rendszer

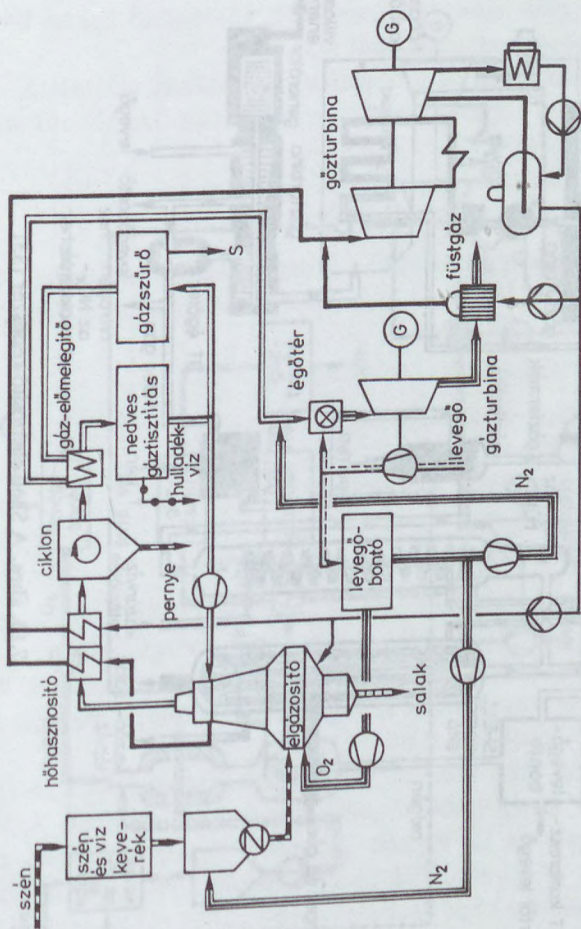
Az átáramlásos elgázosító rendszer igen hasonlatos a konvencionális szénportüzeléshez. Jelenleg a leginkább fejlesztett rendszer. A rendszerben finomra őrölt szenet alkalmaznak. Oxigénbefúvással és kis mennyiségű gőzbefúvással magas hőmérsékletű reakció mellett főleg CO- és H₂-tartalmú gázt nyernek. A salak olvadt állapotban távozik. A módszer legismertebb alkalmazása atmoszférikus nyomáson a Koppers – Totzek-eljárás. Az eljárást nagy nyomású változatban továbbfejlesztették PRENFLO néven, a Shell-Koppers együttműködésben (7.12. ábra). A Shell függetlenül is fejlesztette a módszert, és kialakította saját rendszerét, amely a 7.13. ábrán látható [6], [33].

Egy más rendszert fejlesztettek ki GSP elgázosító néven lignitőrlemények elgázosítására.

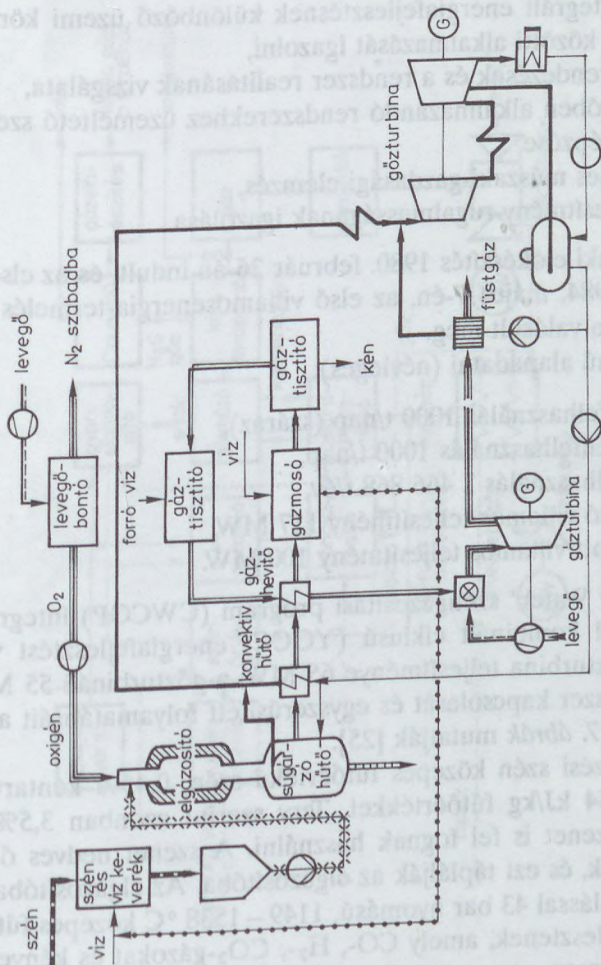
A Texaco-rendszer szén-víz keveréket alkalmaz oxigénnel történő elgázosítással. A megoldás a 7.14. ábrán látható. A Texaco-eljárást elsősorban kemény feketeszenek elgázosítására alkalmazzák. Egyik legismertebb alkalmazása a kaliforniai Daggett közelében épített "Cool Water" elnevezésű kombinált ciklusú erőmű, 100 MW villamos teljesítménnyel. Az erőmű oxigénfejlesztőből, elgázosító rendszerből, füstgáztisztítóból és az energiafejlesztő egységek-ből áll. Az eljárást számos nagy cég fejleszti [6].

7.1.4. A "Cool Water" gáz-gőz erőmű

A gáz-gőz körfolyamatú erőművek közül az egyik jelentős ipari méretű energiafejlesztő létesítményt Kaliforniában valósították meg. Mivel többéves tapasztalat áll rendelkezésre az erőművel, és mint a világ legtisztább szénfelhasználó létesítményét hirdetik (The World's Cleanest Cool-Fired Plant), kissé részletesebb ismertetést adjuk. A folyamatban szénelgázosítással előállított szintézisgáz hasznosítanak villamosenergia-fejlesztésre. A létesítménnyel a következő célkitűzések voltak:



7.12. ábra. A PRENFO elgázosító rendszer [6]



7.14. ábra. A Texaco rendszer szén-víz szuszpenzió oxigénnel történő előállításra [6]

- a rendszernek és a berendezéseknek ipari méretben való bemutatása,
- a rendszerrel igazolni, hogy szigorú környezetvédelmi igények kielégíthetők,
- az integrált energiafejlesztésnek különböző üzemi körülmények közötti alkalmazását igazolni,
- a berendezések és a rendszer realitásának vizsgálata,
- a jövőben alkalmazandó rendszerekhez üzemeltető személyzet képzése,
- a teljes műszaki-gazdasági elemzés,
- a létesítmény rugalmasságának igazolása.

A műszaki előkészítés 1980. február 26-án indult, és az első gáztermelés 1984. május 7-én, az első villamosenergia-termelés 1984. május 20-án valósult meg.

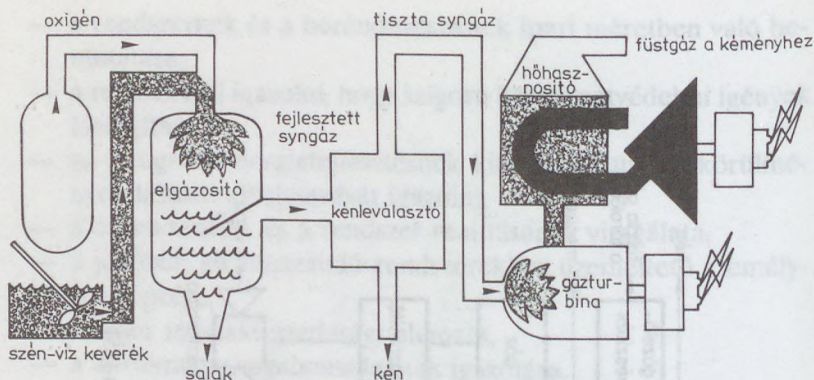
Az erőmű alapadatai (névleges):

- szénfelhasználás 1000 t/nap (száraz),
- oxigénfelhasználás 1000 t/nap,
- vízfelhasználás 2 466 868 t/év,
- bruttó villamos teljesítmény 117 MW,
- kiadott villamos teljesítmény 100 MW.

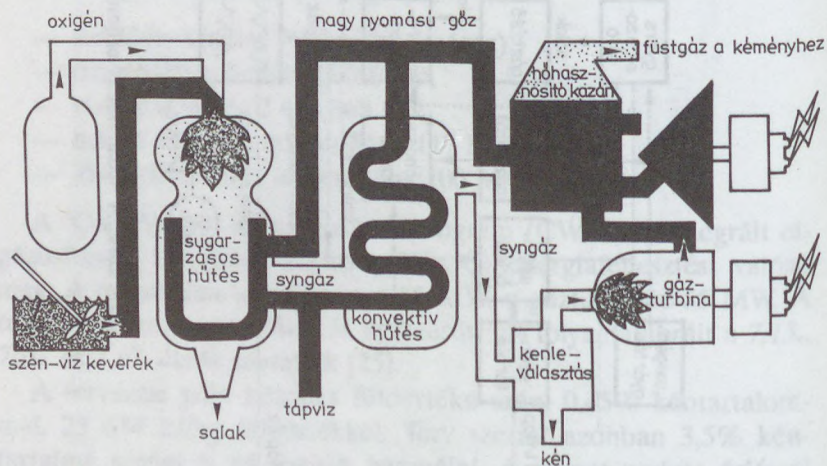
A "Cool Water" széngázosítási program (CWCGP) integrált elgázosítással kombinált ciklusú (YGCC) energiafejlesztést valósít meg. A gázturbina teljesítménye 65 MW, a gőzturbináé 55 MW. A teljes rendszer kapcsolását és egyszerűsített folyamatábráit a 7.15., 7.16. és 7.17. ábrák mutatják [25].

A tervezési szén közepes fűtőértékű szén, 0,45% kén tartalommal, 25 634 kJ/kg fűtőértékkel. Terv szerint azonban 3,5% kén tartalmú szenet is fel fognak használni. A szenet nedves őrléssel zaggyá őrlik, és ezt táplálják az elgázosítóba. Az elgázosítóban oxigénbetáplálással 43 bar nyomású, 1149 – 1538 °C közepes fűtőértékű gázt fejlesztenek, amely CO-, H₂-, CO₂-gázokat és kénvegyületeket tartalmaz.

A gáz mosás és hűtés után kb. 38 °C-ra hűl le. A kénleválasztás SELEXOL rendszerrel hidrogén-szulfid és karbonil-szulfid formá-

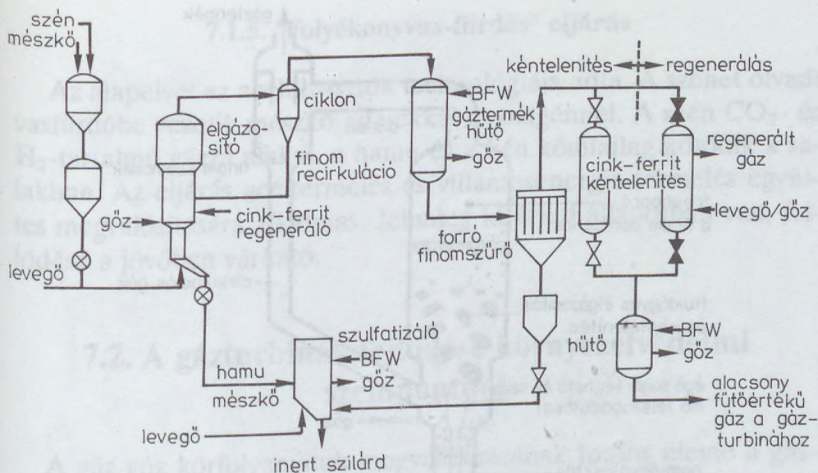


7.16. ábra. A "Coal Water" erőmű technológiai kapcsolása [25]



7.17. ábra. A "Coal Water" gyorsűtés és szűrés sémája [25]

jában történik. A kéntelenített gáz kerül a gázturbina égőkamrájába. A gázturbinák gőzbeűtéssel csökkentik a NO_x -képződést. A gázturbina távozó gázával és a szintézisgáz hűtésével 102,5 bar nyomású és 510 °C hőmérsékletű gőzt fejlesztenek. A szabadba távozó



7.18. ábra. A Kellogg (80%) és Westinghouse (20%) elgázosító rendszer [31]

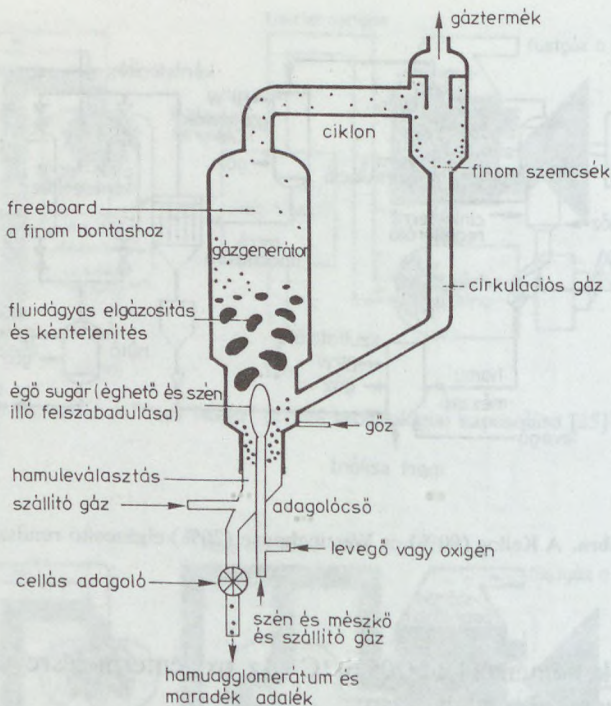
füstgázok hőmérséklete $205,6\text{ }^{\circ}\text{C}$. Az oxigéntermelésre levegőből külön üzem áll rendelkezésre.

A kénleválasztó rendszer végterméke elemi kén. A kénleválasztás és egyéb károsanyag-leválasztás igen hatásos, a gázturbinába a gőzbefecskendezéssel igen alacsony nitrogén-oxid-képződés érhető el.

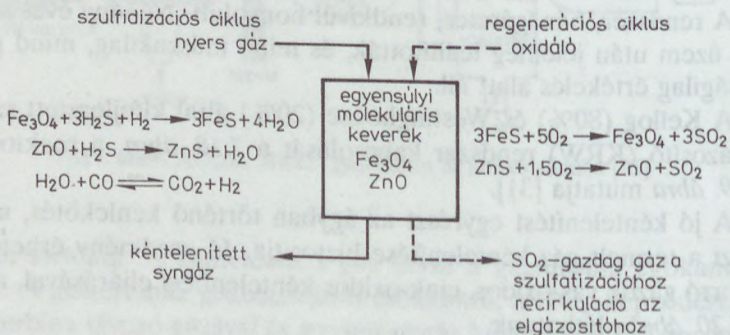
A rendszer, bár ígéretes, rendkívül bonyolult. Néhány éves sikeres üzem után jelenleg leállították, és mind műszakilag, mind gazdaságilag értékelés alatt áll.

A Kellogg (80%) és Westinghouse (20%) által kifejlesztett szén-elgázosító (KRW) rendszer kapcsolását a 7.18. ábra, a reaktort a 7.19. ábra mutatja [31].

A jó kántelenítést egyrészt az ágyban történő kénlekötés, másrészt a termelt gáz kántelenítése biztosítja. Jó eredmény érhető el a forró gázok vas-oxidos, cink-oxidos kántelenítési eljárásával, amit a 7.20. ábrán láthatunk.



7.19. ábra. A Kellogg – Westinghouse elgázosító reaktora [31]



7.20. ábra. Vasoxidos-cinkoxidos kéntelenítési eljárás [31]

7.1.5. "Folyékonyvas-fürdős" eljárás

Az alapelvet az acélolvasztók technológiája adta. A szenet olvadt vasfürdőbe vezetik mész- adalékkal és oxigénnel. A szén CO_2 - és H_2 -tartalmú gázzá alakul, a hamu és a kén kémiaiilag kötődik a szilíciumban. Az eljárás acélermelés és villamosenergia-termelés együttes megvalósítására alkalmas. Jelenleg kísérleti állapotban van, fejlődése a jövőben várható.

7.2. A gázturbinák fejlődése környezetvédelmi szempontból

A gáz-gőz körfolyamatok megvalósításának fontos eleme a gázturbina, amelynek fejlődése meghatározó volt a kombinált ciklusú körfolyamatok fejlődésében is. A jó hatásfok és a kis környezet-szennyezés mind a tüzeléstechnikának, mind az anyagtechnológiának a függvénye.

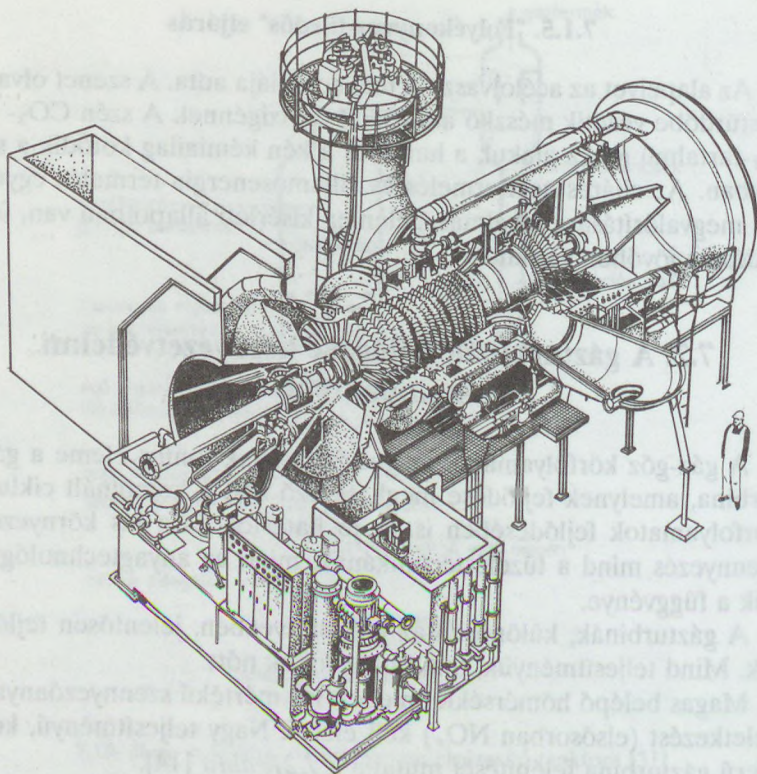
A gázturbinák, különösen az utóbbi években, jelentősen fejlődtek. Mind teljesítményük, mind hatásfokuk nőtt.

Magas belépő hőmérséklet mellett kis mértékű szennyezőanyag-keletkezést (elsősorban NO_x) kell elérni. Nagy teljesítményű, korszerű gázturbina felépítését mutatja a 7.21. ábra [14].

A magas belépő hőmérséklet elsősorban az égőkamrák és az első turbinafokozatok fejlesztését igényelte. Az égőkamrák fejlődését szemlélteti a 7.22. ábra. Jól látható, hogy a hőmérséklet emelkedésével az égőkamrák áramlástechnikailag lényegesen változnak. A gázturbinák üzemanyaga jelenleg főképpen földgáz vagy könnyűolaj, de a jövőben egyre inkább nehézőlajok és szénelgázosításból származó gázok is felhasználásra kerülnek.

A tüzelőanyag befolyását a NO_x -emisszióra a metán = 1 értéket alapul véve a 7.23. ábra szemlélteti. A környezetvédelmi előírások is országanként és tüzelőanyagonként változnak. Az új határértékek például Németországban gázra és olajra:

$$\text{CO} \leq 0,1 \text{ g/m}^3,$$



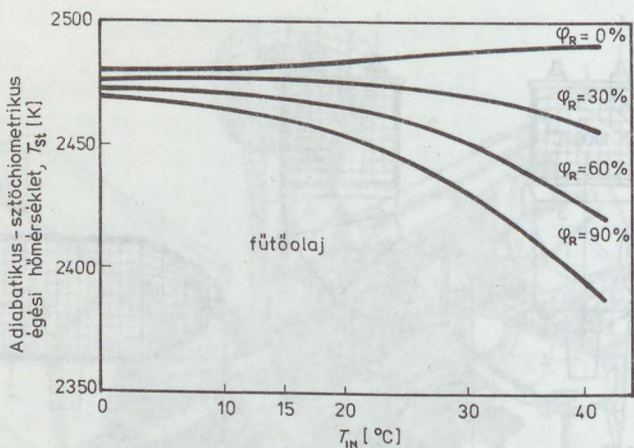
7.21. ábra. Siemens/KWU korszerű gázturbina felépítése [14]

$\text{NO}_x \leq 0,3 \text{ g/m}^3$,
koromszám < 2 .

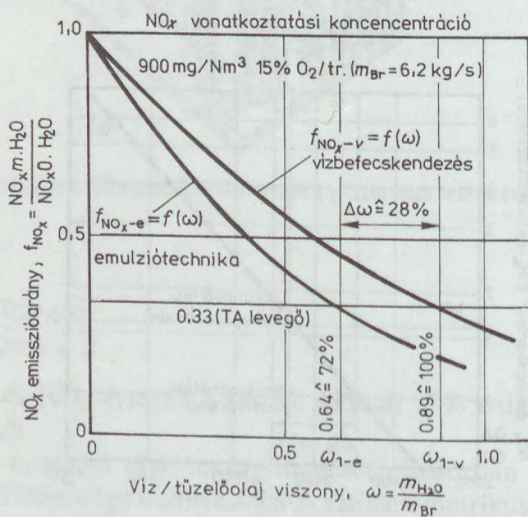
A CO - és NO_x -értékek a távozó gázban 15% oxigéntartalomra vonatkoznak.

A NO_x -tartalom tüzelőanyag-függését elsősorban az égési hőmérséklet különbsége befolyásolja. A sztöchiometrikus hőmérséklet függvényében a NO_x -emisszió változását a 7.24. ábra mutatja.

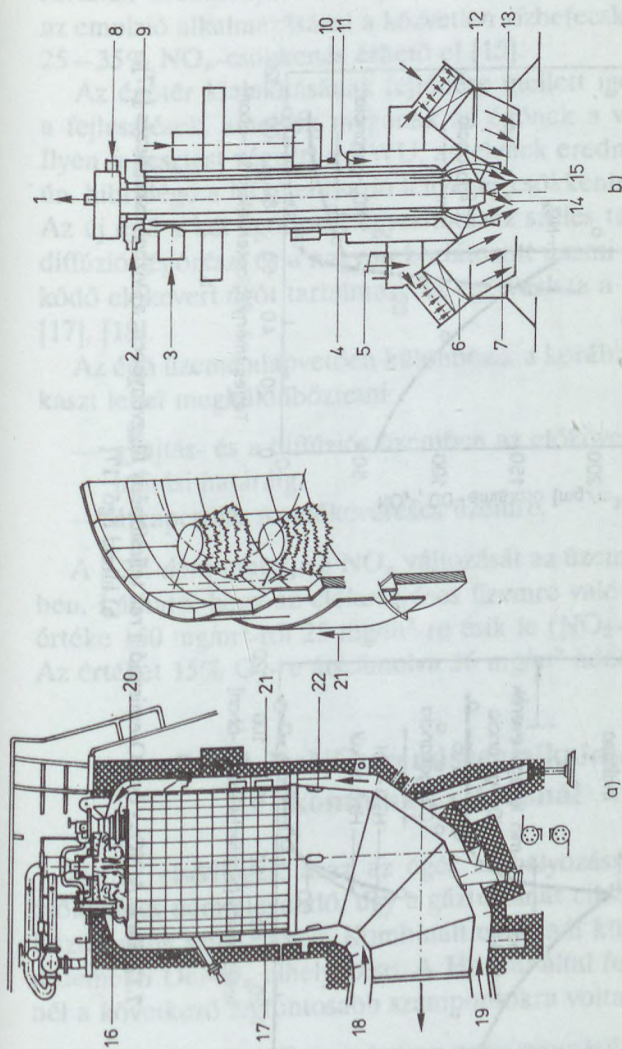
Olajtüzelésnél a NO_x csökkentésére régen ismert módszer a gőz- vagy vízbefúvatás az égőkamrába. Nagy turbináknál 1985-ben vé-



7.24. ábra. A sztöchiometrikus hőmérséklet hatása a NO_x -emisszióra [15]

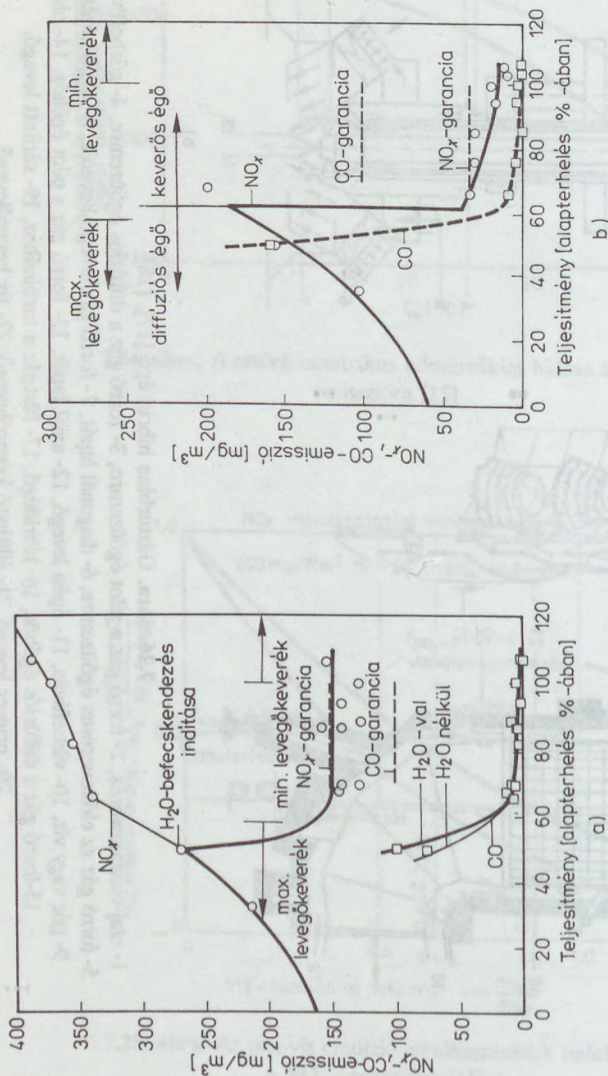


7.25. ábra. Az olaj-víz emulzió alkalmazásának befolyása a NO_x -emisszióra [15]



7.26. ábra. Gázturbina hibrid égő [17], [18]

1-olaj-visszakeverés, 2-forró gáz a pilot égőüzemre, 3-forró gáz a diffúziós égőüzemre, 4-gőzbefűtés, 5-forró gáz az előkeveréses égőüzemre, 6-diagonál lapát, 7-forró gáz/levegő keverék, 8-olajbetáplálás, 9-gőz vagy víz, 10-vízbefűtés, 11-égési levegő, 12-axiál lapát, 13-forró gáz a pilot égőhöz, 14-olaj, 15-forró gáz a diffúziós égőhöz, 16-hibridégő, 17-füstgáz a turbinához, 19-sűrített levegő, 20-primer levegő, 21-állítható keverőlevegő, 22-fix keverőlevegő



7.27. ábra. A NO_x - és CO-emisszió a rel. teljesítmény függvényében: a) vízbefecskendezés [17], b) hibrid égő [17]

geztek kísérleteket Svájcban olaj-víz emulzió alkalmazására. A kísérletek eredményeit mutatja a 7.25. ábra. Megállapítható, hogy az emulzió alkalmazásával a közvetlen vízbefecskendezéshez képest 25–35% NO_x -csökkenés érhető el [15].

Az égőtér kialakításának fejlődése mellett igen jelentősek azok a fejlesztések, amelyek magának az égőnek a változásait jelentik. Ilyen fejlesztést végzett a KWU, amelynek eredményeként létrejött ún. hibridégő a NO_x -emisszió lényeges csökkentését eredményezte. Az új égő a két égőtípust egyesíti, azaz széles tartományban stabil diffúziós égőrészt és a nagyon korlátozott üzemi tartományban működő előkevert égőt tartalmaz. Az égő vázlata a 7.26. ábrán látható [17], [18].

Az égő üzeme alapvetően különbözik a korábbi égőtől. Két szakaszt lehet megkülönböztetni:

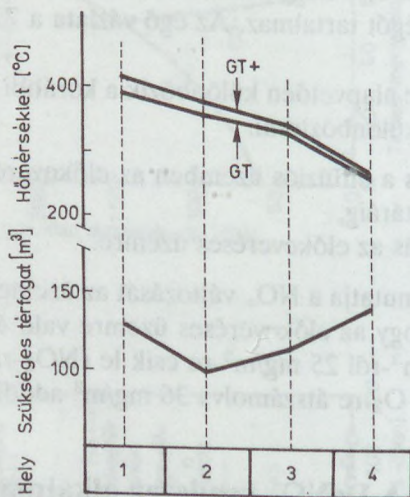
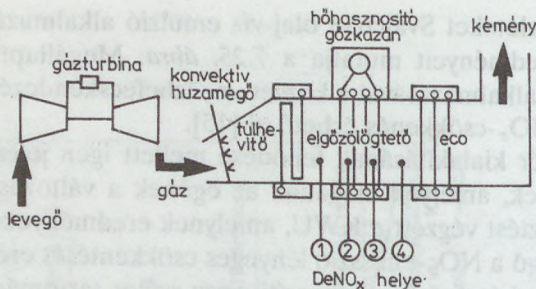
- gyújtás- és a diffúziós üzemben az előkeveréses égő alsó stabilitási határáig,
- átkapcsolás az előkeveréses üzemre.

A 7.27. ábra mutatja a NO_x változását az üzemeltetés függvényében. Látható, hogy az előkeveréses üzemre való áttéréskor a NO_x értéke 150 mg/m^3 -ról 25 mg/m^3 -re esik le (NO_2 -ra vonatkoztatva). Az értéket 15% O_2 -re átszámolva 36 mg/m^3 adódik [17].

7.3. A DeNO_x rendszer alkalmazása kombinált ciklusnál

Ha az elsődleges, azaz az égés szabályozással elérhető NO_x -csökkentés nem elegendő, úgy a gázturbinás ciklusnál is NO_x -leválasztás válik szükségessé. Kombinált ciklusnál különleges figyelmet érdemel a DeNO_x elhelyezése. A Hitachi által fejlesztett rendszer-nél a következő legfontosabb szempontokra voltak tekintettel:

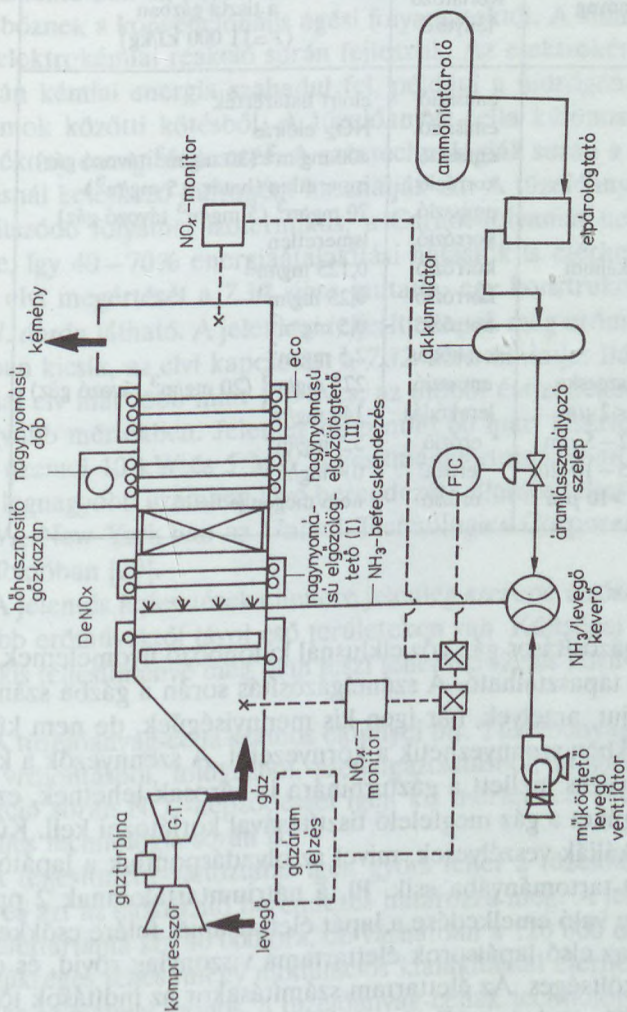
- kompakt DeNO_x -rendszer a nagy nyomású elgőzölögtető hőmérséklet-tartományban helyezkedjen el,
- a gázturbinával együtt biztosítsa a gyors indulást és leállást,



7.28. ábra. A katalizátor helyének befolyása a katalizátor mennyiségére [19]

- a katalizátoron kis nyomásesés legyen,
- jól szabályozható ammóniabefúvás mellett rövid távon keveredés legyen.

A minimális katalizátorigény meghatározásához az elhelyezés helyének befolyását mutatja a 7.28. ábra. A folyamatábra látható a 7.29. ábrán. A berendezés működésének kulcsa az ammóniaszabályozás.



7.29. ábra. A katalizátoros megoldás folyamatábrája [19]

7.1. táblázat

Káros anyag	Korlátozó tényező	Megengedhető koncentráció a tiszta gázban ($F=11\ 000\ \text{kJ/kg}$)
Kén	emisszió	előírt határérték
Nitrogén	emisszió	NO_x előírás
Klór	emisszió	$400\ \text{mg/m}^3$ ($30\ \text{mg/m}^3$ távozó gáz)
	korrózió	ismeretlen (határ $0,5\ \text{mg/m}^3$)
Fluor	emisszió	$70\ \text{mg/m}^3$ ($5\ \text{mg/m}^3$ távozó gáz)
	korrózió	ismeretlen
Nátrium, kálium	korrózió	$0,125\ \text{mg/m}^3$
Ólom	korrózió	$0,25\ \text{mg/m}^3$
Cink	korrózió	$0,5\ \text{mg/m}^3$
Kalcium	lerakódás	$2,5\ \text{mg/m}^3$
Összes részecske	emisszió	$275\ \text{mg/m}^3$ ($20\ \text{mg/m}^3$ távozó gáz)
Szemcse $< 2\ \mu\text{m}$	lerakódás	$140\ \text{mg/m}^3$
Szemcse $2 - 5\ \mu\text{m}$	erózió	$5,5\ \text{mg/m}^3$
Szemcse $5 - 10\ \mu\text{m}$	erózió	$0,4\ \text{mg/m}^3$
Szemcse $> 10\ \mu\text{m}$	erózió	nem megengedhető

A szénelgázosításos gáz-gőz ciklusnál különböző nyomelemek kibocsátása is tapasztalható. A szénelgázosítás során a gázba számos olyan elem jut, amelyek, bár igen kis mennyiségűek, de nem kívánatos mértékben szennyezhetik a környezetet. A szennyezők a környezetszennyezés mellett a gázturbinára is károsak lehetnek, ezért a mennyiségüket a gáz megfelelő tisztításával korlátozni kell. Különösen az alkáliák veszélyesek, mivel az olvadáspontjuk a lapátozás hőmérséklet-tartományába esik. Pl. a nátriumtartalomnak 2 ppm-ről 4 ppm-re való emelkedése a lapát élettartamát felére csökkenti. Különösen az első lapátsorok élettartama viszonylag rövid, és cseréjük igen költséges. Az élettartam számításakor az indítások többszörös óraszámával veendő figyelembe. A 7.1. táblázat áttekintést ad a Németországban érvényes gázszennyezők megengedhető értékeiről.

7.4. Tüzelőanyag-cellák (fuel cells)

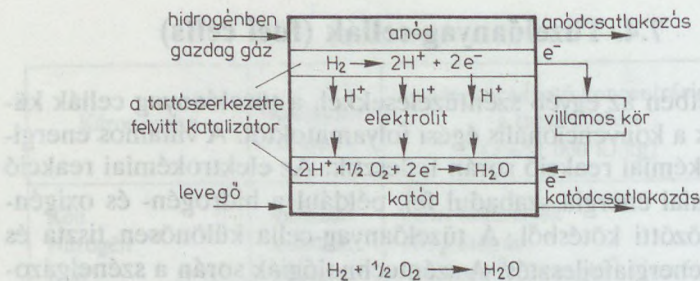
Ellentétben az egyéb széntüzelésekkel, a tüzelőanyag cellák különböznek a konvencionális égési folyamatoktól. A villamos energiát elektrokémiai reakció során fejlesztik. Az elektrokémiai reakció során kémiai energia szabadul fel, például a hidrogén- és oxigénatomok közötti kötésből. A tüzelőanyag-cella különösen tiszta és hatékony energiafejlesztés. A széntekológiák során a szénelgázosításnál keletkező hidrogént használják fel. A tüzelőanyag-cellában lejátszódó folyamat izotermikus, a Carnot-folyamat nem érvényes erre, így 40–70% energiaátalakítási hatásfok is elérhető. Az eljárás elvi megértését a 7.30. ábra mutatja, egy konstrukciós vázlat a 7.31. ábrán látható. A jelenlegi teljesítmények még erőművi viszonylatban kicsik, az elvi kapcsolást a 7.32. ábra mutatja. Bár a technológiai elv már több mint 150 éves, az utóbbi évtizedekben fejlődött nagyobb mértékben. Jelenleg több mint 60 ipari kísérleti berendezés üzemel 10 kW és 5 MW teljesítménytartományban. Jelenleg a két legnagyobb üzemben lévő berendezés villamos teljesítménye 4,5 MW_e, New York-ban az United Technologies Corporation (UTC) és Tokióban [29].

A jelentős fejlesztések ellenére jelenleg szerepe elsősorban a nagyobb erőművektől távol eső területeken van. Költségei és viszonylag kis teljesítménye még nem teszi lehetővé széles körű alkalmazását.

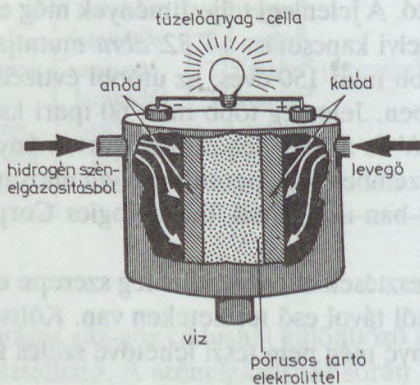
A tüzelőanyag-cella számos előnnyel bír. Tüzelőanyaga származhat vízbontásból, földgázból, szénelgázosításból, biogázból stb. A reakció során NO_x-képződéssel igen kis mértékben kell számolni, a teljes technológia során is.

A teljesítmény-változtatás igen gyors lehet a tüzelőanyag-cellánál, és azt az előkészítő berendezés határozza meg. A jelenlegi cellák élettartama kb. 40 000 óra, de várhatóan a 120 000 órát is eléri. A szükséges teljesítmény modulációs kialakítással elérhető.

Bár az alapelv azonos, a tüzelőanyag-cellák technológiai kialakítása igen nagy változatosságot mutat. A jelenlegi fejlesztések alapvetően a következő típusok közé sorolhatók.



7.30. ábra. A tüzelőanyag-cella (fuel cell) elve [29]



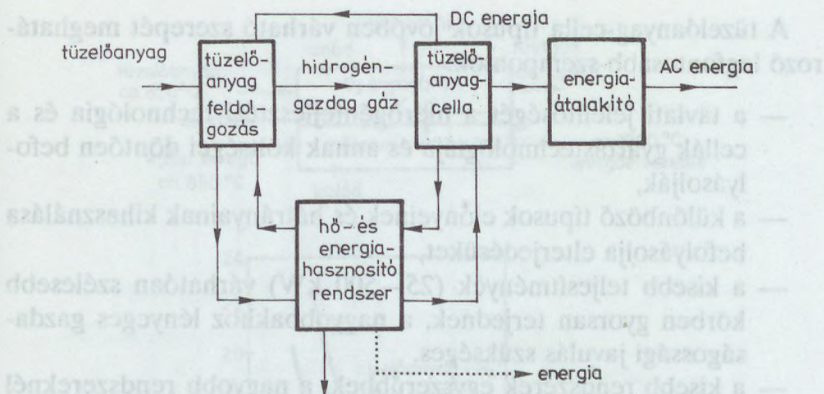
7.31. ábra. A tüzelőanyag-cella felépítése [29]

Alkáli tüzelőanyag-cellák (AFC)

Jelenleg néhány MW összteljesítmény van üzemben. A gyártó cégek a Siemens, Elenco Belgiumban. E típusnál tiszta hidrogén szükséges. Jelenleg nagy nyomású kivitelben is fejlesztik.

Foszforsavas tüzelőanyag-cellák (PAFC)

Körülbelül 30 éve fejlesztették ki. A jelenlegi 60–80 °C helyett fejlesztenek 200 °C-on üzemelő berendezést.



7.32. ábra. Tüzelőanyag-cellás erőmű elvi felépítése [29]

Folyékony karbonátos tüzelőanyag-cellák (MCFC)

Mindössze 10 éve fejlesztették ki. Probléma van az elektróda-kinetikával és tömegtranszporttal. Vezetőképes kerámiával kísérleteznek. Az elektrolitkezeléssel is problémák vannak.

Egyéb tüzelőanyagcella-típusok

Az említett főbb típusokon kívül három egyéb típus is említésre méltó, nevezetesen a szilárd oxidos tüzelőanyag-cella (SOFC), a közvetlen metanolos tüzelőanyag-cella (DMFC), és a szilárd polimeres tüzelőanyag-cella (SPFC). A legnagyobb szilárd oxidos teljesítménye 5 kW. Előnye, hogy különösen magas hőmérséklet alkalmazható, továbbá a tüzelőanyag közvetlen a katalizátorban hidrogénre bontható. A szilárd polimeresnél igen nagy áramsűrűség (kb. 4 A/cm) érhető el.

A tüzelőanyag-fejlesztés iránya elsősorban hőmérséklet-növelésre irányul. Magas hőmérsékleten versenyképessége gázturbinás ciklusba történő bekapcsolásával jelentősen növelhető. A teljes energiafejlesztés hatásfoka így jelentősen javul.

A tüzelőanyag-cella típusok jövőben várható szerepét meghatározó legfontosabb szempontok:

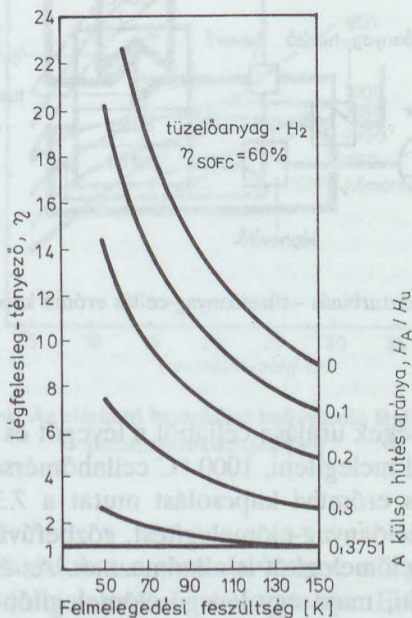
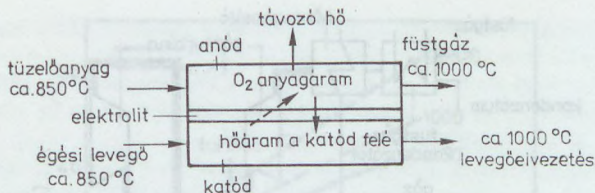
- a távlati jelentőségét a hidrogénfejlesztési technológia és a cellák gyártástechnológiája és annak költségei döntően befolyásolják,
- a különböző típusok előnyeinek és hátrányainak kihasználása befolyásolja elterjedésüket,
- a kisebb teljesítmények (25–500 kW) várhatóan szélesebb körben gyorsan terjednek, 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.

7.5. 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-, illetve 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:

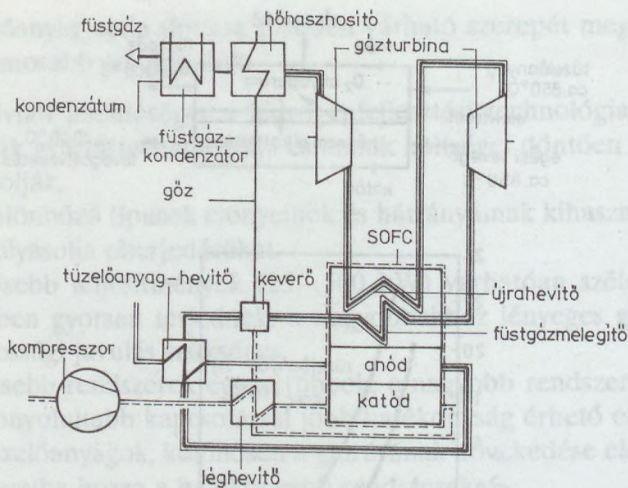
- az alacsony hőmérsékletű cella (pl. kálilúgos) 80 °C-on üzemel,
- a közepes hőmérsékletű cella (pl. foszforsavas) 200 °C tartományban,
- a magas hőmérsékletű cellák (megolvasztott karbonátos) 650 °C és



7.33. ábra. A cellahűtés befolyása a tűzelőanyag-cella üzemére [30]

— az oxidkerámiás cellák (szilárd oxidkerámia, Solid Oxid Fuel Cell SOFC) 1000 °C tartományban.

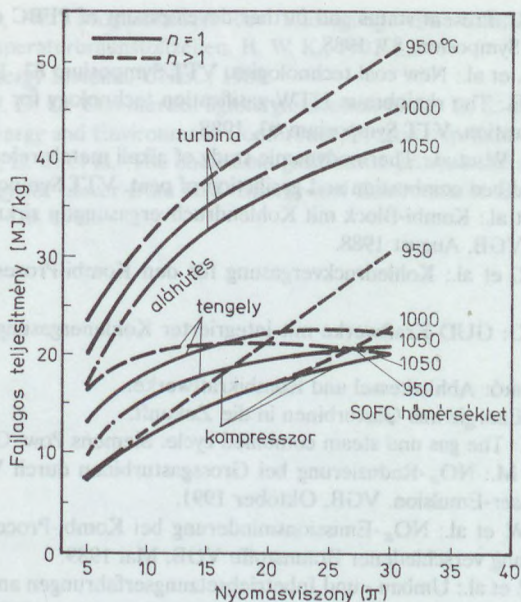
A cellák villamos hatásfoka 55 – 65%. A SOFT cellahűtést levegő-, illetve tűzelőanyag-felmelegítési folyamatba iktatva a hőmérsékletviszonyokat a 7.33. ábra mutatja. A legkedvezőbb hatásfok $n=1$ légfeleslegnél, azaz sztöchiometrikus viszonyoknál érhető el. A



7.34. ábra. Gázturbinás – tüzelőanyag-cellás erőmű kapcsolása [30]

fellépő hőfeszültségek uralása céljából a levegőt és a tüzelőanyagot kb. $850\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ra kell melegíteni, $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ cellahőmérsékletnél.

Egy lehetséges erőművi kapcsolást mutat a 7.34. ábra, amelyenél levegő- és tüzelőanyag-előmelegítést, gőzbefűvással gázturbinát és elgőzöltető előmelegítőt 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-, illetve a levegő-előmelegítőn keresztül áramolva lehűl. A tüzelőanyag és a levegő felmelegedve a hőhasznosító kazánban fejlesztett gőzzel keveredik. Ezt a fűtőgázt ismét a SOFC rendszerbe vezetik, és ott az integrált fűtőgáz-előmelegítőben felhevül. Ez a forró gáz expandál a gázturbinában. A gázturbina után helyeznek el egy hőhasznosító kazánt és egy fűtőgáz-kondenzátort, a szükséges tápvíz-mennyiség egy részének fedezésére.



7.35. ábra. Az elérhető hatásfokot befolyásoló legfontosabb paraméterek hatása [30]

Az elérhető hatásfokot a nyomásviszony, a légfelesleg-tényező és a cellahőmérséklet jelentősen befolyásolja. Ezt mutatja a 7.35. ábra. Magas hőmérsékletű celláknál a cellákra és a hőhasznosítókra számos kapcsolás elképzelhető [30].

Irodalom a 7. fejezethez

1. U. S. Department of Energy: Clean Coal Technology, Washington, Jan. 1991.
2. A British Coal Environmental Review: Coal and the Climate. British Coal, 1990.
3. SZABÓ I. és mtsai: Szénelgázosítási technológiák. BME tanulmány, Budapest, 1989.
4. KURKELA, E. et al.: Gasification combined cycle power generation. VTT Symposium 83, Espoo, 1988.

5. PILLAI, K. K.: Present status and further development of PFBC combined cycle plant. VTT Symposium 83, 1988.
6. MÜLLER, R. et al.: New coal technologies. VTT Symposium 83, 1988.
7. NITSCHKE, E.: The rheinbraun HTW-gasification technology for combined cycle power generation. VTT Symposium 83, 1988.
8. MOJTAHEDI, W. et al.: Thermodynamic study of alkali metals release in pressurized fluidized-bed combustion and gasification of peat. VTT Symposium 83, 1988.
9. BADE, H. et al.: Kombi-Block mit Kohlendruckvergasung in zirkulierender Wirbelschicht. VGB, August 1988.
10. MÜLLER, R. et al.: Kohledruckvergasung für den Kombi-Prozess. VGB, 1988.
11. Siemens AG: GUD-Kraftwerke mit integrierter Kohleenergasung. Siemens AG, Jan. 1990.
12. WAGNER-BIRÓ: Abhitzkessel und Kombikraftwerke.
13. AEG: Mit Energie aus Gasturbinen in die Zukunft.
14. KELLER, W.: The gas and steam combined cycle. Siemens Pow. Gen., Oct. 1990.
15. FREIMARK, M.: NO_x -Reduzierung bei Grossgasturbinen durch Verfeuerung einer Öl-Wasser-Emulsion. VGB, Oktober 1991.
16. SCHULCZ, W. et al.: NO_x -Emissionsminderung bei Kombi-Processen unter Berücksichtigung verschiedener Braunstoffe VGB, Mai 1989.
17. ADAMSKI, P. et al.: Umbau - und Inbetriebsetzungserfahrungen an auf NO_x -arme Verbrennung umgerüsteten Gasturbinen. VGB, September 1992.
18. MÜLLER, E.: 10 Jahre Betriebserfahrungen mit einer Gas-Dampfturbinen-Heizkraftanlage im Kraftwerke süd der Stadtwerke München. VGB, August 1992.
19. MURAKAMI, T. et al.: DeNO_x system for combined cycle power plants. Hitachi Review, 1989. 3.
20. PINTSCH, S. et al.: Alkalienheissgasreinigung beim GUD-Prozess. VGB, Januar 1991.
21. British Coal: The British Coal Topping Cycle.
22. KREITMEIER, F. et al.: Wirtschaftliche Bewertung von Methoden zur NO_x -Reduction bei Gasturbinen. VGB, März 1991.
23. A British Coal Environmental Review: Coal and the Climate.
24. PETERS, W.: Coal Gasification Technologies for Combined Cycle Power Generation. Electricity, Lund University Press, 1989.
25. RALPH, W. et al: Preliminary environmental monitoring results for the cool water coal gasification program. EPRI 6th Annual Conference, 16. Sept. 1986.
26. FRANZ, E.: Betriebserfahrungen an einem 380-MW-Kombi-Block bei Langzeit- und Störungshaltung der Gasturbine. VGB, Juni 1990.
27. HOLIGHAUS, R.: Aufgaben und Ergebnisse des Forschungsgebietes "Kohlentechnologien". VGB, Dezember 1977.
28. RICHARDS, P. C. et al.: The shell coal gasification process. European Seminar, London, 18–20. Febr. 1992.
29. BLOMEN, J. M. J.: Fuel Cells. Electricity, Lund University Press, 1989.

30. WINKLER, W.: Möglichkeiten der Auslegung von Kombikraftwerken mit Hochtemperaturbraunstoffzellen. B. W. K., 1992. 12.
31. KRW Energy Systems. UNEC, 1988.
32. POLLOCH, D. C.: Commercial lignite gasification in the U. S. at the great Plains Plant. Energy and Environment Conference, Prague, April 20—23, 1992.
33. HEYMAN, E. C. et al.: The Shell Coal gasification process the clean and efficient technology for power from coal. Energy and Environment Conference, Prague, April 20—23, 1992.

8. A KLÍMA VÁLTOZÁSA ÉS AZ ENERGETIKA

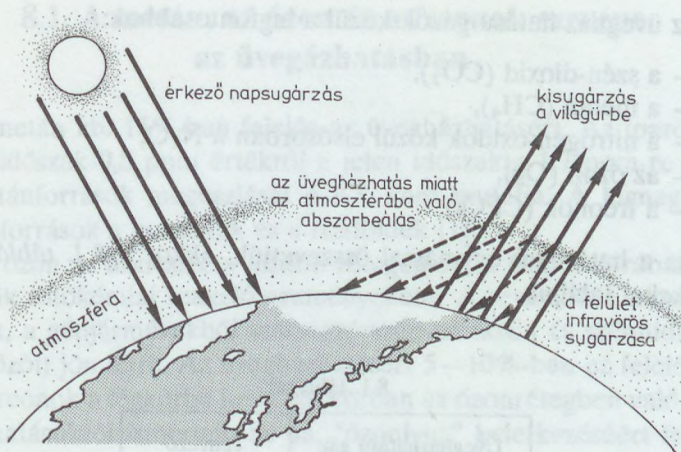
Ha környezetünkéről beszélünk, akkor — bár az utóbbi időben egységes rendszerről esik szó, de mégis — a következő részek kölcsönhatásában kell gondolkodjunk:

- atmoszféra, a Földünket körülvevő gázburrok,
- hidroszféra, az óceánokban, tengerekben, folyókban, tavakban stb. lévő víztömeg,
- krioszféra, a sarkokon, a gleccserekben, a hegyekben található jég és hó,
- litoszféra, a szilárd Föld és alapzat stb.,
- a bioszféra, mindent beleértve, a vegetációt, az állatokat és az embert is.

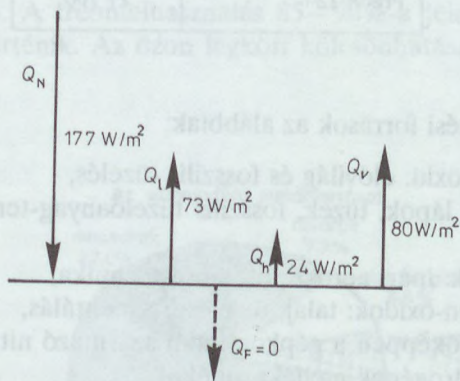
A Föld energiaháztartását alapvetően befolyásolja a Napból érkező energia és a Föld által a világűrbe kisugárzott energia különbsége. Ez az energiakülönbség függ a Földet körülvevő légkör összetételétől, különösen a nedvességtartalom, a szén-dioxid és más gázok mennyiségétől.

Az energiasugárzási viszonyok vázlatát a 8.1. ábra mutatja. Számszerű értékeket a jelenlegi mérési adatok szerint az energiaháztartásra W/m^2 értékben a 8.2. ábrán láthatunk [12], [13]. A mérési pontosság $10-20 \text{ W/m}^2$.

A légkör összetételének alakulásában jelentős szerepe van az emberi tevékenységnek, így az energetikának is. Különösen néhány gáz befolyásolja jelentősen az energiaáramlást, és ezeket gyűjtőnévvel üvegház hatású gázoknak nevezték el.



8.1. ábra. A Föld és a világűr sugárzási viszonyai [1]



8.2. ábra. A Föld és a világűr sugárzási értékei számszerűsítve [12]

Q_N a Napsugárzás (középérték),

Q_l a hosszuhullámú sugárzás,

Q_h a rövidhullámú sugárzás,

Q_F a Föld által elnyelt sugárzás,

Q_v a vizek párologtatására fordított hő

Az üvegház hatású 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).

Ha a hatásukat egymással összevetjük, akkor a 8.1. táblázatbeli értékeket találjuk.

8.1. táblázat

Üvegházhatású gáz	Tényező
Szén-dioxid	1
Metán	27
Nitrogén-oxid (N_2O)	165
Freon-12	17 700

A keletkezési források az alábbiak:

- szén-dioxid: élővilág és fosszilis tüzelés,
- metán: lápok, tüzek, fosszilis tüzelőanyag-termelés és -bomlás,
- freonok: ipar, aeroszolok, hűtéstechnika,
- nitrogén-oxidok: talaj, tüzelés, fermentálás,
- ózon: főképpen a gépkocsikból származó nitrogén-oxidok és szénhidrogének mellékterméke.

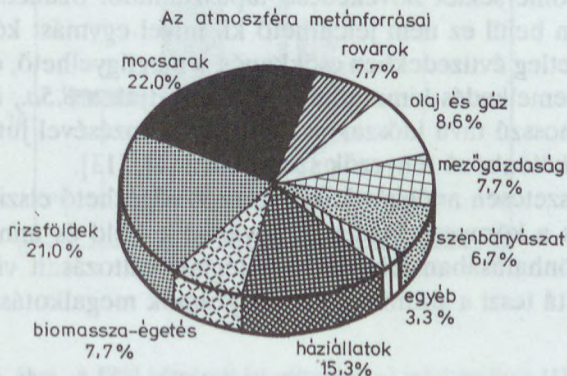
Elöljáróban röviden értékeljük az üvegház hatású gázok hatását, majd részletesen kitérünk a CO_2 -ra mint az energetikával legszorosabb kapcsolatban lévő gáztermékre, végül rövid ismertetést adunk a N_2O szerepéről.

8.1. A metán, az ózon és a freonok szerepe az üvegházhatásban

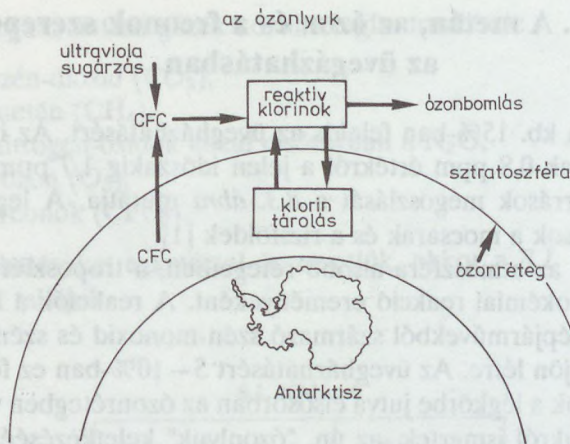
A metán kb. 15%-ban felelős az üvegházhatásért. Az iparosítás előtti időszak 0,8 ppm értékről a jelen időszakig 1,7 ppm-re nőtt. A metánforrások megoszlását a 8.3. ábra mutatja. A legnagyobb metánforrások a mocsarak és a rizsföldek [1].

Az ózon az atmoszféra alsóbb rétegeiben, a troposzférában keletkezik fotokémiai reakció eredményeként. A reakciók a nitrogén-oxidok, a gépjárművekből származó szén-monoxid és szénhidrogének között jön létre. Az üvegházhatásért 5 – 10%-ban ez felelős.

A freonok a légkörbe jutva elsősorban az ózonrétegben való romboló hatásukról ismertek, az ún. "ózonlyuk" keletkezéséért felelősek. Jelentős azonban a szerepük az üvegházhatás okozásában is, kb. 24%-ra tehető. Jelenleg a koncentrációjuk a légkörben alacsony, de gyorsan növekszik. A forrást az aeroszolképzők és a hűtéstechnika jelenti. A freonoknak 2000-ig történő kiiktatására nemzetközi egyezmény van. A freonfelhasználás 85 – 90%-a jelenleg a fejlett országokban történik. Az ózon légköri kölcsönhatásait a 8.4. ábra mutatja [1].



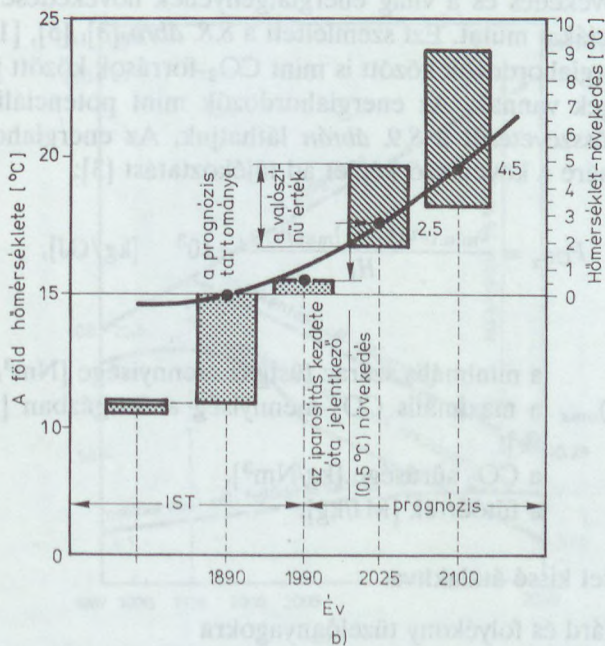
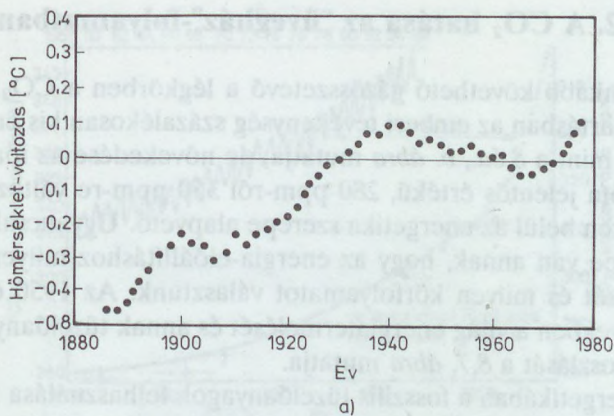
8.3. ábra. A metánforrások megoszlása [1]



8.4. ábra. Az ózon és a légkör kölcsönhatása [1]

Az utóbbi évtizedekben a légköri változások kutatását jelentősen segítette a technika fejlődése. Az eredmények birtokában a különböző tényezők és a hatások intenzív értékelése, elemzése folyik. Természetesen még igen sok a feltételezés és bizonytalanság. Biztonságosan megállapítható azonban, hogy az utóbbi 100 évben az átlagos hőmérséklet növekedése tapasztalható. Szűkebb időtartományokon belül ez nem jelenthető ki, mivel egymást követő években és esetleg évtizedekben csökkenés is megfigyelhető, de hosszabb távon az emelkedés kimutatható. Ezt láthatjuk a 8.5a., b. ábrán. A rövid és hosszú távú időszakok részletes elemzésével juthatunk közelebb a különböző tényezők szerepéhez [1], [13].

Természetesen a légkör kutatása nem végezhető elszigetelten. A világűr és a környező égitestek, továbbá a Föld és annak változásai kölcsönhatásában lehet csak a légkör változásait vizsgálni. Ez bonyolulttá teszi a számítógépes programok megalkotását is.



8.5. ábra. A Föld hőmérséklet-változása: a) mért értékek [1],
b) prognózis [13]

8.2. A CO₂ hatása az "üvegház"-folyamatban

A leginkább követhető gázösszetevő a légkörben a CO₂. Bár a CO₂-háztartásban az emberi tevékenység százalékosan kis értékben szerepel, mint a 8.6a., b. ábra mutatja, 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-előállításához milyen energiahordozót és milyen körfolyamatot választunk. Az 1950 és 2000 közötti években a világ energiatermelését és annak tüzelőanyag szerinti megoszlását a 8.7. ábra mutatja.

Az energetikában a fosszilis tüzelőanyagok felhasználása igen jelentős, ami jelentős CO₂-forrást is jelent. A népességnövekedés, a CO₂-növekedés és a világ energiaigényének növekedése hasonló tendenciákat mutat. Ezt szemlélteti a 8.8. ábra [3], [5], [14].

Az energiahordozók között is mint CO₂-források között jelentős különbségek vannak. Az energiahordozók mint potenciális CO₂-források összevetését a 8.9. ábrán láthatjuk. Az energiahordozók összevetésére a következő képlet ad tájékoztatást [3]:

$$P_{\text{CO}_2} = \frac{v_{\text{min.tr}} v(\text{CO}_2)_{\text{max}} \rho_{\text{CO}_2}}{H_i} \cdot 10^3 \quad [\text{kg/GJ}],$$

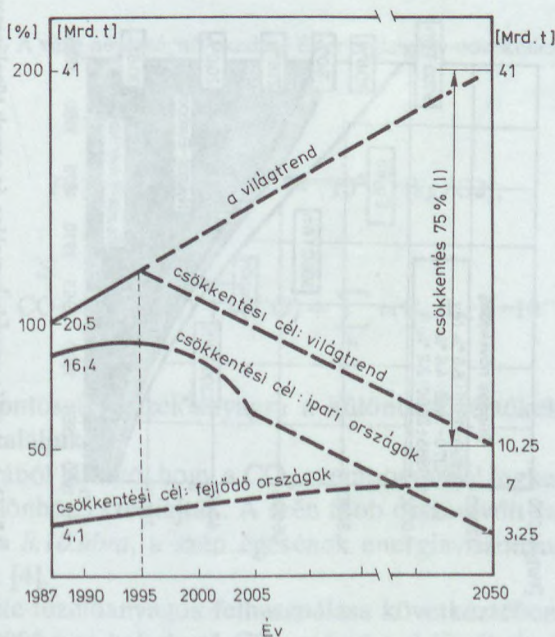
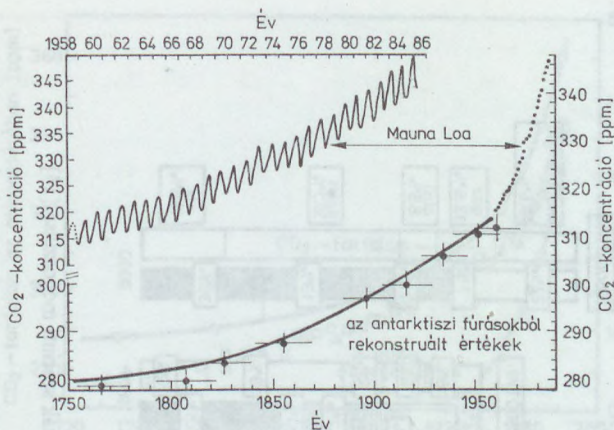
ahol

$v_{\text{min.tr}}$	a minimális száraz füstgáz mennyisége [Nm ³ /kg],
$v(\text{CO}_2)_{\text{max}}$	a maximális CO ₂ -mennyiség a füstgázban [térfogat %],
ρ_{CO_2}	a CO ₂ sűrűsége [kg/Nm ³],
H_i	a fűtőérték [MJ/kg].

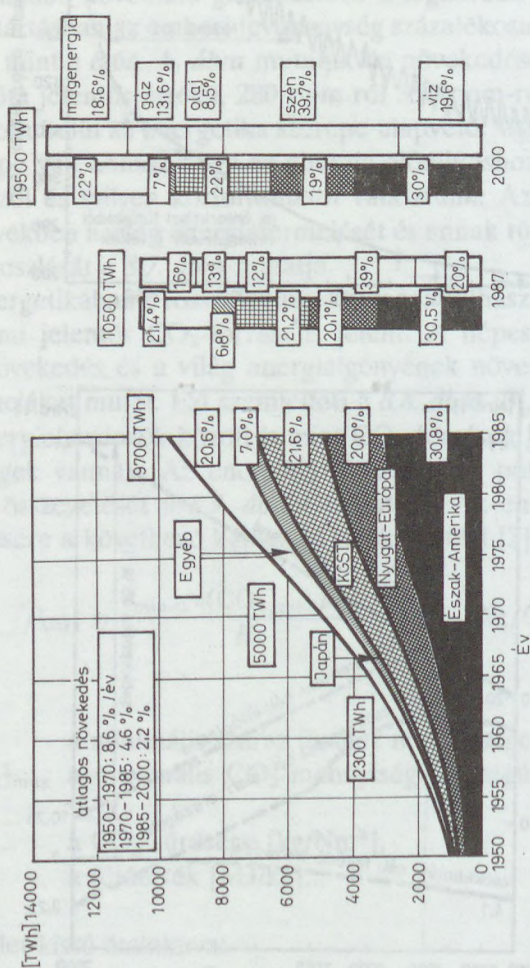
A képlet kissé átalakítva:

— szilárd és folyékony tüzelőanyagokra

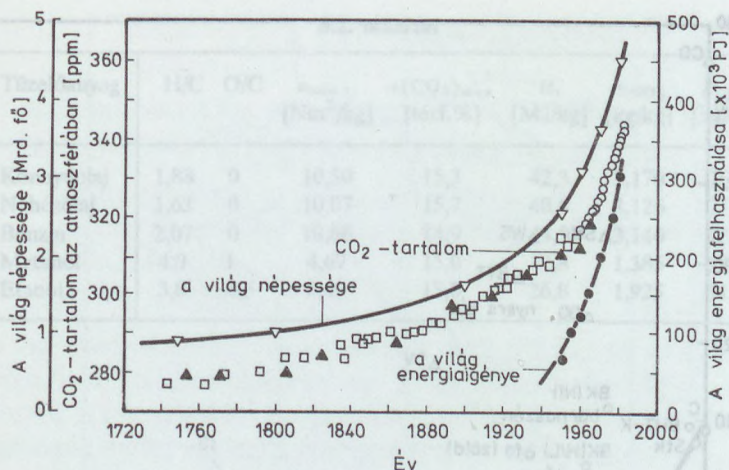
$$P_{\text{CO}_2} = \frac{1,867 C \rho_{\text{CO}_2}}{H_i} \cdot 10^3 \quad [\text{kg/GJ}],$$



8.6. ábra. A CO₂-koncentráció növekedése [5]



8.7. ábra. A világ energiatermelése és annak tüzelőanyag-fajták szerinti megoszlása [14]



8.8. ábra. A világ népességnövekedése és energiaigény-növekedése [3]

— gázra

$$P_{CO_2} = \frac{(\sum CO_2) \rho_{CO_2}}{H_i} \cdot 10^3 \quad [\text{kg/GJ}],$$

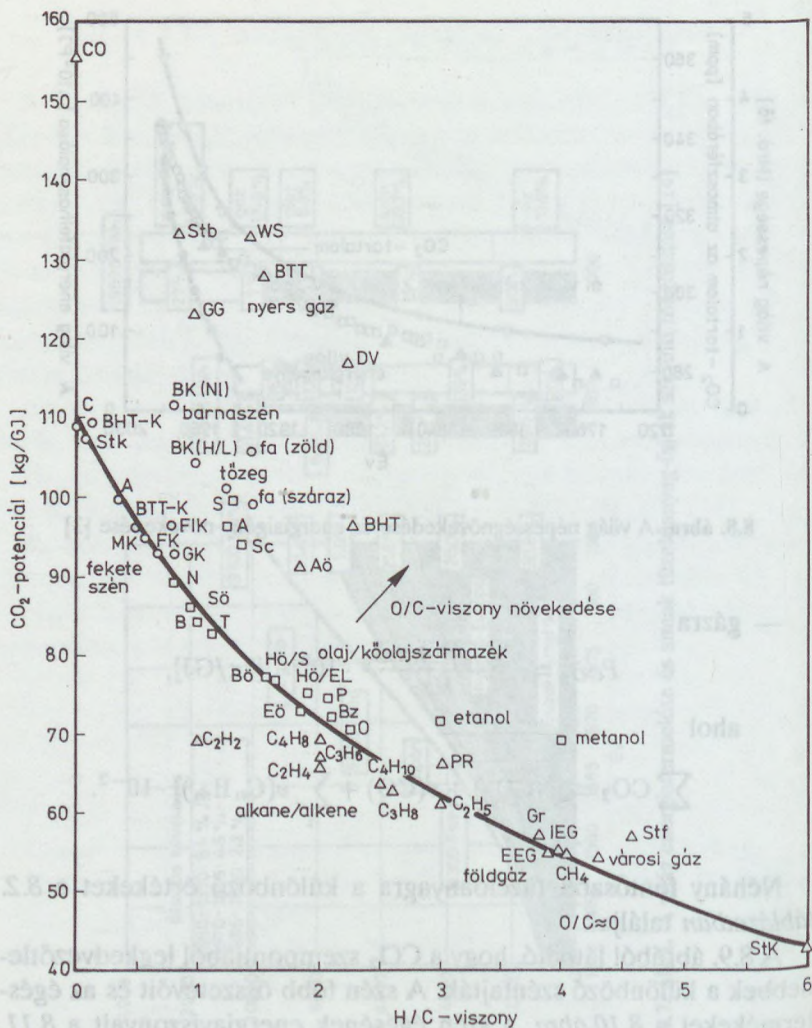
ahol

$$\sum CO_2 = [v(CO_2) + v(CO) + \sum_n v(C_n H_m)] \cdot 10^{-2}.$$

Néhány fontosabb tüzelőanyagra a különböző értékeket a 8.2. táblázatban találjuk.

A 8.9. ábrából látható, hogy a CO_2 szempontjából legkedvezőtlenebbek a különböző szénfajták. A szén főbb összetevőit és az égéstermékeket a 8.10. ábra, a szén égésének energiaviszonyait a 8.11. ábra mutatja [4].

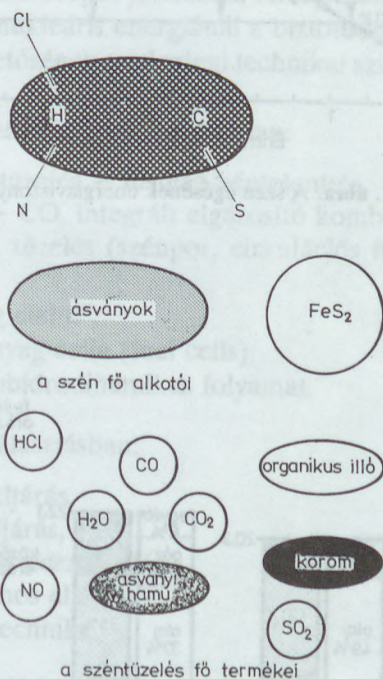
A különféle tüzelőanyagok felhasználása következtében keletkezett, illetve 2005-ben keletkező CO_2 -arányt a 8.12. ábrán láthatjuk, bejelölve a Torontóban kötött egyezmény által megengedhető értéket. Az egyes oszlopok Mrd t CO_2 /év értékben és %-ban is megadják a CO_2 -mennyiségeket [3].



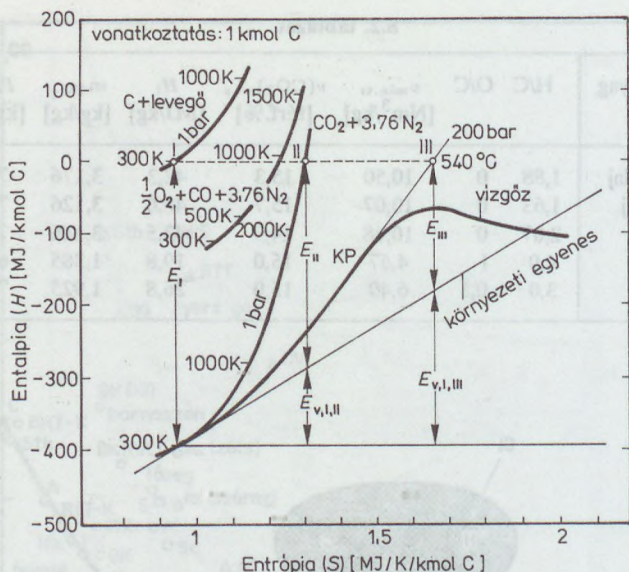
8.9. ábra. Az energiahordozók mint potenciális CO₂-források [3]

8.2. táblázat

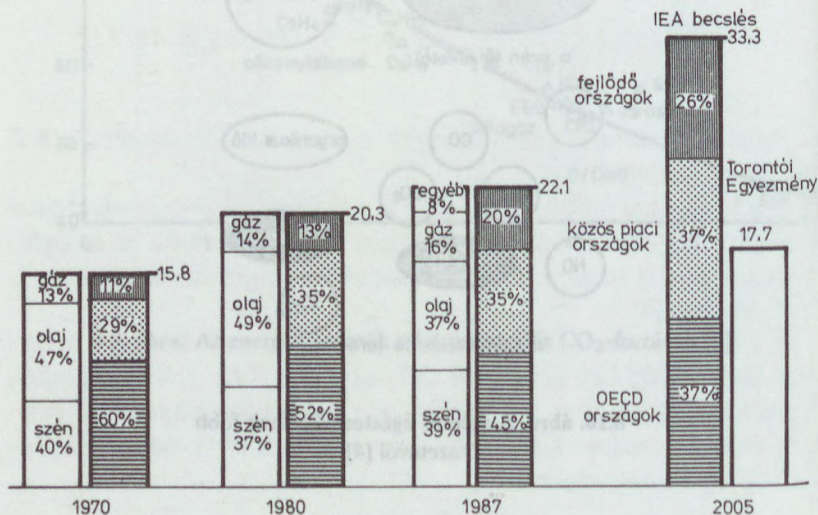
Tüzelőanyag	H/C	O/C	$v_{\min.tr}$ [Nm ³ /kg]	$v(\text{CO}_2)_{\max}$ [térf. %]	H_i [MJ/kg]	m_{CO_2} [kg/kg]	P_{CO_2} [kg/GJ]
Könnyűolaj	1,88	0	10,50	15,3	42,3	3,176	75,1
Nehézolaj	1,63	0	10,07	15,7	40,6	3,126	77,0
Benzin	2,07	0	10,68	14,9	43,5	3,146	72,3
Metanol	4,0	1	4,67	15,0	19,8	1,385	69,9
Etanol	3,0	0,5	6,49	15,0	26,8	1,925	71,8



8.10. ábra. A szén és égéstermékének főbb összetevői [4]



8.11. ábra. A szén égésének energiaviszonyai



8.12. ábra. A különböző tüzelőanyagokból keletkezett CO_2 mennyisége [3]

8.3. A CO₂ csökkentése

A keletkezett CO₂ mennyiségének csökkentésére a következő legfontosabb lehetőségek 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. E korlátok mellett egyéb szempontok is jelentős szerepet játszanak, mint például 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,
- O₂/CO₂ tüzelés (szénpor, cirkulációs fluid, nyomás alatti fluid),
- "topping ciklus",
- tüzelőanyag-cella (fuel cells),
- magnetohidrodinamikusan folyamat.

b) A CO₂-leválasztásban:

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

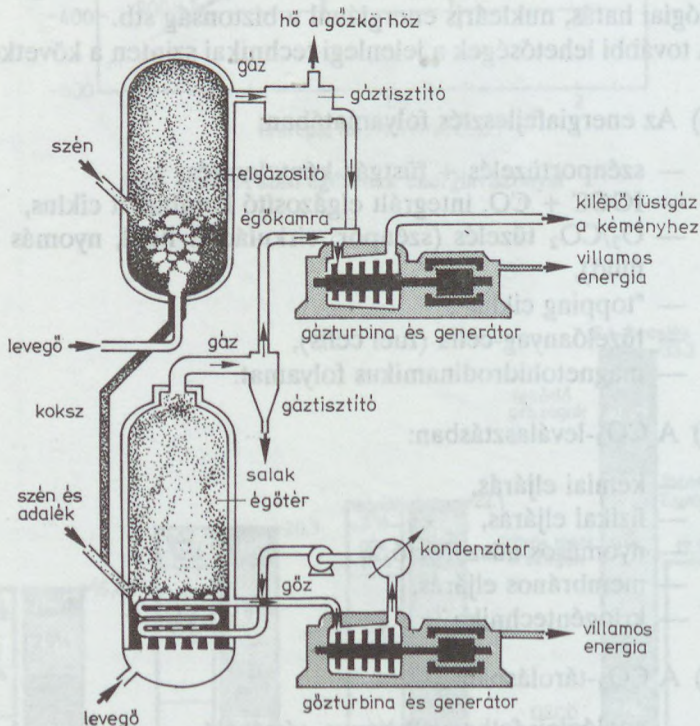
c) A CO₂-tárolásban:

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

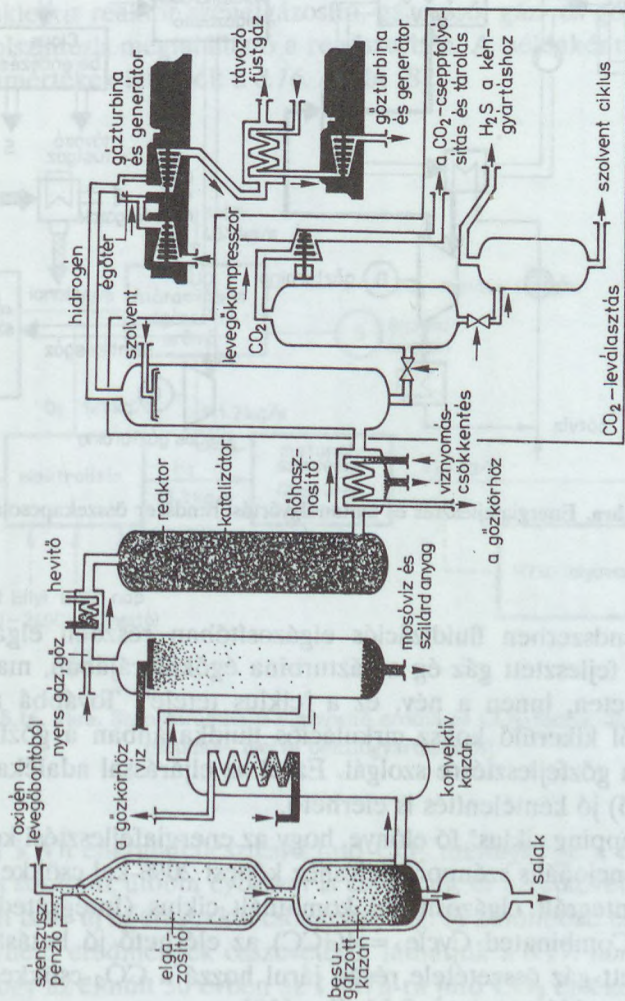
A következőkben a felsorolt megoldások közül csak néhányat mutatunk be példaként a CO₂-csökkentés lehetőségére.

8.3.1. Kombinált erőművek — A "topping ciklus" és az IGCC

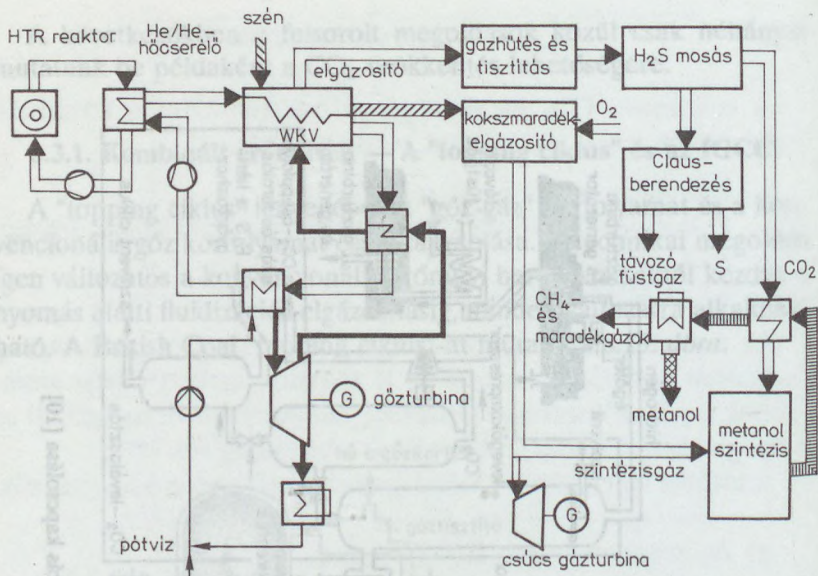
A "topping ciklus" lényegében a "gőz-gáz" körfolyamat és a konvencionális gőz körfolyamat összekapcsolása. A technikai megoldás igen változatos a konvencionális erőművi berendezésektől kezdve a nyomás alatti fluidizációs elgázosításig, minden változatra alkalmazható. A British Coal "topping ciklus"-át mutatja a 8.13. ábra.



8.13. ábra. A British Coal erőmű "topping ciklusa"



8.14. ábra. IGCC eljárás kapcsolása [10]



8.15. ábra. Energiafejlesztés és metanolgyártási rendszer összekapcsolása [8]

A rendszerben fluidizációs elgázosítóban részben elgázosított szénből fejlesztett gáz ég a gázturbina égőkamrájában, magas hőmérsékleten, innen a név, ez a "ciklus teteje". Továbbá az elgázosítóból kikerülő kokszt cirkulációs fluidkázánban a gőzfolyamat számára gőzfejlesztésre szolgál. Ezzel az eljárással adalékanyaggal (mészke) jó kéntelenítés is elérhető.

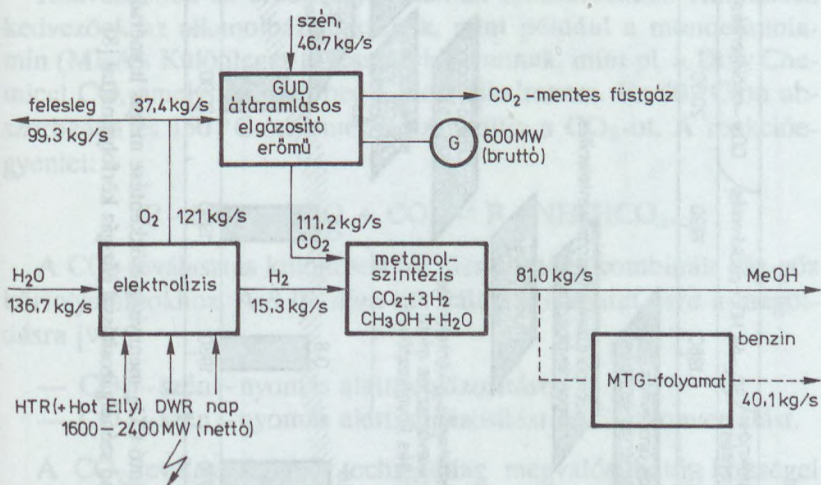
A "topping ciklus" fő előnye, hogy az energiafejlesztési költségek a konvencionális szénportüzeléshez képest 20%-kal csökkennek.

Az integrált elgázosítós kombinált ciklus (Integrated Gasification Combined Cycle = IGCC) az elérhető jó hatásfok és a fejlesztett gáz összetétele révén járul hozzá a CO_2 -csökkentéshez. Ilyen megoldást mutat a 8.14. ábra [10].

A CO_2 csökkentésére lényegesen bonyolultabb, az energiafejlesztés körfolyamatába iktatott eljárások is születtek.

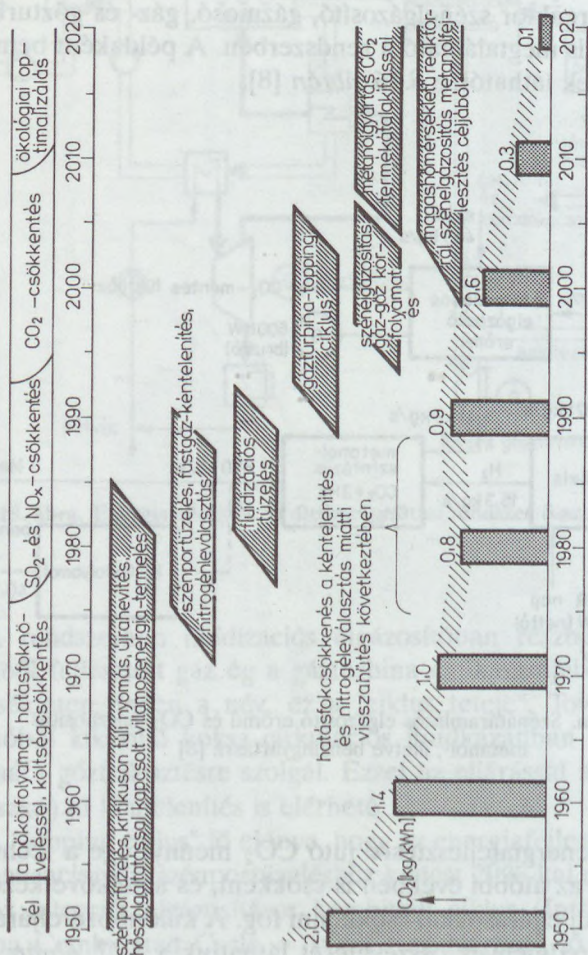
Az energiafejlesztést és a metanolgyártást összekapcsoló rend-

szert mutat a 8.15. ábra. A rendszer rendkívül bonyolult, és gyakorlatilag minden probléma megoldását célul tűzi ki a legkorszerűbb technikai elemek alkalmazásával. Korszerű magas hőmérsékletű nukleáris reaktor szénelgázosító, gázmosó, gáz- és gőzturbina, metanolszintézis megtalálható a rendszerben. A példaként bemutatott számértékek láthatók a 8.16. ábrán [8].



8.16. ábra. Szénátáramlásos elgázosító erőmű és CO₂-hasznosítás metanol-, illetve benzinyártásra [8]

Az 1 kWh energiafejlesztésre jutó CO₂ mennyisége a technikai fejlődés során az utóbbi években is csökkent, és az elkövetkezendő években is az új eljárásokkal csökkenni fog. A különböző eljárásokkal elérhető eredmények összevetését láthatjuk a 8.17. ábrán. Látható, hogy az elmúlt 50 évben az 1 kWh-ra jutó CO₂ értéke harmadára csökkent, és az elkövetkezendő húsz évben ennek az értéknek a hatodára való csökkenése várható [8].



8.17. ábra. Az 1 kWh-ra jutó CO₂-mennyiség csökkentése magas hőmérsékletű reaktorban történő szén-gáz-termeléssel kapcsolatos célkitűzések [8]

8.4. A CO₂ leválasztása

A CO₂-leválasztás legfontosabb megoldásait és energiaigényét a 8.18. ábra mutatja. Az atmoszférikus nyomású füstgázból a CO₂-leválasztás különböző fizikai szorpciós közegekkel lehetséges. Lényeges az oldhatóság mértéke, amelyet a nyomás jelentősen befolyásol, ezért a nagyobb nyomású füstgázmosók kedvezőbbek az atmoszférikusnál.

Kedvezőbbek az eredmények kémiai oldószerekkel. Különösen kedvezőek az alkanolbázisú szenek, mint például a monoetanolamin (MEA). Különleges fejlesztések is vannak, mint pl. a Dow Chemical CO, amely a Dow Spec 1 szert alkalmazza. Ez 40 °C-on abszorbeálja és 150 °C-on ismét felszabadítja a CO₂-ot. A reakcióegyenlet:

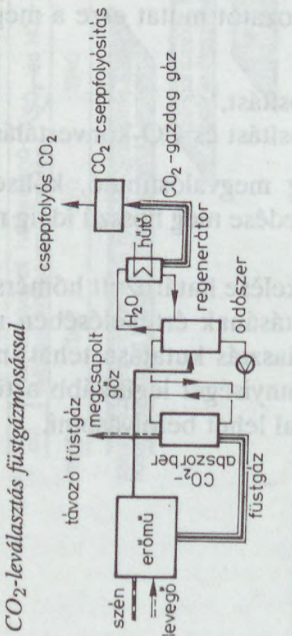
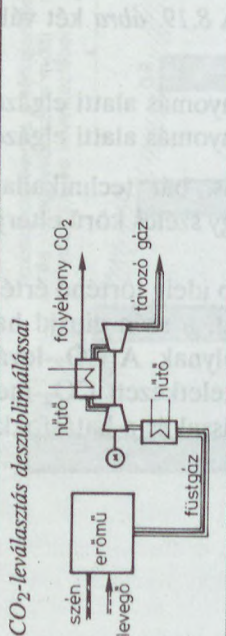
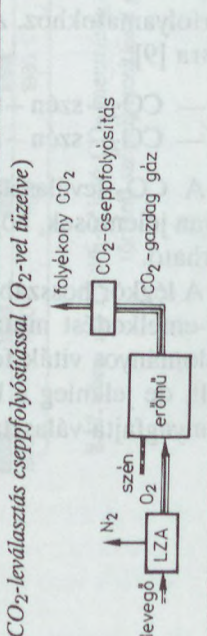


A CO₂-leválasztás különösen jól illeszthető a kombinált gáz-gőz körfolyamatokhoz. A 8.19. ábra két változatot mutat erre a megoldásra [9]:

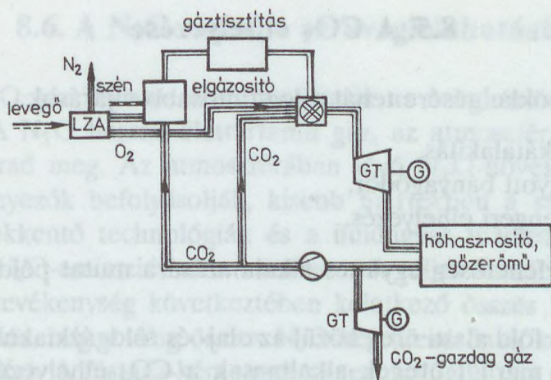
- CO₂ – szén – nyomás alatti elgázosítást,
- CO₂ – szén – nyomás alatti elgázosítást és CO-konvertálást.

A CO₂-leválasztás, bár technikailag megvalósítható, költségei olyan jelentősek, hogy széles körű elterjedése még hosszú ideig nem várható.

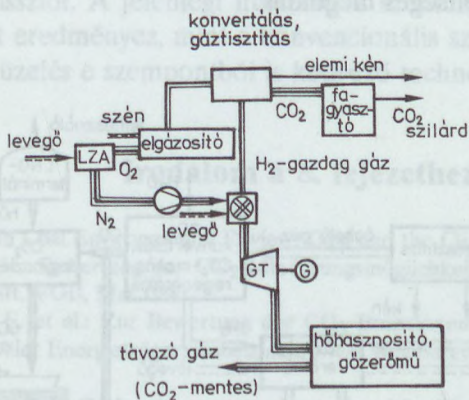
A légkör hosszabb ideig történő értékelése határozott hőmérséklet-emelkedést mutat, a szén-dioxid hatásának értékelésében még tudományos viták folynak. A CO₂-leválasztás kutatása tehát indokolt, de jelenleg a keletkezett CO₂-mennyiséget leginkább a tüzelőanyagfajta-választással és a hatásfokkal lehet befolyásolni.

Módszer és folyamatábra	Energiagény
<i>CO₂-leválasztás füstgázmosással</i> 	megcsapolt gőz (200 °C, 7 bar) 1,5 kWh_e/kg CO₂ → 0,435 kWh_e/kg CO₂ szivattyúk és fűvők 0,015 kWh_e/kg CO₂ CO₂-cseppfolyósítás 0,100 kWh_e/kg CO₂ 0,550 kWh_e/kg CO₂
<i>CO₂-leválasztás deszublimálással</i> 	CO₂-cseppfolyósítás 0,35 – 0,48 kWh_e/kg CO₂
<i>CO₂-leválasztás cseppfolyósítással (O₂-vel tüzelve)</i> 	levegőbontás 0,22 kWh_e/kg CO₂ CO₂-cseppfolyósítás 0,10 kWh_e/kg CO₂ 0,32 kWh_e/kg CO₂

8.18. ábra. A CO₂-leválasztás egyes módszereinek energiagénye [9]



a)



b)

8.19. ábra. CO₂-leválasztás gőz-gáz körfolyamattal [9]:

a) kombi erőmű CO₂ – szén – nyomás alatti elgázosítással

$\eta_{\text{netto}} = 42,8\%$ gáz alakú,

$\eta_{\text{netto}} = 38,5\%$ folyékony (0,1 kWh_e/kgCO₂),

$\eta_{\text{netto}} = 32,0\%$ szilárd (0,26 kWh_e/kgCO₂),

b) kombi erőmű CO₂ – szén – nyomás alatti elgázosítással és CO-konvertálással

$\eta_{\text{netto}} = 34\%$ feketeszénre,

$\eta_{\text{netto}} = 38\%$ barnaszénre

8.5. A CO₂ elhelyezése

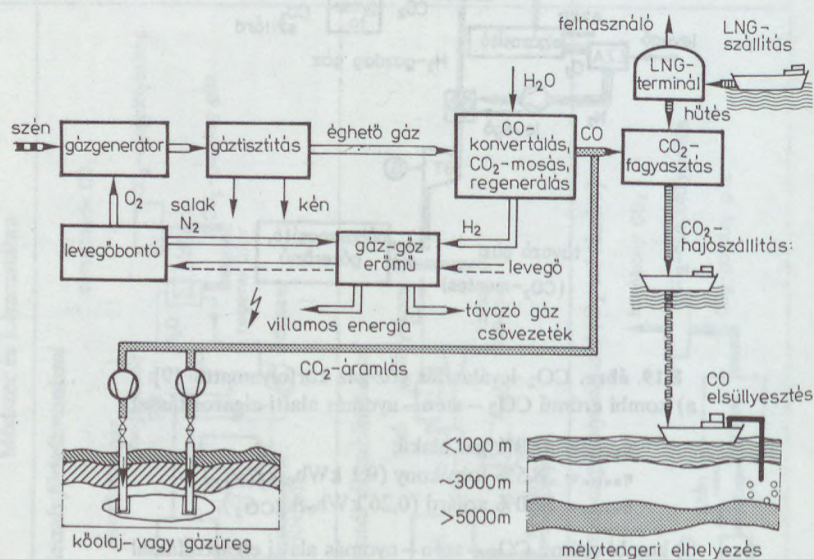
A CO₂ csökkentésére tehát a legfontosabb eljárások:

- termékátalakítás,
- felhagyott bányagödör,
- mélytengeri elhelyezés.

A három lehetőség együttes alkalmazására mutat példát a 8.20. ábra.

A számos föld alatti üreg közül az olaj- és földgázkiaknázás megszünte után maradt üregek alkalmasak a CO₂-elhelyezésre. Erre azonban viszonylag kevés lehetőség nyílik [8].

Ugyancsak lehetőség a CO₂-ot a tengerek mélyén elhelyezni, ami szintén elég költséges megoldás.



8.20. ábra. CO₂-elhelyezés különböző lehetőségei [8]

8.6. A N_2O szerepe az üvegházhatásban

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.

Irodalom a 8. fejezethez

1. A British Coal Environmental Review: Coal and the Climate. Cheltenham.
2. LOEW, H.: Bewertung der CO_2 -Minderungsmöglichkeiten in der Elektrizitätswirtschaft. VGB, Mai 1990.
3. KLOSE, E. et al.: Zur Bewertung der CO_2 -Emissionen bei Einsatz und Wandlung fossiler Energieträger, insbesondere von Weichbraunkohle. Energietechnik, 1991. 4.
4. CHESTER, P. F.: Coal and our atmosphere. Royal Ins., London, Oct. 7. 1985.
5. Analysen 25.: Energie und Klima. März. 1991. Cheltenham.
6. A British Coal Environmental Review: Coal Comes Clean.
7. KNOCKE, K. F. et al.: Kohlenstoffumsetzung in der Verbrennungstechnik und in der Natur. VGB, August 1990.
8. FREWER, H.: Zukunftskonzepte der Kernenergienutzung. VGB, Juli 1990.
9. PRUSCHEK, R. et al.: Potentielle CO_2 -Emissionsminderungen. VGB, August 1990.
10. The British Coal: Global Warming. Cheltenham.
11. U.S. Department of Energy: Clean Coal Technology Demonstration Program. U.S. DOE, Washington, 30. June, 1991.
12. ROTH, R.: Wie genau kennen wir unser Klima? VGB, September 1991.
13. LANGER, H.: Beiträge der Energietechnik zur Reduzierung der CO_2 -Emissionen. VGB, Oktober 1991.
14. GATTINGER, M. et al.: CO_2 -Emissionen bei Stromerzeugung. Siemens KWU, 1990. November.

Felelős vezető: Zöld Ferenc
Budapest, 1995

Nyomdai táskaszám: 24237
Felelős szerkesztő: Szente László — Műszaki szerkesztő: Marton Andor

A fedéltér Bogdán Hajnal munkája
 Kiadványszám: 1/94/31

Megjelent: 19,5 (A/5) év terjedelemben
HU ISSN 0239-1228

1999 November

Az energetika gazdasági és környezeti hatásai elengedhetetlené teszik a mind fejlettebb rendszerek alkalmazását. Teljesen új eljárások széles körű ipari megvalósítására került sor, amelyek első sorban a tüzelőanyag-források hatékonyabb felhasználását és a környezetet szennyező anyagok mennyiségének csökkentését segítik elő. A tüzeléstechnikában a tüzelés alapelveinek módosítását a tüzelőanyag és az égési levegő adagolásának megváltoztatása jelenti. Emellett egy forradalmian új, jelenleg már nagy teljesítményű be rendezéseknél is alkalmazható fluidizációs tüzelési eljárás is jelentős teret hódított. Egy kiemelkedő magyar szabadalom HibridFluid elnevezéssel üzemi megvalósításra került. Számos új technológia a környezetszennyező anyagok keletkezésének, illetve kibocsátásának csökkentését tűzi ki célul. A jelenlegi fejlettségi fokon a kén-dioxidok és a nitrogén-oxidok csökkentését, illetve leválasztását oldják meg, de a jövőben előtérbe kerülnek a szén-dioxid-kibocsátás mérséklésének kérdései is.

Az energetikai körfolyamat hatékonyságának növelésével kettős célt lehet elérni: az energiahordozó-költségek visszaszorítása mellett a keletkezett szennyező anyagok mennyisége is csökken. Az utóbbi években igen erőteljesen fejlődött a gáz-gőz közegű körfolyamatok alkalmazása. Bár a jelen energetikájában még nagyon korlátozott szerepet játszanak, de a jövőben egyre szélesebb térhódítása várható a tüzelőanyag-celláknak, illetve azok gáz-gőz körfolyamatban való alkalmazásának. A tüzelőanyag-celláknál a Carnot-folyamat hatásfokkorlátai elkerülhetők.

A szerző az előzőekben vázolt technológiákról ad a megértéshez és alkalmazáshoz szükséges mélységű ismereteket. A magas elméleti színvonalon tárgyalt témák gyakorlati megvalósítását is megismerheti az olvasó. A könyv alapirodalom az energetikai kutatással foglalkozó szakembereknek, tervezőknek, üzemeltetőknek. Az energetika területén folyó mérnökképzésben ez ideig nem, illetve csak az utolsó néhány évben ismertett tananyagot tartalmazza. Hasonló mű a nemzetközi irodalomban sem található.

ISBN 963 05 6847 0



9 789630 568470

5000052

REMÉNYI ÚJTECHNOLÓGIÁK AZ ENERGETIKÁBAN 3

