

BME
Közlekedésmérnöki Kar

Műszaki kémia jegyzet

I. kötet

Energiahordozók

Összeállította:
dr. Szabó Mihály

Kémiai és Környezeti Folyamatmérnöki Tanszék

2019. ősz

Irodalom:

- Vajta-Szebényi-Czencz: Általános kémiai technológia, Nemzeti Tankönyvkiadó, 1999
Bajnóczy-Szebényi: Műszaki kémia, Műegyetemi Kiadó, 2001
Hancsók: Korszerű motor- és sugárhajtómű üzemanyagok I. Motorbenzinek, Veszprémi Egyetemi Kiadó, 1997
Hancsók: Korszerű motor- és sugárhajtómű üzemanyagok II. Dízel üzemanyagok, Veszprémi Egyetemi Kiadó, 1997
Ulmann: Encyclopedia of Technical Chemistry

Tartalomjegyzék:

1.	Energiahordozók	2
1.1.	Az energiatermelés és felhasználás	2
1.2.	Fosszilis energiahordozók, tüzeléstechnika.....	3
1.2.1.	Tüzeléstechnikai alapfogalmak	3
1.2.2.	A kőszén	17
1.2.3.	A kőolaj és földgáz, mint tüzelőanyag	22
1.2.4.	Motorhajtóanyagok	27
1.3.	Atomenergia	47
1.3.1.	Az atommag	47
1.3.2.	Az atommag kötési energiája és stabilitása	48
1.3.3.	A maghasadás.....	49
1.3.4.	Hasadóanyagok	50
1.3.5.	Atomreaktorok és atomerőművek	51
1.3.6.	A nukleáris üzemanyagciklus	53
1.3.7.	Fúzió.....	54
1.4.	Alternatív energiahordozók.....	55
1.4.1.	Az alternatív energiahordozók általános jellemzése	55
1.4.2.	Alternatív motorhajtó anyagok.....	57

1. Energiahordozók

1.1. Az energiatermelés és felhasználás

Az emberiség számára a természetben három lehetséges energiaforrás hasznosítható:

- a fúzió
- a fisszió
- a gravitáció

A fúzió és a fisszió energetikai magyarázata, hogy az atommagok egy nukleonra¹ eső kötési energiája a tömegszám függvényében a 60-70 tömegszám tartományban maximumot mutat (ld. 1.3.1. ábra). Az atommagok kötési energiájának hasznosítása olyan magátalakulással lehetséges, amelynek során a fajlagos kötési energia nő. Elvileg két lehetőség kínálkozik erre, a kisebb magok egyesítése, a fúzió, vagy a nagyobbak hasítása, a fisszió. A gravitáció energetikai magyarázata a testek tömegvonzása.

A **fúzió**, a könnyű elemek egyesülése a Napban is végbemegy, ez a Nap sugárzásának forrása. A **napenergia** közvetlenül is hasznosítható az emberiség számára, de egyéb energiahordozók is a napenergiából származnak. Így a Nap sugárzása mechanikai munkát végez a földi gravitáció ellenében, ez az oka a hidroszféra és az atmoszféra mozgásának, s ez a mozgás, mint víz- és szélenergia hasznosítható. A napsugárzás hatására kémiai átalakulás, fotoszintézis megy végbe a növényekben. A növények kémiai kötéseiben tárolt energia közvetlenül is hasznosítható (**biomassza**), de a táplálékláncon keresztül az állatvilágnak is energiaforrása, és ezen élőlények évmilliókkal ezelőtt elhalt, föld alá süllyedt és különböző átalakulási folyamatok eredményeként keletkezett „megkövesült, eltemetett” (fosszilis) maradványai a földkéregben levő kőszén, kőolaj, földgáz. A **fosszilis energiahordozók** tehát évmilliók nagyságrendben a napenergia raktárai. A fúzió földi körülmények közötti megvalósítására, és hasznosítására, a fúziós erőmű megépítésére jelentős nemzetközi együttműködés mellett folynak kísérletek, de a megoldásra még évtizedeket kell várni.

A **fisszió**, a földkéregben található nehéz elemek hasadása végbemehet önként a természetben, ez adja a természetes radioaktív bomlást, amely a geotermális energia egyik forrása, vagy előídezhető mesterségesen. Ez utóbbit nevezik ma az atomenergia hasznosításának.

A **gravitáció** az oka a tengerek ár-apály mozgásának, ez hasznosítható az ár-apály erőművekben.

Megújulónak nevezzük az energiaforrást, ha az egy emberöltőnyi idő alatt keletkezett és felhasznált mennyiség különbsége nem negatív. Ebbe a kategóriába sorolható

- a közvetlen napsugárzás,
- a víz- és szélenergia,
- az ár-apály energia,
- a geotermális energia,
- a biomassza hasznosítása.

Nem megújuló energiaforrások

- a fosszilis energiahordozók,
- a hasadó anyagok,
- a fúzióra alkalmas atomok, pl. a hidrogén, bár a készlete gyakorlatilag kimeríthetetlen.

A **primer** energiahordozókat közvetlenül hasznosítjuk, a **szekunder** energiahordozókat előzetesen átalakítjuk. Primer energiahordozó szigorú értelemben tulajdonképpen alig van, mert szinte mindig valamilyen átalakító művelet előzi meg a hasznosítást. Ide sorolható a napenergia hasznosítása az épületek fűtésének csökkentése érdekében (szoláris építészeti), vagy a biomassza (pl. tűzifa) elégetése,

¹ a nukleon az atommagot alkotó protonok és neutronok együttes elnevezése

de általában ez utóbbit is megelőzi egy szárítás. Szekunder energiahordozónak tekintjük a villamos energiát, a hőszolgáltatás energiahordozó közegeit, az energiátárolókat.

A világ energiafogyasztása az elmúlt 50 évben mintegy ötszörösére növekedett. A fosszilis energiahordozók adják ma is a világ energiatermelésének mintegy 80 %-át. Az utóbbi években a kőszén aránya jelentősen csökkent, a földgázé jelentősen növekedett.

A fosszilis energiahordozókból rendelkezésre álló készletekről többféle becslés is napvilágot látott már. A szénhidrogének készletei tíz években mérhető, (a kőolajé mintegy 50 év, a földgázé kb. 80-100 év) a kőszéné száz években mérhető időtartamra elegendőek.

1.2. Fosszilis energiahordozók, tüzeléstechnika

Az energiatermelésben, az iparban és a közlekedésben a szükséges hőt leggyakrabban fosszilis energiahordozók (kőszén, kőolaj-származékok, földgáz) elégetése során lejátszódó exoterm reakciók segítségével állítják elő, amelyekben az égést tápláló közeg szinte mindig levegő.

A fosszilis energiahordozók felhasználási tulajdonságainak, előállításának tárgyalása előtt ezért tekintsük át a tüzeléstechnika alapfogalmait.

1.2.1. Tüzeléstechnikai alapfogalmak

Tüzeléstechnikai szempontból, a tüzelőanyagok felhasználhatóságának megítélésakor lényeges szempont a halmazállapot és az elégetéskor belőlük felszabaduló hőmennyiség.

Az égési reakció hőtechnikai paraméterei

A tüzelés alkalmával kérdés lehet az, hogy mekkora hőmennyiséget szabadíthatunk fel, ill. mekkora hőmérsékletet tudunk elérni. A tüzelőanyagokból felszabadítható hőmennyiség kizárólag a tüzelőanyag függvénye, az elérhető hőmérséklet azonban nagymértékben függ attól is, hogy a tüzelést milyen körülmények között végezzük.

Égéshő és fűtőérték

A tüzelőanyagok ipari felhasználhatóságát a felszabadítható kémiai energia hőgyenértéke, azaz a felszabaduló hő mennyisége határozza meg. Az égés során felszabaduló hőmennyiséget égéshőnek nevezik és értékét 1 kg szilárd vagy cseppfolyós, illetve 1 Nm³ gázhalmazállapotú tüzelőanyagra vonatkoztatva adják meg. (Nm³ jelöli a normál állapotú, azaz 0 °C hőmérsékletű és 101,325 kPa nyomású gáz térfogatát.)

Az **égéshő** az a hőmennyiség, amely a tüzelőanyag tömeg-, illetve térfogategységének tökéletes elégésekor szabadul fel abban az esetben, ha:

- a tüzelőanyag és a levegő hőmérséklete az elégés előtt és az égéstermékek hőmérséklete az elégés után egyaránt 20 °C,
- a tüzelőanyag szén- és kéntartalma szén-dioxid, illetve kén-dioxid alakjában van jelen az égéstermékekben,
- a tüzelőanyag és a levegő eredeti nedvességtartalma, valamint a hidrogéntartalom elégéséből keletkezett víz az elégés után cseppfolyós halmazállapotban van jelen.

A gyakorlatban inkább a **fűtőérték** fogalmát használják, amely az égéshőtől abban különbözik, hogy az égéstermékek víztartalma az égés után nem cseppfolyós, hanem gőz halmazállapotban van jelen, azaz az égéstermék hűlésekor nem adja le a párolgáshőt. A fűtőérték tehát kisebb, vagy egyenlő az égéshővel. (Akkor egyenlő, ha az égéstermékben nincs víz.) Ipari tüzelések során nem lehet az elméletileg felszabaduló összes hőmennyiséget — az égéshőt — hasznosítani, mivel számos tényező veszteséget okoz. A legnagyobb mértékű veszteség azért következik be, mert az égésterméket nem lehet 20 °C-ra lehűteni, a keletkező füstgázok 100 °C -nál is melegebben távoznak a tüzelőberendezésből és így a vizet

gőz alakban tartalmazzák. A víz párolgáshője igen nagy, ($L_p = 2500 \text{ kJ/kg } 0^\circ\text{C}$ -on és $101,325 \text{ kPa}$ nyomáson), ezért a gyakorlatban a tüzelés hatásfokának számításakor viszonyítási alapként a fűtőértéket használják.

Más elnevezés szerint az égéshőt felső fűtőértéknek, a fűtőértéket alsó fűtőértéknek is nevezik.

Az égéshő meghatározása méréssel

Az égéshőt a gyakorlatban méréssel határozzák meg. A szilárd és cseppfolyós halmazállapotú tüzelőanyagok égéshőjének mérésére *bombakalorimétert* használnak. Ez saválló acélból készült, mintegy 300 cm^3 térfogatú nyomásálló hengeres edény (bomba), amelyben a tüzelőanyagot 3 MPa nyomású oxigénben elektromos izzószállal meggyújtják és elégetik. A bomba vizes termosztátban van, az égéskor képződő hőt a termosztát vizének adja át. Ismerve a hőkapacitást, mérve a víz hőmérséklet-növekedését, számítható az égéshő.

Gázok égéshőjét legelterjedtebben a *Junkers-féle gázkaloriméterben* határozzák meg. A kaloriméter 100% -os hatásfokkal működő vízmelegítőnek tekinthető. A meghatározás elve, hogy a kaloriméterben ismert nyomású, hőmérsékletű és térfogatú (azaz ismert mennyiségű) gázt égetnek el folyamatosan. A fejlődött hőt az égőt körülvevő vízcsöves hőcserélőben áramló víz veszi át. A gáz és víz mennyiségét, a beáramló és elfolyó víz hőmérséklete közötti különbséget mérik, s a mérési eredményekből számítják az égéshőt.

A fűtőérték számítása

A fűtőérték kiszámításakor az égéshőből le kell vonnunk az égéstermékben lévő víz le nem kondenzálódása miatt fel nem szabadult hőt. Víz egyrészt már eleve lehet (nedvességként) a tüzelőanyagban, másrészt pedig a hidrogéntartalom elégetésekor keletkezik. A víz molekulatömege 18 , egy molnyi víz 2 gramm hidrogénből és 16 gramm oxigénből áll, tehát 1 gramm hidrogén elégetése 9 gramm vizet eredményez. A tüzelőanyag hidrogéntartalmát 9 -cel szorozva megkapjuk azt a vízmennyiséget, amely a tüzelőanyag hidrogén-tartalmának elégetésekor keletkezik. Ehhez hozzáadva a tüzelőanyag eredeti nedvességtartalmát az égéstermékben levő összes vízmennyiséget kapjuk meg. Ha ezt szorozzuk a párolgáshővel, akkor megkapjuk a víz által elvitt hőmennyiséget és ezt levonva az égéshőből, a fűtőértékhez jutunk.

1 kg tüzelőanyagra felírva:

$$F = \dot{E} - R \quad \text{ahol}$$

$$R = L_p * (9 * m_H + m_{\text{vz}}) \quad \text{az ún. Regnault hő,}$$

m_H a tüzelőanyag hidrogén-tartalma kg/kg egységben, azaz tömegtörtben

m_{vz} a tüzelőanyag víztartalma kg/kg egységben, azaz tömegtörtben

Égési hőmérséklet

A tüzelés során kialakuló hőmérséklet a tüzelőanyag összetételétől és az égés körülményeitől függ. Minden tüzelőanyagra jellemző az a maximális hőmérséklet, amely a tüzelőanyag elméleti levegőszükséglettel való elégetése során keletkezik abban az esetben, ha adiabatikus (hőelvonás vagy -hozzávetés nélküli) körülményeket tételezünk fel, és nem vesszük tekintetbe a gyakorlatban fellépő veszteségeket. Az így számított ún. elméleti láng hőmérséklet egyenesen arányos a tüzelőanyag fűtőértékével és fordítva a keletkező égéstermékek hőkapacitásával:

$$T_{\text{max}} = \frac{F}{m_1 * c_1 + m_2 * c_2 + \dots + m_n * c_n} \text{ } ^\circ\text{C}$$

ahol: F a tüzelőanyag fűtőértéke (kJ/kg vagy kJ/Nm^3)

m_i az 1 kg , ill. 1 Nm^3 tüzelőanyag elégetésekor keletkező i -edik égéstermék komponens tömege (kg/kg), ill. térfogata ($\text{Nm}^3 / \text{Nm}^3$)

c_i az i -edik égéstermék komponens fajhője ($\text{kJ/kg} * ^\circ\text{C}$, ill. $\text{kJ/Nm}^3 * ^\circ\text{C}$).

A közölt képlet szerinti elméleti hőmérséklet a gyakorlatban nem érhető el. Mint majd látjuk, a tökéletes égés biztosítására több-kevesebb levegőfelesleget kell alkalmazni, ill. a cseppfolyós tüzelőanyagoknál gyakran külön porlasztó közeget (pl. gőzt) használnak a tüzelőanyag minél tökéletesebb elosztatására. Ezáltal megnő az égéstermékek mennyisége, és így az általuk felvett hőmennyiség is. Emellett a vezetés és sugárzás révén is veszteség lép fel, hő távozik a környezetbe. Szilárd tüzelőanyag használatakor nem lehet az összes éghető alkatrészt eltüzelni, hanem egy része elégtelenül a salakban marad, és így a fűtőértéknek megfelelő teljes hőmennyiség nem kapható meg.

Az elérhető maximális hőmérsékletet csökkentő tényezők között külön meg kell említeni az égéstermékek termikus disszociációját. Nagy hőmérsékleten a szén-dioxid és a víz elemeire *disszociál*. A bomlás endoterm folyamat, ennek következtében az égéskor felszabaduló hőmennyiség egy része a disszociációra használódik fel. A termikus disszociáció folytán fellépő hőveszteség különösen nagy hőmérsékleten (2000 °C körül) jelentős, mert ekkor a disszociáció mértéke erősen megnövekszik.

A szén-dioxid és a víz termikus disszociációjának hőmérséklet-függése:

$\text{CO}_2 \rightarrow \text{CO} + 0,5\text{O}_2$	$\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + 0,5\text{O}_2$
1300 °C 0,1%	1400 °C 0,1%
1700 °C 0,2%	1800 °C 1,0%
1800 °C 5,0%	2000 °C 2,0%
2000 °C 10,0%	3000 °C 22,5%
2200 °C 17,0%	

Az elméleti hőmérséklet megközelítésében az égés sebességének is szerepe van. Minél gyorsabb ugyanis az égés, annál kevesebb a vezetés és a sugárzás okozta hőveszteség.

Adott tüzelőanyag használatakor a megadott képlet számlálója a tüzelőanyag és a levegő előmelegítésével növelhető. Ilyenkor a fűtőértékhez hozzá kell adni az előmelegített tüzelőanyag és levegő hőtartalmát. Előmelegítésre rendszerint a füstgázokat használják fel, amelyek így kisebb hőmérsékleten távoznak a tüzelőberendezésből, és ennek következtében a tüzelőanyag égéshőjét jobban megközelíthető hőmennyiség hasznosítható. A képlet nevezőjében a *c* értéke nem csökkenthető, m csökkentésére két lehetőség kínálkozik: a tüzelőanyag és a levegő lehető legtökéletesebb keveredésének biztosításával a szükséges levegőfelesleg csökkentése, vagy pedig az égéstermékek közül a levegő nitrogénjének részbeni vagy teljes kiküszöbölése. Ez utóbbi megvalósításának céljából a tüzelőanyagot oxigénben dúsított levegővel vagy oxigénnel égetik el.

Az elméleti levegőszükséglet, az elméletileg keletkező füstgáz mennyisége és összetétele

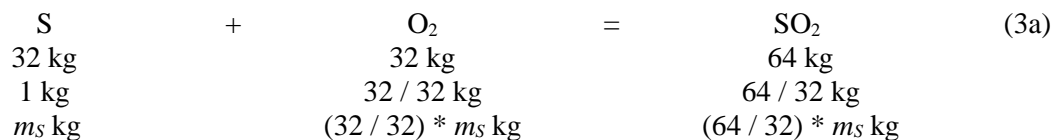
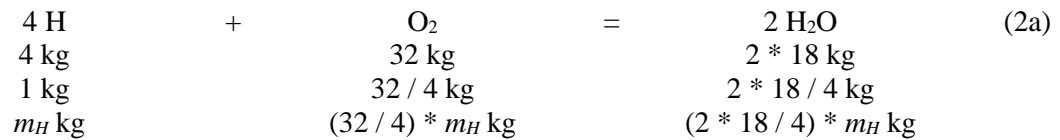
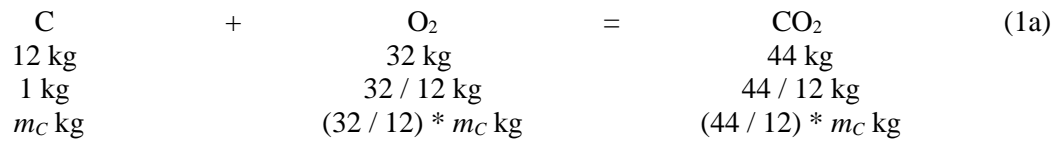
A tüzelőanyag elemi összetételének ismeretében kiszámítható, hogy elméletileg mekkora tömegű, illetve térfogatú levegőre van szükség a tökéletes eltüzeléséhez (L_o), valamint mekkora az elméletileg keletkező száraz és nedves füstgáz térfogata (V_o^{sz} és V_o^n).

A tüzelőanyag konkrét kémiai összetétele (azaz, hogy milyen vegyületekből áll) általában nem ismert, de az elemi összetétel könnyen meghatározható. Az elemi összetétel ismerete azt jelenti, hogy tudjuk a tüzelőanyag 1 kg-jában levő szén atomok (karbon), hidrogén atomok, kén atomok és oxigén atomok összes tömegét. (Újra hangsúlyozzuk: a tüzelőanyag 1 kg-ja m_C kg karbonból, m_H kg hidrogénből, m_S kg kénből és m_O kg oxigénből áll, tehát m_C , m_H , m_S és m_O tömeg tört, ezek összege 1.)

Az elméleti levegőszükséglet

A karbon, a hidrogén és a kén égéséhez szükséges oxigén. Ez az égést tápláló levegő oxigéntartalmából, és (ha a tüzelőanyag tartalmaz oxigént) részben magából a tüzelőanyagból származik. Figyelembe véve az atomi tömegeket (C=12, O=16, H=1 S=32), a tüzelőanyag 1 kg-jában

levő m_C kg karbon, m_H kg hidrogén és m_S kg kén elégetéséhez szükséges oxigén tömege, illetve az égéstermékek tömege:



A karbon, a hidrogén és a kén elégetéséhez szükséges oxigén együttes tömege:

$$\left[\frac{32 * m_C}{12} + \frac{32 * m_H}{4} + \frac{32 * m_S}{32} \right] \text{ kg}$$

Ebből a tüzelőanyag már tartalmaz m_O tömegű oxigént, így a levegőből szükséges oxigén tömege:

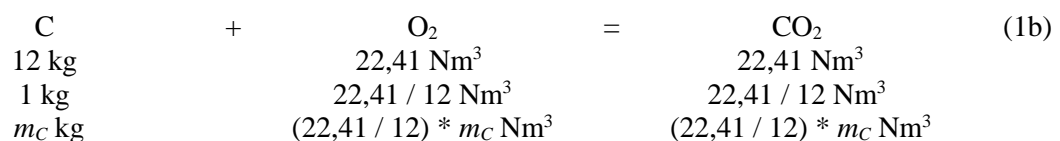
$$M_{O_2} = \left[\frac{32 * m_C}{12} + \frac{32 * m_H}{4} + \frac{32 * m_S}{32} \right] - m_O \text{ kg}$$

A levegőből szükséges oxigén térfogatát az alábbi megfontolás alapján számíthatjuk ki:

Mivel 32 kg oxigén térfogata 22,41 Nm³,
 1 kg oxigén térfogata 22,41 / 32 Nm³,
 emiatt M_{O_2} kg oxigén térfogata $(22,41 / 32) * M_{O_2}$ Nm³, azaz a levegőből szükséges oxigén térfogata:

$$V_{O_2} = 22,41 * \left[\frac{m_C}{12} + \frac{m_H}{4} + \frac{m_S}{32} - \frac{m_O}{32} \right] \text{ Nm}^3 \text{ oxigén / kg tüzelőanyag.}$$

Ugyanerre az eredményre jutunk, ha a fenti reakcióegyenletekben nem az oxigén tömegét, hanem a térfogatát szerepeltetjük:



$$\begin{array}{rcl}
1 \text{ kg} & & 22,41 / 4 \text{ Nm}^3 \\
m_H \text{ kg} & & (22,41 / 4) * m_H \text{ Nm}^3 \\
& & 2 * 22,41 / 4 \text{ Nm}^3 \\
& & (2 * 22,41 / 4) * m_H \text{ Nm}^3 \\
\\
\text{S} & + & \text{O}_2 & = & \text{SO}_2 & (3b) \\
32 \text{ kg} & & 22,41 \text{ Nm}^3 & & 22,41 \text{ Nm}^3 \\
1 \text{ kg} & & 22,41 / 32 \text{ Nm}^3 & & 22,41 / 32 \text{ Nm}^3 \\
m_S \text{ kg} & & (22,41 / 32) * m_S \text{ Nm}^3 & & (22,41 / 32) * m_S \text{ Nm}^3
\end{array}$$

A tüzelőanyag oxigén tartalmának megfelelő oxigén térfogat:

$$\begin{array}{l}
\text{Mivel} \quad 32 \text{ kg oxigén térfogata} \quad 22,41 \text{ Nm}^3, \\
\quad \quad \quad 1 \text{ kg oxigén térfogata} \quad 22,41 / 32 \text{ Nm}^3, \\
\text{emiatt} \quad m_o \text{ kg oxigén térfogata} \quad (22,41 / 32) * m_o \text{ Nm}^3.
\end{array}$$

A levegőből szükséges oxigén térfogata (az elméleti oxigénszükséglet) kiszámítható a karbon, a hidrogén és a kén égéséhez szükséges oxigén térfogata és a tüzelőanyag oxigén tartalmának megfelelő oxigén térfogat különbségeként:

$$V_{O_2} = 22,41 * \left[\frac{m_C}{12} + \frac{m_H}{4} + \frac{m_S}{32} - \frac{m_O}{32} \right] \text{ Nm}^3 \text{ oxigén / kg tüzelőanyag.}$$

A tüzeléstechnikai számítások elegendő pontossággal végezhetők el, ha a levegőt 21 % oxigénből és 79 % nitrogénből álló gázelegynek tekintjük. Így az oxigénnel együtt az égésterbe jutó nitrogén elméleti térfogata, az oxigén térfogatának 79/21-szerese:

$$V_{N_2} = \frac{79}{21} * 22,41 * \left[\frac{m_C}{12} + \frac{m_H}{4} + \frac{m_S}{32} - \frac{m_O}{32} \right] \text{ Nm}^3 \text{ nitrogén / kg tüzelőanyag.}$$

A levegőszükséglet a kettő összege, összevonás után:

$$L_o = V_{O_2} + V_{N_2} = \frac{100}{21} * 22,41 * \left[\frac{m_C}{12} + \frac{m_H}{4} + \frac{m_S}{32} - \frac{m_O}{32} \right] \text{ Nm}^3 \text{ levegő / kg tüzelőanyag.}$$

Az elméleti száraz füstgáz térfogata

Az elméleti száraz füstgázban a keletkező szén-dioxid és kén-dioxid, valamint a levegővel bevitt nitrogén található. A szén-dioxid ill. a kén-dioxid térfogata az (1b) ill. (3b) egyenletek alapján:

$$V_{CO_2} = \frac{22,41}{12} * m_C \quad \text{Nm}^3 \text{ CO}_2 / \text{kg tüzelőanyag}$$

$$V_{SO_2} = \frac{22,41}{32} * m_S \quad \text{Nm}^3 \text{ SO}_2 / \text{kg tüzelőanyag}$$

A szén-dioxid, a kén-dioxid és a levegővel bevitt nitrogén együttes térfogata összeadás és rendezés után:

$$V_o^{sz} = \frac{100}{21} * 22,41 * \left[\frac{m_C}{12} + \frac{0,79 * m_H}{4} + \frac{m_S}{32} - \frac{0,79 * m_O}{32} \right] \text{ Nm}^3 \text{ száraz füstgáz / kg tüzelőanyag.}$$

Az elméleti nedves füstgáz térfogata

Az elméleti nedves füstgázban a száraz füstgáz komponensei mellett a keletkező vízgőz is megtalálható. A keletkező vízgőz térfogata a (2b) egyenlet alapján:

$$V_{H_2O} = \frac{2 * 22,41}{4} * m_H \quad \text{Nm}^3 \text{ H}_2\text{O} / \text{kg tüzelőanyag}$$

Az elméleti nedves füstgáz térfogata összeadás és rendezés után:

$$V_o^n = \frac{100}{21} * 22,41 * \left[\frac{m_C}{12} + \frac{1,21 * m_H}{4} + \frac{m_S}{32} - \frac{0,79 * m_O}{32} \right] \text{ Nm}^3 \text{ nedves füstgáz} / \text{kg tüzelőanyag.}$$

Amennyiben a tüzelőanyagban is volt víztartalma, (ez motorhajtó anyagoknál gyakorlatilag nem fordulhat elő), az ebből keletkező vízgőz térfogata a fenti képlethez hozzáadandó. Ha a tüzelőanyagban (pl. kőszénben) a víz tömeghányada m_{vz} ,

mivel 1 kg vízgőz mólszáma	1 / 18 kmol,
1 kg vízgőz térfogata	22,41 * 1 / 18 Ndm ³ ,
m_{vz} kg vízgőz térfogata	$m_{vz} * 22,41 * 1 / 18 \text{ Nm}^3$.

A füstgáz elméleti összetétele

Az elméletileg keletkező füstgáz összetétele kiszámítható a fenti képletek felhasználásával, ha az 1 kg tüzelőanyag elégetésekor keletkező gázok térfogatát osztjuk a füstgáz összes térfogatával. Pl. a keletkező füstgáz CO₂ koncentrációja egyenlő a keletkező szén-dioxid térfogata (ld. fenn), osztva az elméleti nedves, vagy száraz füstgáztérfogattal. (Feladat: számítsuk ki az alábbi motorbenzin nedves kipufogógázában a szén-dioxid, a kén-dioxid, a vízgőz és a nitrogén elméleti koncentrációját. $m_C = 0,83800$, $m_H = 0,14000$, $m_S = 0,00005$, $m_O = 0,02195$)

A légfesleges

A tüzelőberendezésekben sohasem lehet az elméleti levegőmennyiséggel tökéletes égést elérni. Szilárd tüzelőanyagokhoz általában több, folyékony és gáz halmazállapotúakhoz kevesebb légfesleges kell alkalmazni. A szükségesnél kisebb légfesleges esetén az égés tökéletlen, vagyis az égéstermékekben elégtelen szén-monoxid, hidrogén, metán, korom lehet, amely — a légszennyezés mellett — jelentős energiavesztést okoz, mert nem szabadul fel a tüzelőanyag teljes égéshője. A gyakorlatban többnyire szén-monoxid marad a füstgázban a tökéletlen égés eredményeképpen. De csak a tökéletes égés biztosításához szükséges légfesleggel kell tüzelni, mert ennél nagyobb légfesleges esetén a füstgázzal melegen távozó levegőfelesleg által elvitt hőmennyiség lesz egyre nagyobb, ami nem gazdaságos, azaz **a tüzelés határfoka a légfesleges függvényében maximum-görbe szerint változik.**

Az égéshez ténylegesen rendelkezésre álló, és az elméletileg szükséges levegőmennyiség viszonyát **légfeslegstényezőnek (n)** nevezik. A légfeslegstényező (n) jellemző a tüzelésre. Kifejezi, hogy mennyivel több levegőt adagoltak vagy kell adagolni az égéshez, mint amennyire az égés kémiai egyenletei szerint elméletileg szükség lenne. A szükséges légfesleges mértéke a tüzelőanyagtól, a tüzelőberendezéstől és a tüzelési folyamat vezetésétől függ. A légfeslegstényező néhány tájékoztató értékét az 1.2.1. táblázat tartalmazza. A legkorszerűbb olajtüzelő, valamint gáztüzelő berendezések 1,1-nél kisebb légfeslegstényezővel működnek.

Tüzelőanyag és tüzelési mód	Légfeslegstényező
Barnakőszén	
Kézi tüzelés esetén	1,5-1,8

Szénportüzelés esetén	1,15-1,3
Olajtüzelés	1,1-1,2
Gáztüzelés	1,05-1,1

1.2.1. táblázat A légfeslegtényező gyakorlati értékei.

Otto-motorok (ld. később) esetén léghiány is előfordulhat, itt a légfeslegtényezővel azonos fogalom a **légvizony** (λ).

$$n = \lambda = \frac{L}{L_o} \quad \text{ahol } L \text{ az égéshez ténylegesen rendelkezésre álló levegő mennyisége,}$$

$$L_o \text{ az elméleti levegőszükséglet.}$$

L és L_o mértékegysége megegyezik, mindkét levegő mennyiség (pl. térfogat vagy tömeg) vonatkozhat egységnyi mennyiségű tüzelőanyagra, vagy egységnyi időre, azaz lehet pl. Nm^3 levegő / kg tüzelőanyag, vagy Nm^3 levegő / h, tehát n , ill. λ dimenzió-mentes viszonyszám. Az Otto-motorban $\lambda > 1$ esetén légfesleg (szegény keverék), $\lambda < 1$ esetén léghiány (dús keverék) van a reakcióterben.

Légfesleg alkalmazása esetén a füstgázban marad elreagálatlan oxigén, illetve a keletkező szén-dioxid koncentrációja (a felesleges levegő hígító hatása miatt) lecsökken. Ezek alapján a gyakorlatban a légfeslegtényező, illetve a légvizony értékét a száraz füstgáz oxigén-tartalmából, vagy szén-dioxid-tartalmából határozzák meg az alábbi megfontolások segítségével.

Nagy légfeslegnél, ahol a tökéletlen égés miatti térfogatváltozás elhanyagolható, (a füstgáz maradék O_2 koncentrációja legalább 2 %), az égéstérből (motorból) kilépő füstgáz (fg) maradék O_2 koncentrációja egyenlő a légfeslegből megmaradó oxigén térfogata osztva a teljes füstgáz térfogattal:

$$[\text{O}_2 \%] = \frac{V_{\text{O}_2}}{\text{összes száraz fg térfogat}} * 100$$

A légfeslegből megmaradó oxigén térfogata a levegőfelesleg 21 %-a, az összes száraz füstgáz térfogata pedig az elméletileg keletkező száraz füstgáz és a levegőfelesleg együttes térfogata.

1 kg tüzelőanyagra:

$$[\text{O}_2 \%] = \frac{(L - L_o) * 0,21}{V_o^{sz} + (L - L_o)} * 100, \quad \text{ahol } V_o^{sz} \text{ az elméletileg keletkező száraz füstgáz térfogata.}$$

Az $L = L_o * \lambda$ behelyettesítésével és λ -ra rendezve:

$$\lambda = 1 + \frac{[\text{O}_2 \%]}{21 - [\text{O}_2 \%]} * \frac{V_o^{sz}}{L_o}$$

A füstgáz CO_2 koncentrációja

$$[CO_2\%] = \frac{V_{CO_2}}{\text{összes száraz fg térfogat}} * 100$$

Korábban már felírtuk a keletkező CO₂ térfogatát:

$$V_{CO_2} = \frac{22,41}{12} * m_C$$

Így a CO₂ koncentráció:

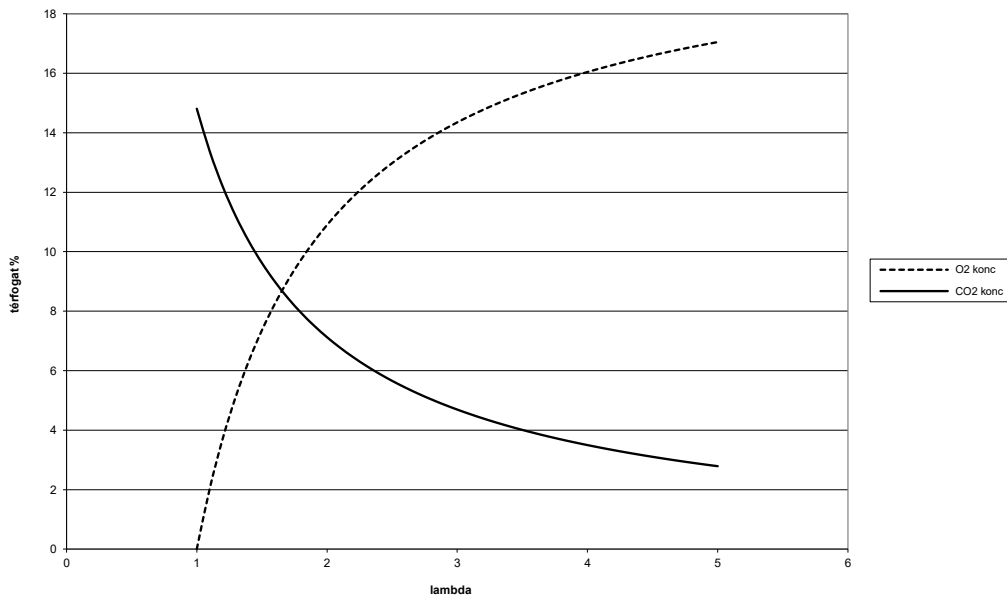
$$[CO_2\%] = \frac{\frac{22,41}{12} * m_C}{V_o^{sz} + (L - L_o)} * 100,$$

Ha bevezetjük a $CO_{2max} = \frac{22,41}{12} * m_C$ fogalmát és $L = L_o * \lambda$ -t behelyettesítjük, λ -ra rendezve:

$$\lambda = 1 + \frac{[CO_{2max}\%] - [CO_2\%]}{[CO_2\%]} * \frac{V_o^{sz}}{L_o}$$

A [CO_{2max}] értéke tulajdonképpen a füstgáz elméleti maximális CO₂-koncentrációja, amely a gyakorlatban nem érhető el. Akkor lenne elérhető, ha sztöchiometrikus (elméleti) mennyiségű levegővel tüzelve a tüzelőanyag teljes karbon tartalma a füstgázban CO₂ formában távozna.

Ha a fenti képleteket egy olyan tüzelőanyagra alkalmazzuk, amelyre $m_C = 0,85$ és $m_H = 0,15$, a füstgáz elméleti oxigén- és szén-dioxid koncentrációjára az 1.2.1. ábra szerinti összefüggést kapjuk:



1.2.1. ábra A füstgáz elméleti oxigén- és szén-dioxid-koncentrációja

Az ábrából látható, hogy ha λ tart a végtelenbe (azaz végtelen nagy a légfeszesség), a füstgázban az oxigén koncentrációja tart a 21 %-hoz, a szén-dioxid koncentrációja pedig a nullához. Természetesen a diagram csak elméletileg mutatja be a koncentrációk alakulását. Növelve a légfeszleget, valamennyi tüzelőanyagra létezik egy olyan légfeszesség érték (alsó robbanási határ, ld. később) amelynél az

égéstérben már annyira lecsökken a tüzelőanyag aránya, hogy nem lesz meggyújtható. Az ábráról a $[CO_{2max}]$ értéke is leolvasható az adott tüzelőanyagra: a CO_2 koncentrációja az 1-es légviszony értéknél.

Az égés folyamata

Az égéshez éghető anyagra, égéstápláló közegre és a gyulladási hőmérséklet elérésére van szükség. Az égéstápláló közeg majdnem kivétel nélkül oxigén, amelyet a levegőből nyernek. A tüzelőanyagok égése két szakaszból áll: gyulladásból és a tulajdonképpeni égésből. A tüzelőszerkezetben az elégetésre szánt tüzelőanyagot először a gyulladási hőmérsékletre kell hevíteni. Az ehhez szükséges időtartamot gyulladási késedelemnek nevezik. Szilárd tüzelőanyagból, pl. kőszénből az égésnek ebben a szakaszában távoznak el az illó alkatrészek és a nedvességtartalom. A kőszén száradása és kokszolódása (ld. később) közben a beadagolt levegő, valamint az illórészek és a kokszt felmelegszenek a gyulladási hőmérsékletre. Gyulladási hőmérsékletnek azt a legkisebb hőmérsékletet nevezik, amelyen az előzetesen valamilyen módon felhevített anyag levegővel érintkezve, magától meggyullad. A legfontosabb tüzelőanyagok gyulladási hőmérsékletét az 1.2.2. táblázat tartalmazza. A nagy gyulladási hőmérsékletű anyagokat kisebb gyulladási hőmérsékletű anyagokkal lehet meggyújtani.

Tüzelőanyag	Gyulladási hőmérséklet [°C]
Fa	300
Cellulóz	360
Tőzeg (légszáraz)	280
Fiatalabb barnakőszén	250-300
Idősebb barnakőszén	400
Feketekőszén	400-500
Kocsz	600-750
Antracit	540
Grafit	800
Gázolaj	350
Bután	650-750
Hidrogén	560-650

1.2.2. táblázat **Tüzelőanyagok átlagos gyulladási hőmérséklete.**

A tüzelőanyagok túlnyomó része gáz- és gőz állapotú vegyületeket ad le magából az égés folyamán. Ha az éghető gázokat levegővel vagy oxigénnel keverve zárt térben melegítjük, akkor a gyulladási hőmérsékleten oxidációs reakció indul meg, amelyet a felszabaduló reakcióhő gyorsan robbanásig fokoz. Ha a gázt nyitott csövön áramoltatjuk ki, akkor az egyesülés még mindig nagy sebességgel, de már nem az explózió sebességével terjed. Az égésnél biztosítani kell, hogy a levegőt az égés sebességének megfelelő ütemben vezessük oda, és az égési folyamat közben keletkező égéstermékeket a tüzelőanyag felületéről kellő gyorsasággal távolítsuk el, ezáltal is biztosítva, hogy a friss levegő minél intenzívebben érintkezhesse a tüzelőanyag felületével. A levegőszükségletnek általában csak egy részét juttatják a tüzelőanyaggal együtt a tüzelőberendezésbe. Ez a *primer levegő*. Másik részét, a *szekunder levegőt* a tüztérbe fúvatják be csekély túlnyomással. Utóbbi a tüztérben levő még elégetlen gázok keveredését és ez által is a tökéletes elégés lehetőségét biztosítja. Előnyös a szekunder levegőt előmelegítve befúvatni.

Az égés gyökös mechanizmusú láncreakció, azaz a reakció lejátszódása során (párosítatlan elektront tartalmazó) reakcióképes kémiai gyökök játszanak fontos szerepet.

Gázok elégetésének legegyszerűbb módja a gázt világítógáz alakjában elégetni. Ez esetben a meggyújtás után az égéshez szükséges levegőt a környezettől szívja el a láng. A lángban először pirogén disszociáció következik be, majd szén-monoxid és hidrogén keletkezik, ezek végül szén-dioxiddá és vízgőzzé égnek el. Ha a gáz csekély hidrogéntartalmú vegyületek gőzeit is tartalmazza, akkor a hidrogén nagy égési sebessége miatt a szén korom alakjában válik ki a lángban, a láng kormozva ég. Ha primer levegőt kevernek a gázhoz ezek a folyamatok gyorsabban játszódnak le, így egységnyi idő alatt nagyobb hőmennyiség szabadul fel és nagyobb hőmérsékletű lesz a láng. Ha a gázkeverék kiáramlási sebessége nagyobb lesz, mint az égési sebesség, akkor a láng „leszakad” az égő csővéről.

Folyadékok égésekor a folyadék előgőzölög és gőzei úgy égnek tovább, mint a gázok. A nagy szénatomszámú szénhidrogének gőzei a hevítés hatására láncreakciókban bomlanak le, majd, mint egyszerű gázok, instabil atomcsoportok, és mint szabad elemi szén égnek el. Éghető folyadékok gyúláshőmérséklete szorosan összefügg a gőznyomásukkal. Az olajok folyamatos eltüzelése elsősorban szénhidrogén alkotóik elpárolgási sebességétől, továbbá attól a sebességtől függ, amellyel a gázhalmazállapotúvá lett szénhidrogén-molekulák lebomlanak. Minél bonyolultabb szerkezetűek a szénhidrogén molekulái és minél nagyobb szénatomszámúak, annál vontatottabb az elégésük.

A *szilárd* tüzelőanyagoknak tüzeléstechnikai szempontból két fajtáját különböztetjük meg: olyanokat, amelyekben alig van hidrogén és oxigén, tehát gyakorlatilag nem adnak hőhatásra illékony vegyületeket, és olyanokat, amelyekből hevítés folyamán nagyobb mennyiségű gáz távozik el. Míg a gázok és folyadékok égése homogén folyamat, az illanó vegyületeket nem adó, kokszerű szénké heterogén reakció. A szilárd szén felületén lejátszódó reakciók sebességét többféle részfolyamat befolyásolja: Az oxigén adszorpciója, az adszorbeált gáz egyesülése a szén-atomrács alkotóival, a rács fellazulása, végül az égéstermékek eltávoztása.

Az égéstermékek

Az égés során füstgáz és szilárd tüzelőanyag esetén salak (hamu) is keletkezik. A tüzelőanyag nem éghető részei képezik a hamut. A hamu alkotórészei: szilícium-dioxid, alumínium-oxid, vas-oxid, kalcium-oxid, magnézium-oxid. A könnyen olvadó hamu hátránya, hogy a kazánban salakosodást okoz, az olvadt hamu ráakódik, rásül a rostélyra, illetve kazáncsővekre. A salakosodást nemcsak a salak olvadáspontja, hanem a kazán kialakításának és üzemeltetésének számos körülménye is befolyásolja. A salak el nem égett tüzelőanyagot is szokott tartalmazni, amelyet a salak tömegszázalékában, mint ún. salak-éghetőt adnak meg.

A füstgázba a tüzelőanyag éghető alkotórészeinek égéstermekei, valamint a levegőből származó nitrogén és levegőfelesleg alkalmazása esetén oxigén is kerül. Ha tökéletes volt az égés, akkor égéstermékként szén-dioxid, vízgőz és kén-dioxid van jelen a füstgázokban. Tökéletlen égéskor a füstgáz szén-monoxidot, szén-hidrogéneket, esetenként hidrogént is tartalmaz. Főleg porszéntüzelés esetén nagy mennyiségű pernye is van a füstgázban, ennek eltávolítása mechanikus és elektrosztatikus porleválasztóban történik. A tökéletlen elégéskor keletkező korom fekete füstöt képez. Jó tüzelés esetén nem képződik kormos füst. A füstölés mértékének meghatározására mérőmódszereket dolgoztak ki (Ringelmann-skála, Bacharach-skála), amivel ellenőrzik a kéményből távozó füst koromtartalmát. Nagy tüztérhőmérséklet esetén (pl. a belsőégésű motorokban) a levegő nitrogénje is oxidálódik, különböző összetételű nitrogén-oxidokat (főleg nitrogén-monoxidot, kisebb mértékben nitrogén-dioxidot, együttesen NO_x-et) adva.

A szén-dioxid ugyan nem mérgező, de az *üvegházhatás* fő okozója. Az üvegházhatást az okozza, hogy a földi légkörben bizonyos gázok, a CO₂, az egyéb ipari és mezőgazdasági tevékenységekből származó metán, dinitrogén-oxid és freonok (klórozott, fluorozott szénhidrogének) mennyisége megnövekedett. Emiatt ezek a gázok a Földről távozó, a bejövönél kisebb energiájú, nagyobb hullámhosszúságú sugárzást visszatartják, s ezáltal globális felmelegedést, beláthatatlan következményekkel járó éghajlatváltozást okoznak. Bár a metán, a dinitrogén-oxid és a freonok relatív üvegház-hatékonysága a szén-dioxidhoz képest 21-szeres, 270-szeres, illetve több ezerszeres, a nagy mennyisége miatt a szén-dioxid hozzájárulása a globális felmelegedéshez a legnagyobb (50-60%). A szén-monoxid igen *erős mérge*, a vér hemoglobinjához az oxigénnél mintegy 300-szor erősebben kötődik, így az oxigént a vérből kiszorítva megakadályozza a sejtek oxigén-ellátását. Viszonylag kis

mennyiségű szén-monoxidot tartalmazó levegőt hosszabb ideig belélegezve, a vérben található hemoglobin egyre nagyobb arányban válik oxigén szállítására alkalmatlanná, s ezzel akár halált is okozhat. A nitrogén-oxidok a tüdőt roncsolják, valamint a légkörben található vízzel egyesülve *savas esőt okoznak*. A nitrogén-monoxidból (NO) közönséges hőmérsékleten a levegő oxigénjével azonnal vörösbarna színű nitrogén-dioxid (NO₂) keletkezik. Párosítatlan elektront tartalmaz, reakcióképes. A nitrogén-dioxid vörösbarna színű, szúrós szagú, mérgező gáz, vízben jól oldódik. A kén-dioxid (SO₂) színtelen, szúrós szagú gáz, igen erős mérgező, a tüdőt roncsolja, *savas esőt okoz*. A szilárd részecskék nagy része *rákot okoz*.

A tüzelési veszteségek

Részben az égés során, részben a tüzelőszerkezetben különböző veszteségek lépnek fel. A tüzelés kialakításakor és a berendezések üzemeltetésekor ezért gondosan ügyelni kell a veszteségek csökkentésére, és ez által a felesleges tüzelőanyag-fogyasztás kiküszöbölésére.

Tüzeléskor a tökéletlen égés következtében a tüzelőanyagok teljes kémiai energiája nem nyerhető ki hasznosítható hő alakjában. Ez az ún. *elégetlen-veszteség*, azaz a fel sem szabadított hő. A tökéletlen égés csökkenthető a megfelelő levegőfelesleg alkalmazásával és a jó keveredés biztosításával. Az égéstermékkel együtt távozó korom, pernyeéghető és elégetlen gázok is veszteséget jelentenek. A tüzelőberendezések működésének ellenőrzésére többek között a füstgáz (vagy kipufogógáz) összetételét is vizsgálják. A füstgázelemzés lehetőséget biztosít az el nem égett tüzelőanyag mennyiségének megállapítására és — amint az előzőekben bemutattuk — a légfeleslegtényező illetve a légviszony meghatározására.

Az égéstermék nem hűthető le a környezet hőmérsékletére, annál nagyobb hőmérsékleten távoznak el a tüzelőberendezésből, amely jelentős veszteséget okozhat. Ez az ún. *füstgázveszteség* a füstgázok hőkapacitásával (tehát fajhőjével és mennyiségével) arányos. Ezért a szükségesnél nagyobb levegőfelesleg növeli a füstgázveszteséget, tehát rontja a tüzelés hatásfokát. A tüzelőberendezés annál gazdaságosabban működik, minél kisebb hőmérsékleten távoznak a füstgázok. A nagyobb mérvű lehűtésnek azonban több akadálya lehet. A kémény huzata a hideg és a meleg gázok sűrűségkülönbsége következtében fellépő felhajtóerőből adódik. Ha tehát a füstgáz nem elég melegen távozik, még kis kazánoknál sem megfelelő a kémény huzata, ezért szívóventilátorokat használnak. (Nagyobb kazánokhoz a kazán belső ellenállása miatt ventilátorokra mindenképpen szükség van.) A füstgáznak erősebb lehűtése azzal a veszéllyel is jár, hogy a vízgőztartalom kondenzálódik, és a cseppfolyósodott vízben a szén-dioxid, de főleg a kén-dioxid és az esetleg keletkező kén-trioxid oldódva nagyobb korróziót okozhat a kazán és a kémény hidegebb részein.

A füstgázok hőtartalma a kazánban a hőfejlesztés mellett a levegő előmelegítésére is használható. A levegő, (és gáz-tüzelés esetén a gáz) előmelegítése *regeneratív* és *rekuperatív* módon lehetséges. A regeneratív hőcserélőben szakaszosan, azonos térben, de különböző időben játszódik le az előmelegítés, illetve hőhasznosítás, a rekuperatív módszerrel folyamatosan, külön térben, de egyidejűleg megy végbe. Regeneratív előmelegítéskor a tüzelőberendezésből távozó forró füstgázokat tűzálló téglabéléssel kirakott kamrákon áramoltatják keresztül. A kamrában rácsszerűen elhelyezett téglák a forró gáz hatására az izzás hőmérsékletére hevülnek. Ekkor a forró füstgázokat más kamrákon vezetik át, az izzó kamrákon pedig a fűtőgázt és a levegőt áramoltatják keresztül. Ezek itt felmelegszenek, a regenerátorkamra pedig fokozatosan lehül. Amikor a hőmérséklete egy bizonyos értékig csökkent, ismét átváltják a gázok útját és a frissen felhevített kamrákon áramoltatják át a gázt és a levegőt, a forró füstgázokkal pedig a lehült generátort hevítik fel újból. Elterjedtebb nagyobb kazánokban a forgó regenerátor, ahol a hevítendő és a hevített közeg között a hőcsere olyan forgó hengeres kamrában történik, amely meggátolja a közegek közvetlen keveredését. Rekuperatív hőcseréléskor a felmelegítendő gázokat olyan csöveken vagy lemeztáskákon áramoltatják keresztül, amelyeket kívülről a berendezésből távozó forró füstgázokkal fűtenek.

A tüzelőszerkezet hőmérséklete nagyobb, mint a környezeté, ennek következtében a berendezés *sugárzás és vezetés* útján hőt ad le a környezetnek. A kisugárzott hőmennyiség függ a hőátadási tényezőtől, továbbá a hőátadó felület nagyságától és hőmérsékletétől. A kazánmagyság növelésével, valamint a szigetelés javításával a sugárzási veszteség csökkenthető.

Robbanóelegyek

Ha gyulladás után az oxidáció lassú, égésről (0,3-3 m/s lineáris égési sebesség), ha gyors, akkor robbanásról (1-3 km/s robbanási sebesség) beszélünk. Ha éghető gázt vagy gőzt bizonyos arányokban levegővel elegyítünk, az elegy meggyújtásakor robbanás következik be. Ezért lényeges az úgynevezett robbanóelegyek összetételét ismerni.

Ha levegőhöz kis mennyiségben fokozatosan éghető gázt vagy gőzt keverünk, elérünk egy olyan összetételt, amelynél az elegy éppen robbanékonyvá válik. Az éghető gáznak vagy gőznek a koncentrációja ebben az elegyben az alsó robbanási határ. Ha a koncentrációt fokozatosan tovább növeljük, elérjük azt az összetételt, amelynél az elegy már ismét nem robbanóképes, ez a felső robbanási határ. Csak a két robbanási határ közötti összetételű, és gyulladási hőmérsékletre felhevített gázelegy gyújtható meg. Néhány éghető gáz és gőz robbanási határát az 1.2.3. táblázat tartalmazza.

Gáz	Alsó robbanási határ, tf.%	Felső robbanási határ, tf.%
Hidrogén	4,1	74,0
Szén-monoxid	12,5	74,0
Metán	4,3	14,0
Etán	3,2	12,5
Propán	2,4	9,5
<i>n</i> -Bután	1,6	8,5
<i>n</i> -Heptán	1,1	6,0
<i>n</i> -Oktán	1,0	5,3
Benzin	1,2	7,0
Etilén	3,0	29,0
Acetilén	2,5	80,0
Etil-alkohol	4,3	20,0

1.2.3 táblázat **Gázok és gőzök robbanási határai levegővel légköri nyomáson**

Feladat: a táblázatban szereplő valamely vegyületre számoljuk ki, hogy az alsó és felső robbanási határ milyen λ értéknél van? (Az alsó robbanási határnál $\lambda > 1$, a felső robbanási határnál $\lambda < 1$.)

Szilárd tüzelőanyagok tüzelőszerkezetei

Az e csoportba tartozó tüzelőszerkezetek két fő típusa ismeretes: *rostélyos tüzelőszerkezetek és rostély nélküli tüzelőszerkezetek.*

Sok tüzelőszerkezetben a felmelegítendő anyag hevítése az égéstermékkel történik (lángkemence), a sugárzó hő rendszerint rostély nélküli tüzeléskor válik elsőrendűvé. Ha az égéstermékek közvetlenül érintkeznek a felhevítendő anyaggal, belső tüzelésű lángkemencéről beszélünk (téglaégető, ércolvasztó, pörkölő). Ha az égéstermékek falon át fűtik az anyagot, a szerkezetek külső fűtésű tokos kemencének nevezik (ilyenek elvileg pl. a kazánok is). A rostély feladata részben az izzó tüzelőanyag hordása, a salaktértől való elválasztása, másrészt az égéshez szükséges levegő egyenletes szétosztása a tüzelőanyagban. A használatos rostélyok között megkülönböztetnek sík-, lépcsős- és ferderostélyt, amelyek lehetnek álló vagy mozgó szerkezetűek. A *vándorrostélyú tüzelőszerkezetekben* a lánc- vagy vándorrostély végtelen láncot képez, amelyet két lánckerék mozgat. A tüztérbe kerülő szén fokozatosan felmelegszik, kokszolódik és végül elég. A lánc végéről a salak folyamatosan távolítható el. A berendezés teljesítménye könnyen változtatható, az egész szerkezet nagymértékben mechanizált.

Alkalmazása elsősorban nagy hamutartalmú és kisebb olvadáspontú hamut eredményező szenek esetében előnyös.

Rostély nélküli tüzelés a szénportüzelés, amelynek két alapvető módja a granuláló és salakolvasztós módszer. Előbbinél a szenet a hamu olvadáspontjánál kisebb hőmérsékleten tüzelik el, így a hamutartalom szállópernyeként távozik, ill. részben a tüztér alján salakként marad vissza. Az utóbbinál a hamu olvadáspontja feletti hőmérsékleten megolvasztják, s így visszatérhető a megolvadt állapotú salak. A szénportüzeléshez a szenet finom porrá őrlik (közben szárad is), megfelelő égő segítségével befúvatják a tüzelőberendezésbe, és itt lebegő állapotban játszódik le a lepárlási folyamat, majd a szénszemcsék elégeése. A szénpor nagy fajlagos felülete miatt gyorsan és jól keveredik a levegővel és jó hatásfokkal ég el. A berendezés könnyebben szabályozható, mint a rostélytüzelésé. Ezen előnyök mellett azonban nem hagyhatók figyelmen kívül a szén előkészítésének (szárítás, őrlés stb.) költségei.

Cseppfolyós tüzelőanyagok tüzelőszerkezetei

Cseppfolyós tüzelőanyagokként főleg kőolajtermékeket, esetleg szénlepárlási termékeket (kátránypárlatokat) használnak. Közülük a legjelentősebb a tüzelőolaj, amely kőolajpárlat, továbbá a fűtőolaj, amely a kőolaj atmoszferikus desztillációjának maradványa (pakura).

A cseppfolyós tüzelőanyagoknak számos előnyük van a szilárd tüzelőanyagokkal szemben. Hamutartalmuk rendszerint egészen jelentéktelen, és így eltüzelésük során gyakorlatilag csak gáz halmazállapotú égéstermékek keletkeznek. A tüzelés igen jó hatásfokkal végezhető el. Aránylag kevés felfűtési időre van szükség és igen nagy tüzelési hőmérséklet érhető el; a cseppfolyós tüzelőanyagoknak ugyanis nagy a fűtőértékük (kb. 42000 kJ/kg) és kisebb levegőfelesleggel éghetők el, mint a kőszenek.

A folyékony tüzelőanyagok égése könnyen szabályozható folyamat. A felhasznált tüzelőanyag minősége sokkal egyenletesebb lehet, mint az egyes kőszénféléseknél, továbbá a tárolás és szállítás is lényegesen egyszerűbb feladat. Az említett előnyökből következik még az is, hogy a berendezések nagymértékben automatizálhatók, és így az olajtüzelés sokkal korszerűbb és termelékenyebb, mint a szilárd tüzelőanyagokkal való tüzelés. A cseppfolyós tüzelőanyagok elégetésére használt égőket aszerint csoportosítják, hogy az olajat hogyan készítik elő az eltüzeléshez. Megkülönböztetnek elgázosítással és porlasztással működő égőket.

Elgázosító égők. Ezen égőtípus elve, hogy a kőolajpárlat egy forró felülettel érintkezve elpárolog, majd a képződött gőzök az égéshez szükséges levegővel elegyednek, és ezt követően elégnék. Csak olyan desztillált olajokat égethetnek el ezzel a módszerrel, amelyeknek a kokszosodási hajlama kicsi. A fűtőolajból ugyanis bomlás, vagy nem teljesen tökéletes elpárolgás következtében kokszerakódások keletkeznek az elgázosító felületen vagy annak közelében, ahol elégni nem tudnak, és így üzemzavarokat okozhatnak.

Porlasztós égők. Elporlasztás esetén az égőkben a fűtőolajok (pakura) is eltüzelhetők. A kőolajtermék itt először finom eloszlású köddé alakul, majd a levegővel elegyedik, és így az esetleg kiváló elemi szén is lebegő állapotban könnyen el tud égni. A fűtőolajokat nagy viszkozitásuk miatt elő kell melegíteni, s csak így porlaszthatók, illetve tüzelhetők el.

A porlasztókat nyomásos, segédközege és mechanikus csoportokra oszthatjuk. A segédközege porlasztók segédközege levegő vagy vízgőz.

Gáz halmazállapotú tüzelőanyagok tüzelőszerkezetei

A különféle halmazállapotú tüzelőanyagok közül legelőnyösebben a gázok tüzelhetők el. A földgáz mellett régen generátorgázt, vízgázt, szénlepárlási gázokat (ld. később), illetve ezek különböző elegyeit használták fel tüzelésre.

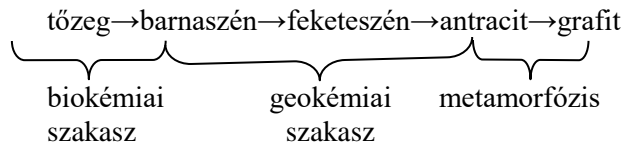
A gáztüzelés egyik legfőbb előnye, hogy könnyen és gyorsan szabályozható, így nagyfokú automatizálásra van lehetőség. Minthogy a gáz tökéletesen elegyíthető az égéshez szükséges levegővel, a teljes elégés biztosításához csak csekély (10 % alatti) levegőfelesleget kell alkalmazni. Míg az egyéb tüzelőberendezések üzemeltetésekor igen sok szempontra kell tekintettel lenni, a gázégőknél a tüzelés igen egyszerűen, a gáz és a levegő mennyiségének változtatásával szabályozható, és a tüzelés kevesebb személyzetet igényel. További számos előnye közül megemlítendő, hogy a gáz fűtőértéke egyenletes, a földgáznál nagy is, így nagyobb láng hőmérséklet érhető el vele. Tisztább és egyszerűbb a tüzelés (nincs hamu, pernye), a szállítás könnyebb és veszteségmentes, tárolásra nincs szükség, a tüzelőszerkezet kisebb helyet igényel.

A gázok elégetésekor is a primer levegőt előzetesen keverik hozzá, míg a tökéletes égéshez szükséges levegő mennyiségét – a szekunder levegőt – a láng környezetében levő levegő szolgáltatja. Ha a primer levegő mennyiségét növelik, bizonyos mennyiség felett a láng leszakad, vagy visszaég. Ha a primer levegő mennyiségét csökkentik, elérnek egy határt, amely alatt a láng színessé válik, tovább csökkentve pedig egyre világítóbb és kormozóbb lángot kapnak a hóbomláskor keletkező finoman elosztott szénzemcsék következtében.

1.2.2. A kőszén

A kőszén korábban nagyobb szerepet játszott fosszilis energiahordozó. Főként azért tárgyaljuk, mert készletei a kőolajhoz és földgázhoz képest sokkal nagyobbak, így felhasználása újra előtérbe kerülhet, ha a környezetvédelmi problémákat sikerül megoldani, illetve a gazdaságosság szempontjából is javul.

Az ún. szénülés folyamatában keletkezett, az elmúlt geológiai korszakok lánövényszerének maradványai a felszín alá süllyedtek, fedőréteg került rájuk, és kémiai átalakuláson mentek keresztül. A szénülés szakaszai:



A szénülés során oxigén-tartalmú csoportok, alifás láncok, CO₂, CH₄, H₂ szakad le, a karbon-tartalom növekszik, a hidrogén-, oxigén- és víztartalom csökken. A barnaszén átlagos móltömege kb. 1400, a feketeszéné 3000 – 100000 közötti. A geokémiai szakasz összetétel-változását ld. az 1.2.4. táblázatban. Az táblázatban a kén- és a nitrogéntartalom nem szerepel. Előbbi 0,5-5%, utóbbi 1-2%.

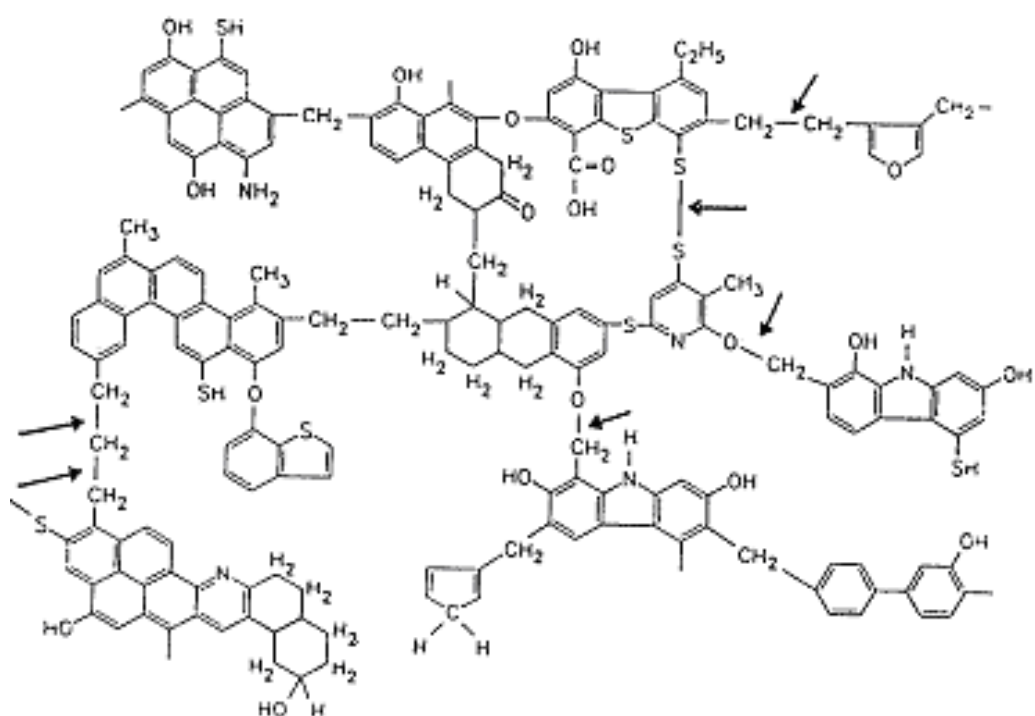
Széntípus	Nedvesség %	Nedvesség- és hamumentes állapotra számított				Égéshő [MJ/kg]
		Illórész %	Karbon %	Hidrogén %	Oxigén %	
Lágy barnaszén	50-65	50-60	65-70	5-8	18-37	24-27
Kemény barnaszén						
Fényes barnaszén						
Lángszén						
Gázlángszén						
Gázszen						
Zsírszen						
Kovácsszen						
Sovány szén						
Antracit	<1,0	<12	>91,5	<3,75	<2,5	35-34

1.2.4. táblázat **Barna- feketekőszének nedvessége, illórésze, elemi összetétele és égéshője**

A kőszén szerkezet egy lehetséges modelljét mutatja be az 1.2.2. ábra. Látható, hogy főként többszörösen kondenzált aromás csoportok építik fel. A nyilak a hevítés hatására elszakadó kötéseket mutatják. A kőszén ásványi alkotói, pl. pirit (FeS₂), mészkő (CaCO₃), dolomit (CaMg(CO₃)₂), FeCO₃, agyagásványok, gipsz, kvarc, stb. égetéskor hamut adnak.

A kőszént külszíni fejtéseken nyerik (pl. Magyarországon Visontán), vagy mélyművelésű bányákból hozzák felszínre. Előbbiek olcsóbbak, de a bánya bezárása után nagy költség a rekultiválás. Utóbbiakban gyakori a karsztvíz-betörés, a (szénülés során keletkező metán okozta) sújtólég-robbanás.

A szenet a felhasználás előtt elő kell készíteni. Ennek egyik művelete a *dúsítás*, amikor a nem éghető ásványi anyagok mennyiségét, az ún. meddőtartalmat csökkentik. Ennek módja az *ülepítés* és a *flotálás*. Az ülepítésnél azt használják ki, hogy a meddő nagyobb sűrűségű, utóbbinál pedig ezt, hogy a szén szemcse hidrofób a meddő pedig hidrofil. A további előkészítő művelet a szárítás és a briketkezés, amikor a porszenet kötőanyaggal (pl. szurokkal, ld. később) vagy a nélkül (nyomással) darabosítják.



1.2.2. ábra. Kőszén szerkezeti modellje

A kőszén tüzelőanyagként történő közvetlen felhasználása egyre jobban visszaszorul, mert a szén fűtőértéke a tüzelő és fűtőolajhoz képest kisebb (5000 – 25000 kJ/kg), hamutartalma, víztartalma, kén tartalma jelentős lehet, a bányászata, szállítása drágább, az égetés nehezebben automatizálható, kisebb hatásfokú, az égetés jelentős környezetszennyezéssel jár. A kén-dioxid tartalom eltávolítható ugyan a füstgázból, pl. meszes ($\text{Ca}(\text{OH})_2$ -os) mosón történő elnyeletéssel, de hatalmas a beruházási költség, nagy mennyiségű gipsz (CaSO_4) keletkezik. Emellett széntüzeléskor jelentős a pernye és por-kibocsátás, (amelynek leválasztása szintén jelentős költséggel jár), valamint a NO_x kibocsátás.

A széntüzelésről a szilárd tüzelőanyagok tüzelőszervezetei c. részben már szóltunk. A szénportüzelés egy speciális megvalósítása az örvényágyas tüzelés, amelynél a tüzelőanyagot a tüztérben lebegésben tartva égetik el, és a kazánba mészkövet is juttatnak, amelynek a bomlásakor keletkező CaO a szén kén tartalmából keletkező kén-dioxidot megköti.

Szénfeldolgozás

Szénleparlás vagy kigázosítás (kokszolás)

A kőszén felhasználásának ma sem nélkülözhető módja, amelynek termékeként a nyersvasgyártáshoz szükséges kohászati kokszt állítható elő. Ekkor a kőszent levegőtől elzárt térben mintegy 1250 °C-ra hevítik.

A keletkező termékek:

- kamragáz
- kátrány
- gázvíz
- kokszt

A kamragáz szén-monoxidot, hidrogént, metánt, szén-dioxidot, etánt, etilént, nitrogént, kén-hidrogént tartalmazó éghető gáz, régen városi gázként használták fel. Ma általában a kokszolóban hasznosítják. A kátrány és a gázvíz folyékony termékek. A kátrány sokféle vegyületet, főként

aromásokat tartalmaz. Desztillációval frakciókra bontják, a maradék a szurok. A párlatok fatelítésre vagy fűtőolajként hasznosíthatók, a szurok útépitésre, szigetelésre brikettezésre, vagy kokszosítva elektród-szénként hasznosítható. A gázvízből ammónia nyerhető, a benne levő szerves vegyületek (fenolok) miatt élővízbe tisztíthatatlanul nem engedhető.

A kigázosítás célterméke a koksz, amelyet a vaskohászatban vagy tüzelőanyagként hasznosítanak. Fontos a kohókoksz nyomószilárdsága (a kohóban nem roppanhat össze), kis illó- és kén-tartalma, kis hamutartalma. Csak jó sülőképességű szenekből készíthető megfelelő szilárdságú kohókoksz.

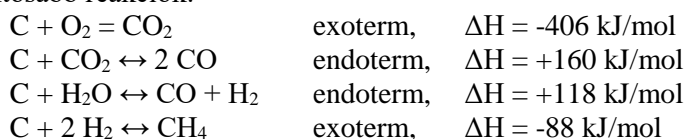
A kigázosítást 8-10 m hosszú, 40-45 cm széles, 5-6 m magas, kívülről hevített kamrákban hajtják végre, 20-22 óra alatt. Hevítéskor a szén $\sim 350^\circ\text{C}$ -on megolvad, ez egységes szerkezetet biztosít, majd $\sim 450^\circ\text{C}$ -on újra megszilárdul. Hevítés után a keletkező kokszot a kamrából kitolják, vízzel hűtik. Ma Magyarországon Dunaújvárosban működik kokszoló.

Néha a lepárlást alacsonyabb, $\sim 600^\circ\text{C}$ -os hőmérsékleten végzik. Ennek főterméke a kátrány. A keletkező ún félkoksz kohászati célra nem elég szilárd, fűtésre használható.

Szénelgázosítás

A kőszén feldolgozás másik klasszikus módszere a szénelgázosítás. Ennek célja lehet (a szilárd halmazállapotú kőszén helyett jobban hasznosítható) éghető gáz nyérése, vagy vegyipari szintézisekhez szintézisgáz (CO és H_2 tartalmú gáz) előállítása. Az elgázosításkor az izzó állapotú szén reakcióba lép oxigénnel és vízgőzzel, az éghető gáz mellett salak keletkezik.

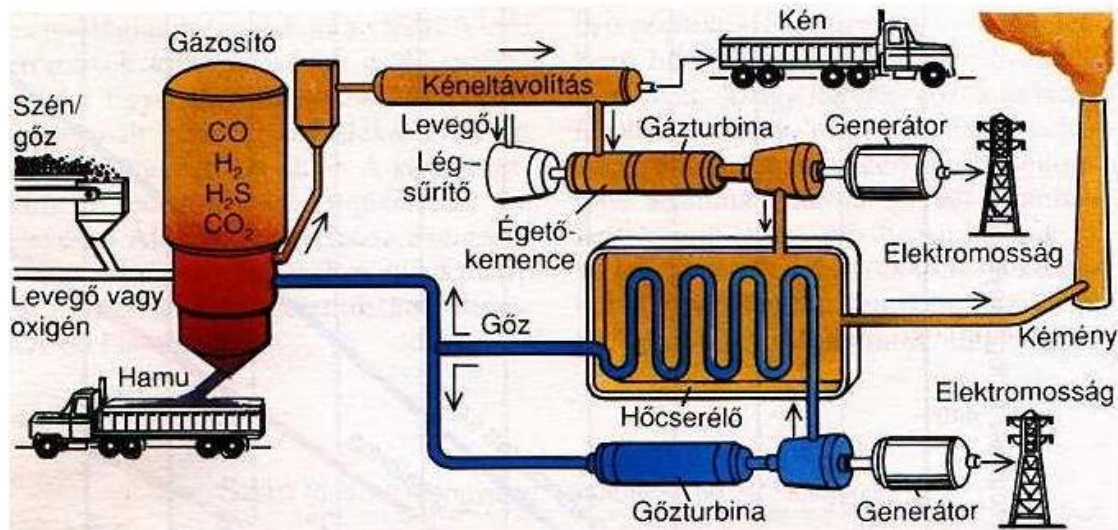
A fontosabb reakciók:



A megfordítható kémiai reakciókban az egyensúlyok eltolhatók (ld. Le Chatelier elv), így a termék-összetételt az alkalmazott nyomás és hőmérséklet, valamint a betáplált anyagok összetétele befolyásolja. A hőmérséklet növelése kedvez a vízgőz és CO_2 bomlásának (az endoterm folyamatoknak), a nyomás növelése kedvez a CH_4 képződésének (a térfogatcsökkenésnek) és gátolja a vízgőz és a CO_2 bomlását.

A klasszikus gázgenerátorban a kőszentet felül adagolják, míg az oxigént és a vízgőzt alul. A felülről lefelé haladó kőszén először megszárad, majd az oxigénhiányos térben $400\text{-}800^\circ\text{C}$ -on lepárlás és az itt keletkezett félkoksz előmelegítése játszódik le. Ez alatt, az ún. reakciós zónában $800\text{-}1200^\circ\text{C}$ -on az izzó szén redukálja az alulról felfelé haladó szén-dioxidot, illetve még lejjebb, $1200\text{-}1500^\circ\text{C}$ -on történik a szén égése. A keletkező salak alul távolítható el, a gárgáz pedig felül.

Korábban az elgázosítás fő célja éghető gáz nyérése volt, ma csak néhány országban, szinte kizárólag szintézisgáz előállítására használják. A szintézisgáz ma ugyanis olcsóbban nyerhető földgázból. Az elgázosítás azonban a szén eltüzelését megelőzheti, s az így nyert gázhalmazállapotú tüzelőanyagból a kén-dioxid könnyen eltávolítható. Ilyen korszerű, kombinált szénerőművet mutat be az 1.2.3. ábra.



1.2.3. ábra. **Egyesített szénelgázosításos kombinált ciklus (IGCC).**

A szénalapú erőművek szennyezőanyag-kibocsátása a technológia függvénye. Ezt mutatja be az 1.2.5.táblázat, 3,5 tömeg % kéntartalmú szenet feltételezve.

Energiatermelési mód	Évi emisszió (t/MW teljesítmény)		Évi szilárd hulladék (t/MW teljesítmény)
	SO ₂	NO _x	
Szénportüzelés + füstgázkéntelenítés	14	8	750
Örvényágyas széntüzelés (atmoszférikus nyomáson)	7	4	1200
Szénelgázosítással kapcsolt kombinált ciklus	4	3	300

1.2.5. táblázat **Szénalapú erőművek emissziói és szilárd hulladék mennyiségei**

Szénecseppfolyósítás

A kőszén cseppfolyósításának célja motorhajtó anyagok, szénhidrogének előállítása. Egyes nyersanyagok és termékek H/C atomarányát és átlagos molekuláris tömegét az 1.2.6. táblázat (ld. az 1.2.3. fejezetben) mutatja be. A táblázat áttekintése alapján megállapítható, hogy a kőszén cseppfolyósításához a molekulákat tördelni, és hidrogén tartalmukat növelni kell. A cseppfolyósítást direkt vagy indirekt módon lehet megvalósítani.

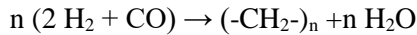
▪ *direkt cseppfolyósítás*

A kőszén megőrlik, olajjal sűrű péppé alakítják, majd kb. 500 °C-on, 300 – 700 bar hidrogén nyomáson 1-2% Fe₂O₃ katalizátor jelenlétében kezelik. (Ez a katalizátor nem használható újra.) Mintegy 100 tömegrész szénből és 2-6 tömegrész hidrogénből 70 tömegrész (a benzin és a gázolaj forráspontjának megfelelő forráspontú) folyadék, valamint gáz nyerhető. Az eljárás a számos technikai nehézség ellenére már a két világháború között megvalósult, de ma sehol sem alkalmazzák, mert nem gazdaságos. A keletkező benzin rossz oktánszámú, (de jobb, mint az indirekt cseppfolyósításnál), a gázolaj azonban jó cetánszámú (az oktánszám és cetánszám definícióját ld. később). A technológiai nehézségeket a termékválasztás, a nagy nyomás, a szénpor koptató hatása és a H₂ reakciója az acél C tartalmával okozza.

▪ *indirekt cseppfolyósítás*

A kőszénét először elgázosítják, majd a szintézisgázból az ún. Fischer-Tropsch szintézissel szénhidrogéneket nyernek.

A Fischer - Tropsch szintézis, az



reakció révén, kb. 200 °C hőmérsékleten, Co, Fe katalizátoron különböző szénhidrogéneket eredményez. (Ezeket jelöli a reakcióegyenletben a $(-\text{CH}_2-)_{\text{n}}$.)

A keletkező termékek:

gázok (metán, etán, etilén)
benzin frakció
gázolaj frakció
szilárd paraffin.

A termék-összetétel szabályozható a gázkeverék komponenseinek arányával, a katalizátorral, a nyomással. Dél-Afrikában működött ilyen üzem, létesítésének oka a korábbi apartheid politika miatti kőolaj embargó volt.

A szintézisgázból *metanol is előállítható a*

$2 \text{ H}_2 + \text{ CO} \rightarrow \text{CH}_3\text{-OH}$ reakcióegyenlet szerint, 250-350 bar nyomáson, 300-400 °C -on Cr-oxid katalizátor, vagy 40-100 bar-on, 200-220 °C -on Cu tartalmú katalizátor jelenlétében.

Az így nyert metanol maga is felhasználható motorhajtó anyagként, illetve belőle a *Mobil eljárással* is előállíthatók szénhidrogének:



Az első két folyamatban vízkilépés, az utolsóban polimerizáció, átrendeződés, gyűrűképződés (ciklizáció) játszódik le. A reakció 380-425 °C-on, speciális pórusméretű zeolit katalizátoron hajtható végre. A zeolit pórusmérete miatt a keletkező szénhidrogének szénatomszáma max. 10. Mivel a termék 44% szénhidrogént és 56% vizet tartalmaz, az eljárás drága.

Megjegyzendő, hogy szintézisgázt nemcsak a kőszénből nyerhetünk, metán (földgáz) vagy bármely szénhidrogén tartalmú elegy (pl. könnyűbenzin) is vízgőz jelenlétében, ~900°C-on, Ni katalizátoron CO-t és H₂-t tartalmazó gázeleggyé, szintézisgázzá alakítható. A szintézisgáz számos egyéb kémiai szintézis kiinduló anyaga lehet.

1.2.3. A kőolaj és földgáz, mint tüzelőanyag

A kőolaj és földgáz **keletkezése** a *szervetlen elmélet* (fém-karbidok reakciója túlhevített vízgőzzel) alapján nem bizonyított. A *szerves elmélet* szerint tengeri planktonok, baktériumok elpusztult szervezeteiből üledék rakódott le a tengerfenéken, amely anaerob bomlásának eredményeként (termikus bomlás, krakkolódás, kisebb, termodinamikailag stabilabb szénhidrogének keletkezése) keletkezett a kőolaj. A bomlásban kiemelt a nyomás és a hőmérséklet szerepe. Ha $t \geq 60$ °C, 40-50 millió év szükséges a folyamat lejátszódásához.

A kőolaj összetétele:

elemi összetétel (tömeg %):

C	85-89
H	10-14
S	0,2-6 (általában 0,5-3)
O	0-1,5
N	0,1-1,5
Ni	0,001
V	0,003

kémiai összetétel: főként szénhidrogének

20-60% alifás telített, azaz paraffin (mennyisége a korrallal nő)

50-25% ciklusos telített, azaz cikloparaffin, vagy más néven naftén (mennyisége a korrallal csökken)

30-15% aromás (mennyisége a korrallal csökken, majd nő)

S, N, O tartalmú vegyületek

0,01-0,05%-ban V, Ni, Na fémek, ezek a hamualkotók

telítetlen szénhidrogének gyakorlatilag nincsenek benne, hiszen ezek reakcióképessége nagy, az évmilliók alatt elreagálhattak

Egyes nyersanyagok és termékek H/C atomarányát és átlagos molekuláris tömegét az 1.2.6. táblázat mutatja be.

	H/C atomarány	átlagos móltömeg
benzin	2,0	100
kőolaj	1,6	300
atm. deszt. maradvány	1,4	~500
vákuum deszt. maradvány	1,3	~1000
kőszén	0,5	~10000

1.2.6. táblázat Egyes nyersanyagok és termékek H/C atomaránya és átlagos molekuláris tömege

Halmazállapota folyadék, de egytől négy szénatomig ($C_1 - C_4$, metán – bután) oldott gázok, és szilárd szénhidrogének (C_{17} -től) is előfordulnak benne.

Csoportosítása:

a szénhidrogén összetétel szerint

paraffin és

naftén bázisú, azaz főként ilyen típusú szénhidrogének alkotják, ill.

intermedier (kevert)

a frakciók (forráspont eloszlás) szerint

„Könnyű” sok a kis forráspontú alkotó (Norvégia, Nigéria)

„Közepes” (Szaud Arábia, Nagy-Britannia)

„Nehéz” sok a nagy forráspontú alkotó (Venezuela, Alaszka)

a S tartalom szerint

<1% kicsi (édes)

1-1,5% közepes
>1,5% nagy (savanyú)

A legértékesebbek a könnyű, (sok motorhajtóanyag előállítására alkalmas), édes kőolajok.

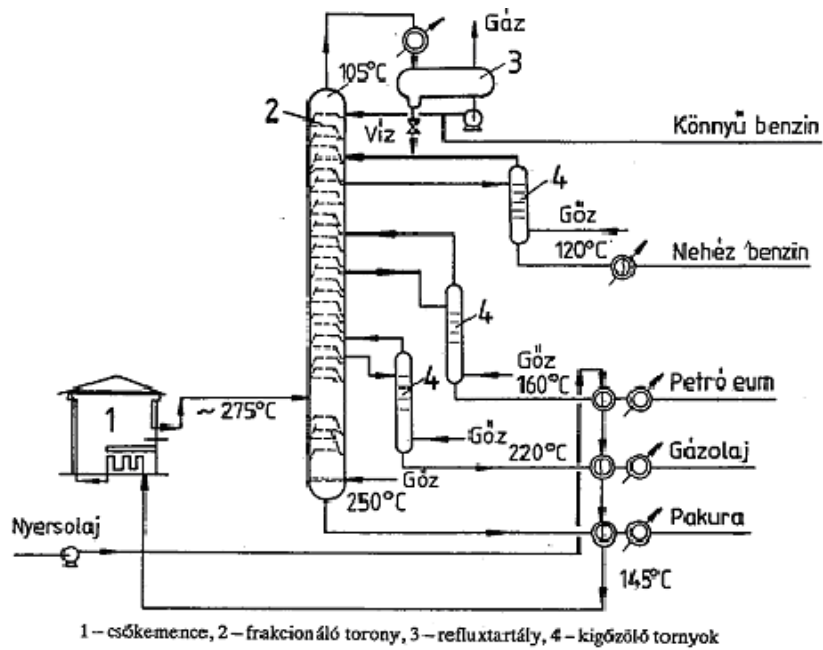
Bányászata: fúrótornyokkal, ha a közeg nyomása már nem elegendő a felszínre hozatalhoz, segédközegek bepréselésével (másodlagos, harmadlagos kitermelés).

Előkészítése: sómentesítés, vízmentesítés, kis szénatomszámú szénhidrogének (gazolin) elválasztása

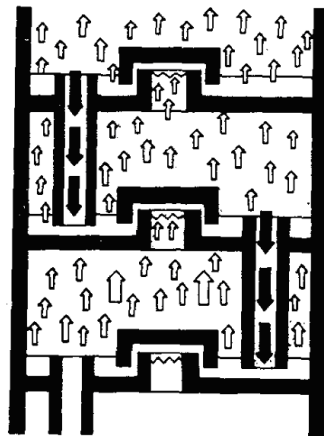
Felhasználása: A kőolaj nagyon bonyolult összetétele miatt közvetlenül nem használható fel, az alkotóit homogénebb összetételű részekre ún. frakciókra kell bontani, majd azokat különböző kémiai átalakításnak kell alávetni, amelyet kőolaj finomítókban végeznek. Az elválasztás legegyszerűbb és leggazdaságosabb módja a **desztilláció**.

A desztilláció a komponensek forráspontjának különbözőségén alapuló elválasztás. Ha egy többkomponensű folyadék elegyet elpárologatunk, a gőztérben feldúsulnak az illékonyabb, kisebb forráspontú komponensek, míg a folyadékban visszamaradnak a kevésbé illékony, nagyobb forráspontúak. A gőz elvezetésével és kondenzáltatásával az eredetihez képest megváltozott összetételű frakciók nyerhetők. A desztilláció végezhető szakaszosan, amikor a folyadék hőmérséklete időben változik, és egymás után távoznak az egyre nagyobb forráspontú komponensek. A folyamatos üzem termelékenyebb. Ekkor a hőmérséklet egy desztillációs oszlop (kolonna) mentén alulról felfelé haladva csökken, mivel az előmelegített folyadékelegyet a kolonna alsó harmadába, az ún. evaporátor térbe vezetik, míg a torony tetején elvezetett gőzök egy részét hűtéssel kondenzáltatják és visszavezetik a torony tetejére (reflux). Az alulról felfelé áramló gőzök, és a lefelé csorgó folyadék között intenzív anyag- és hőcserét kell biztosítani, hogy az adott magasságban uralkodó hőmérsékleten kialakuljon az egyensúlyi állapot a gőz és a folyadék fázis között. A kőolaj atmoszférikus nyomáson végrehajtott desztillációjának folyamatábráját mutatja az 1.2.4. ábra. A gőz-folyadék érintkeztetés klasszikus megoldása az ún. buboréksapkás tányér, amelynek szerkezete az 1.2.5. ábrán látható. A torony tetszőleges helyeken „megcsapolható”, így különböző forráspont (és szénatomszám) tartományú frakciók nyerhetők. A desztilláció termékei a párlatok (fehérárúk): benzín, petróleum, gázolaj, a torony alján a pakura gyűlik össze.

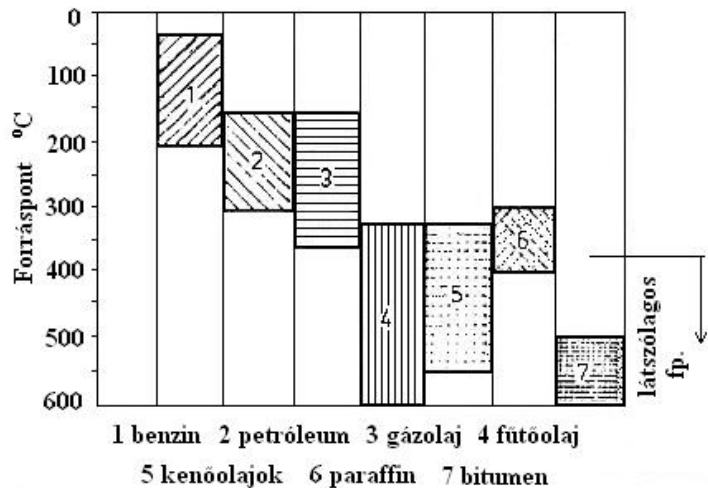
A pakurát alkotó szénhidrogének forráspontja légköri nyomáson olyan magas, hogy desztillációval már nem választhatók szét a hőbomlás (a molekulában levő szén-szén kötések elszakításának) veszélye nélkül. (A kőolaj nem melegíthető a molekulák tördelődése nélkül 400 °C fölé.) A pakurát alkotó szénhidrogének szétválasztása ezért vákuumban végrehajtott desztillációval történik. (A folyamatábrát ld. később a kenőolajgyártásnál, II. kötet 2.1.2. ábra.) Mint tudjuk, a forráspont a külső nyomás függvénye, csökkentett nyomáson a forráspontok is kisebbek. A vákuumdesztilláció termékei: vákuumgázolaj, paraffinos kenőolajpárlatok, a maradvány a gudron. A kőolaj-desztilláció főbb termékeinek forráspontjait (atmoszférikus nyomáson, ill. atmoszférikus nyomásra átszámítva) az 1.2.6. ábra mutatja.



1.2.4. ábra. Folyamatos üzemű kőolajdesztilláció folyamatábrája



1.2.5. ábra. A frakcionáló torony működési elve



1.2.6. ábra. A főbb kőolajtermékek forráspontjai légköri nyomáson

Az atmoszférikus, ill. vákuumdesztilláció termékei közvetlen felhasználásra csak nagyon ritkán alkalmasak. Részben a szénhidrogén összetétel nem megfelelő, ill. el kell távolítani a (heteroatomos) szennyezőket, és gyakran a forrásponttartomány is pontosabban beállítandó. Másrészt a kőolajból nyert értékes termékek, a fehérárúk, a motorhajtásra alkalmas kisebb szénatomszámú szénhidrogének mennyisége kisebb, mint a felhasználási igény, míg a nagyobb szénatomszámú, főként maradvány olajok mennyisége az igényeket meghaladja, eltüzelésük az egyre szűkülő készletek miatt ésszerűtlen, ezért a nagyobb szénatomszámú szénhidrogének tördelésével, krakkolásával kisebb szénatomszámú frakciókat állítanak elő. A kőolajfeldolgozó üzemekben ezért ún. konverziós (átalakító) és hozamnövelő (feldolgozottság növelő) eljárásokat alkalmaznak, valamint petrolkémiai termékeket állítanak elő. Ezekben a technológiákban sok helyen keletkeznek olyan termékek, melyek tüzelő vagy fűtőolajként forgalomba hozhatók. Tüzelőolaj alatt a kisebb forráspontú párlatokat, fűtőolaj alatt általában a nagyobb forráspontú maradványokat értik.

A **tüzelőolaj** forráspont tartománya 160°C-390°C (általában gázolaj).

Összetétele:

- telített szénhidrogének 73-78%
- monociklusos aromás szénhidrogének 15-20%
- biciklusos aromás szénhidrogének 4-5%
- triciklusos aromás szénhidrogének 0,5-1%
- tartalmaz ezen kívül S, N O tartalmú vegyületeket is.

A tüzelőolaj fűtőértéke legalább 42,0 MJ/kg. fontos tulajdonságait az 1.2.7. táblázat tartalmazza,

Jellemzők	TÜ 5/20
Szín	piros
Sűrűség 15 °C-on, g/cm ³ , legfeljebb	0,820-0,860
Viszkozitás 20°C-on, mm ² /s	2,0-8,0
Lobbanáspont, (PM), °C, legalább	55
Folyáspont, °C legfeljebb	-5
Conradson-szám, %(m/m), legfeljebb	0,05
Kéntartalom, % (m/m), legfeljebb	0,2
Oxidhamu, % (m/m), legfeljebb	0,01
Mechanikai szennyeződés, % (m/m), legfeljebb	0,05
Desztillációs hőmérséklet, amelyen a termék 90% (V/V)-a átdestillál, °C, legfeljebb	370
Víztartalom, legfeljebb	nyomokban

1.2.7. táblázat. **Tüzelőolaj tulajdonságai, tipikus jellemzői**

A tüzelőolaj dermedéspont csökkentő, (-10°C), és fém dezaktivátor (a tárolása akár 3 évig is eltarthat) adalékokat tartalmazhat.

A **fűtőolaj** (pl. pakura), a tengerjárók, erőművek, nagy ipari kemencék tüzelőanyaga. A benne lévő szénhidrogének móltömege akár 20000 is lehet, szobahőmérsékleten bedermed, csak melegítve szállítható ill. porlasztható.

- m_C~ 0,875
- m_H~ 0,10
- m_S~ 0,018
- hamu ~0,1%

tartalmaz ezen kívül oxigén- és nitrogén-tartalmú vegyületeket is.

Fontos tulajdonságait az 1.2.8. táblázat tartalmazza. Adalékokat ritkán kevernek hozzá. A tüzelő és fűtőolaj eltüzelését ld. a Tüzeléstechnika c. fejezetben.

Jellemzők	Extra könnyű fűtőolaj	Közép-fűtőolaj	Nehéz fűtőolaj
Külső	sötét színű, nem átlátszó		
Viszkozitás 100°C-on, mm ² /s	legf. 4,4	25-40	76-45
Lobbanáspont, (Cleveland), °C, legalább		101,0	
Folyáspont, °C legfeljebb		51,0	
Kéntartalom, % (m/m), legfeljebb	0,2	3,0	3,5
Oxidhamu-tartalom, % (m/m), legfeljebb		0,5	
Víz-tartalom, (m/m), legfeljebb		0,5	
Mechanikai szennyeződés, % (m/m), legfeljebb		0,5	

1.2.8. táblázat. Fűtőolajok tulajdonságai, tipikus jellemzői

A földgáz

A kifejezés jelentése földből nyerhető gáz.

A földgáz a kőolajhoz hasonlóan keletkezett, leggyakrabban a kőolajtelepek kísérője. Általában kis szénatomszámú szénhidrogénekből, legnagyobb részben metánból áll. Savanyúnak nevezik, ha H₂S- és CO₂ tartalmú. (A kén-hidrogén korróziót okoz, a szén-dioxid ballaszt tömeg.) Nedvesnek nevezik, ha több, nagyobb forrásponthú szénhidrogént tartalmaz, ill. H₂O tartalmú. A metánál nagyobb forrásponthú szénhidrogénekből LPG (liquefied petroleum gas, azaz propán-bután) nyerhető, a vízből kristályok válhatnak ki.

Néhány földgáz összetételét mutatja be az 1.2.9. táblázat.

Lelőhely	Összetevők							
	Metán	Etán	Propán	Bután	Pentán	CO ₂	N ₂	H ₂ S
Franciaország (Lacq)	69,3	3	0,9	0,6	0,8	9,3	0,2	15,8
Norvégia, Északi-tenger (Ekofisk)	90,8	6,1	0,7	0,1	-	1,8	0,5	<0,1
Egyesült Áll.-Texas (Panhandle)	73,2	6,1	3,2	1,6	0,6	0,3	14,3	0,6
Szaud-Arábia (Dammam)	73	3,9	1,1	0,8	0,3	10,8	8,5	1,5
Szovjetunió (távvezetési)	92	3,6	0,9	0,3	0,2	1,5	1,5	-
Magyarország								
Algyő	88,2	4,6	2,1	1,3	2,3	0,9	0,6	-
Hajdúszoboszló	93,3	2,2	0,8	0,2	0,3	0,4	2,8	-
Mezőhegyes	33,1	4,2	2,3	1,4	1,1	54	3,7	-

1.2.9. táblázat. Néhány földgázfajta összetétele

Előkészítése: kb. 400 bar nyomásról expandáltatják 100 bar-ra (kondenzáció), majd tisztítják.

Szállítás: gázvezetéken, vagy cseppfolyósítva (a gáz térfogatának 1/600-ad része) tankhajóval (forráspont légköri nyomáson: -162 °C!)

Felhasználása: főként kisebb fogyasztóknál, háztartásokban tüzelésre, ill. szintézisgáz gyártására, ld. korábban.

1.2.4. Motorhajtóanyagok

Ma a kőolaj felhasználásának legfontosabb területe a motorhajtóanyagok előállítása.

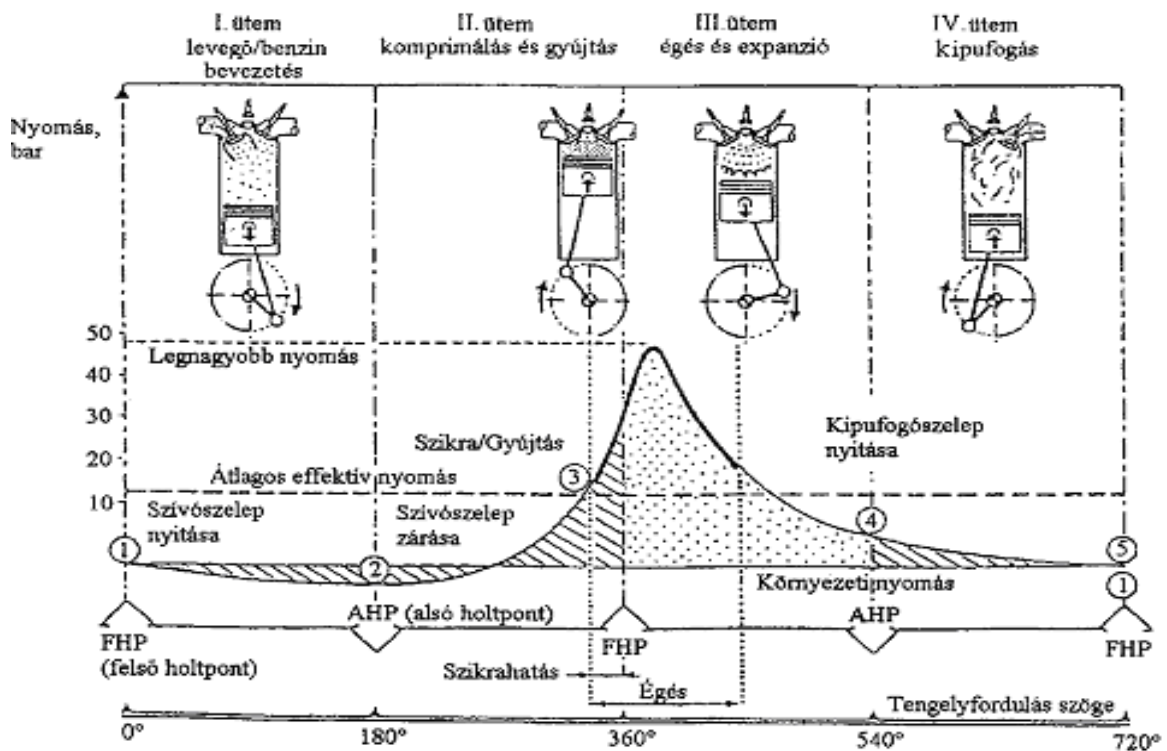
Először (a tulajdonságok megértése érdekében) megismerkedünk a belsőégésű motorok működésével, majd felsoroljuk azokat a motor által megkövetelt tulajdonságokat, amelyekkel a zavartalan üzem érdekében rendelkeznie kell a motorhajtó anyagoknak. Ezt követően a motorhajtóanyagok előállítását, az elégetésük környezetvédelmi kérdéseit, végül a jövő motorhajtóanyag alternatíváit tárgyaljuk.

A belsőégésű motorok:

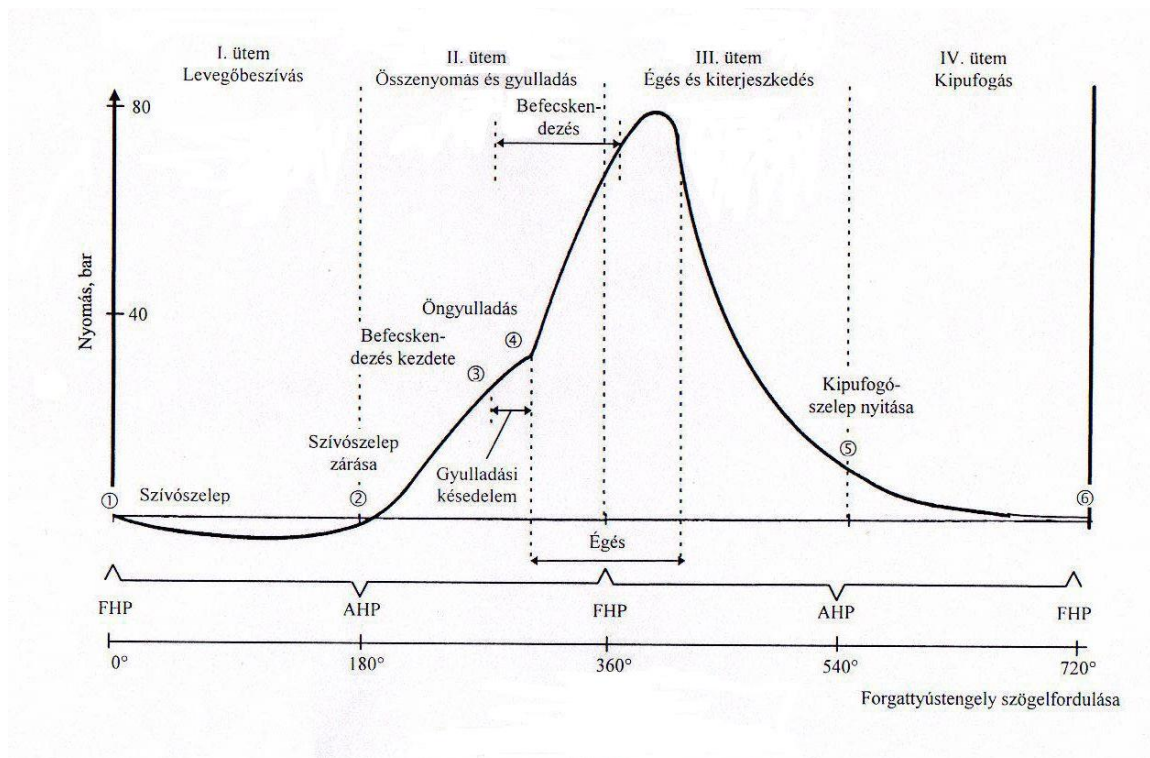
- reciprokáló (dugattyús) - Otto-motor, hajtóanyaga motorbenzin
- Diesel-motor, hajtóanyaga gázolaj, vagy más néven dízel olaj
- gázturbina, hajtóanyaga speciális petróleum (kerozin)

A négyütemű Otto- és Diesel motor működését az 1.2.7. és 1.2.8. ábrán mutatjuk be.

Az ábrákon az x tengelyen a forgattyús tengely szögelfordulása (azaz az idővel arányos mennyiség) míg az y tengelyen a hengertérben uralkodó nyomás szerepel.



1.2.7. ábra. A négyütemű Otto motor működési elve



1.2.8. ábra. A négyütemű Diesel motor működési elve

A dugattyús motorok működési paraméterei:

	Otto	Diesel
keverékképzés	külső	belső
szabályozás	mennyiségi	minőségi
λ (légvizony)	$\approx 1, \approx$ állandó	mindig >1 , változó
gyújtás	szikra	öngyulladás
sűrítési viszony	≈ 10	15-22
sűrítési csúcshőmérséklet	400-500 °C	600-900 °C
előgyújtás	5-30°	—
befecskendezés	—	10-25°
égési csúcshőmérséklet	2000-2500 °C	1800-2100 °C
középnomás	6-12 bar	5-8 bar
kipufogógáz hőm. teljes terhelésnél	700-1000 °C	500-700 °C
kipufogógáz hőm. részleges terhelésnél	300-500 °C	200-300 °C

A gázturbinában az égetés folyamatosan égetőkamrában történik, a kiáramló forró füstgázok hajtják a turbinát, ill. sugárhajtású gépekben reaktív erejük mozgatja a gépet.

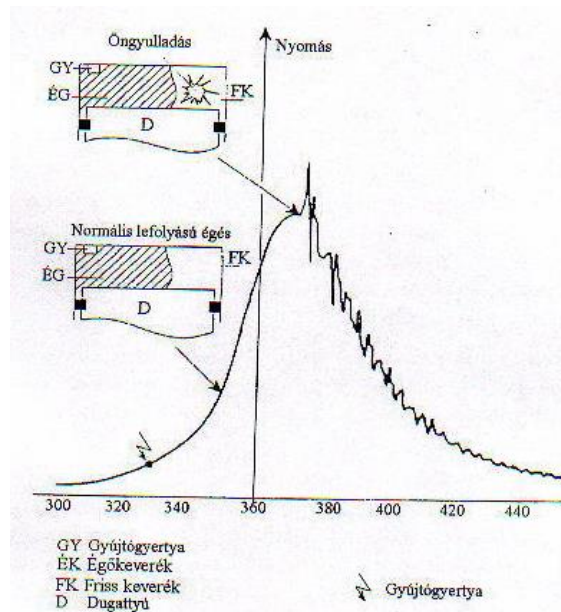
A motorhajtóanyagok tulajdonságai

Motorbenzin

▪ Kompressziótűrés

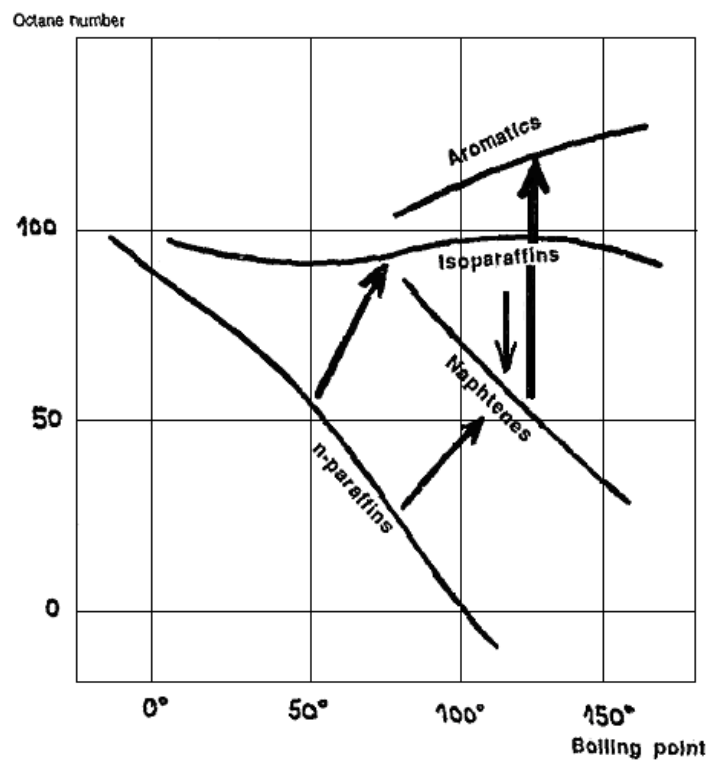
A kompressziótűrés a motorbenzin azon tulajdonsága, hogy milyen mértékű összenyomást képes elviselni öngyulladás nélkül. Ha nem megfelelő, a már égő gázelegyben a továbbnövekvő nyomás és hőmérséklet eredményeként öngyulladás is lejátszódik. Az így kialakuló-kialvó lángfrontok a motorban

nyomáslengést okoznak (ld. 1.2.9. ábra), amelyet a felléptekor bekövetkező nagyfrekvenciás rezgés és hang miatt kopogásnak neveznek. A kopogás következménye teljesítményromlás, a motor mechanikai károsodása.



1.2.9. ábra. Kopogás az Otto-motorban

A motorbenzint alkotó szénhidrogének kompressziótűrése eltérő. Az 1.2.10. ábra a kompressziótűrés alakulását mutatja az egyes szénhidrogén típusoknál a forráspont, azaz a molekulatömeg függvényében.



1.2.10. ábra Különböző szénhidrogének kompressziótűrése

Tanulmányozzuk át alaposan és jegyezzük meg az ábrát! Az (elágazást nem tartalmazó) normál paraffinok kompressziótűrése a molekulamérettel egyre csökken, a hosszabb láncok öngyulladóképessége egyre nő. Az (elágazó láncú) izo-paraffinok kompressziótűrése molekula-mérettől függetlenül jó. A (telített gyűrűs) cikloparaffinok (naftének) kompressziótűrése közbülső értékeket foglal el, míg az aromás gyűrűs vegyületeké kiváló.

Mivel a motorbenzinben nagyon sokféle szénhidrogén található, a kémiai összetétel alapján nem lenne megállapítható, hogy az adott motorbenzin megfelel-e a motor által támasztott követelményeknek. Emiatt egy nemzetközileg is egységes skálát, (az oktánszámskálát) vezettek be. Mivel a kopogás kialakulása nemcsak a motorbenzin kémiai összetételétől, hanem a motor kialakításától (pl. a kompresszióviszonytól, az égéstér alakjától) és az üzemeleti körülményektől (pl. a fordulatszámától, az előgyújtás szögétől, az égéstér lerakódásaitól) is függ, a kompressziótűrés mérésére szabványosított motorok szolgálnak, amelyekben rögzített körülmények mellett etalon elegyekkel hasonlítják össze a vizsgálandó motorbenzin kompressziótűrését. Etalonnak két (átlagos és kb. azonos, 100 °C-os forráspontú) szénhidrogént választottak. Az egyik szénhidrogén a n-heptán, amelynek a kompressziótűrése nagyon rossz, öt tekintik 0 pontnak, míg a másik szénhidrogén a 2,2,4-trimetil-pentán (azaz az izo-oktánok egyike), amelynek kompressziótűrése jó, öt tekintik 100-as pontnak. (Keressük meg az etalonokat az 1.2.10. ábrán!)

A vizsgálatot úgy folytatják le, hogy a szabványos motort egyre növekvő kompresszióviszony mellett járatják a vizsgálandó motorbenzinnel, míg egy jól érzékelhető nyomáslengés lép fel, majd megkeresik, hogy ugyanennél a kompresszióviszonynál milyen összetételű n-heptán—i-oktán elegy okoz azonos mértékű nyomáslengést. A motorbenzin kompressziótűrésének mértékéül pedig az etalonelegy összetételét adják meg. A fenti logika alapján az oktánszám annak a n-heptánból és 2,2,4-trimetil pentánból álló etalon elegynek a tf %-os izooktán tartalma, amely szabványos motorban, rögzített körülmények között azonos kompressziótűrésűnek mutatkozik, mint a vizsgálandó benzin.

A gépjárművek motorjaiban különféle körülmények között kell kopogásmentesen elégnie az üzemanyagnak. (Hideg- és meleg, kisebb és nagyobb nyomású, oxigén-tartalmú levegőt beszívva, kisebb és nagyobb fordulatszámon, kisebb és nagyobb terhelés mellett stb.) Ezért az oktánszámot is különböző körülmények között vizsgálják:

A kísérleti oktánszámot (az angol rövidítése: RON) enyhébb igénybevétel mellett mérik. A fordulatszám 600/perc, a levegőt melegítik elő 52 °C -ra és kisebb az előgyújtás.

A motor oktánszám (MON) mérésénél nagyobb az igénybevétel. 900/perc a fordulatszám, nagyobb és változó az előgyújtás. A döntő eltérés a kísérleti oktánszám-méréstől az, hogy a benzin-levegő keveréket a porlasztás után felmelegítik 150 °C-ra, azaz nagyobb hőmérsékletre indítják a kompressziót, tehát a sűrítési ütem végén is nagyobb lesz a hőmérséklet, ill. a nyomás, ezért az öngyulladás is hamarabb bekövetkezik. Ugyanaz a motorbenzin így a motormódszerrel mérve kisebb oktánszámúnak bizonyul, azaz MON < RON. A két érték különbsége az érzékenység. Nyilván azok a motorbenzinek a jobb minőségűek, amelyek érzékenysége kisebb. (Figyelem, az elnevezés félrevezető! A kísérleti és a motor oktánszámot is a szabványosított motorban határozzák meg.)

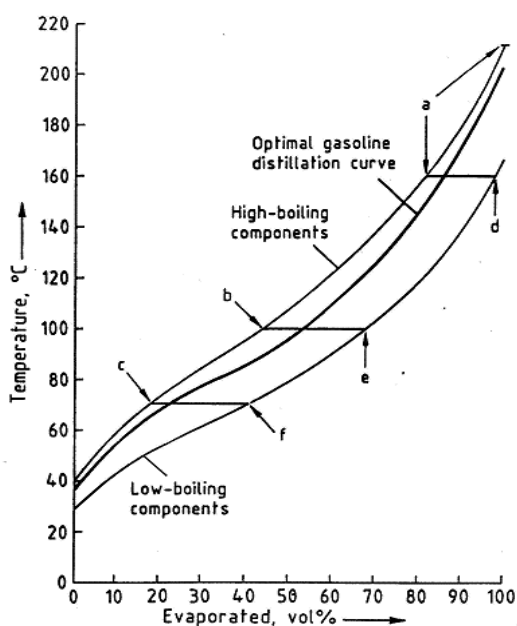
A kutaknál a kísérleti oktánszámot adják meg. A 100 fölötti oktánszám mérése izo-oktán-ólom-tetra-
etil eleggyel (ld. később) történik.

Fontos, hogy a motorbenzin különböző forráspontú részeinek (frakcióinak) az oktánszáma ne nagyon térjen el, azaz az oktánszámeloszlás megfelelő legyen. Emiatt meg szokták határozni a motorbenzin 75, vagy 100 °C alatti forráspontú frakciójának az oktánszámát, az ún. frontoktánszámot is, illetve a teljes frakció oktánszáma és a frontoktánszám különbségét (ΔR) is. A frontoktánszám meghatározása az ún. gyorsítási kopogás elkerülése érdekében szükséges. Gyorsításkor ugyanis a motorbenzin illékonyabb része feldúsul a hengerben, s ha ennek a frakciónak a kompressziótűrése kisebb, bekövetkezik a kopogás.

▪ *Illékonyág*

Fontos tulajdonság, mert a keverékképzést, (az égés gázfázisú, előzetesen el kell párolognia az üzemanyagnak), a lerakódásokat, a kenőolaj-hígulást, a melegstartot befolyásolja. Az illékonyág vizsgálható egyrészt a **forráspontgörbével** (1.2.11. ábra). Ekkor 100 cm³ benzin szabványos készülékben történő desztillációjakor mérik az átdesztillált (és lehűtéssel visszakondenzáltatott) folyadék térfogatának függvényében a lombikból eltávozó gőzök hőmérsékletét. A motorbenzin

forráspontja 40-200°C határok között kell legyen. A görbe egyes szakaszai más-más jellemzőt befolyásolnak.



1.2.11. ábra **Motorbenzin forráspont-görbéje**

- a) lerakódások és motorolaj hígulás, b) lassabb felmelegedés, c) rossz hidegindítás,
d) üzemanyag fogyasztás, e) karburátor jegesedés, f) gyorsabb felmelegedés
szempontjából meghatározó szakasz

Az illékonyság vizsgálható továbbá a 37,8 °C-on mért telített **gőznyomás** (Reid Vapor Pressure, RVP) értékével. Ez a hidegindítás érdekében télen nagyobb lehet.

Gondot okozhat a nagy és a kicsi illékonyság is. Túl magas kezdőforráspont esetén a hidegindítás nehéz, túl alacsony kezdőforráspontnál gőzbuborékok alakulhatnak ki a szívóvezetékben a melegstartnál, illetve nyáron, valamint nagyobbak a párolgási veszteségek, a környezet szénhidrogén szennyezése. Túl magas végforráspontnál megnő a lerakódások mennyisége, illetve a nagy forráspontú komponensek nem égnek el, kicsapódnak a hengerfalra, a kenőolaj viszkozitását csökkentve a kenés hatékonyságát rontják.

A motorbenzinek nemzetközi besorolása illékonysági osztályokat állapít meg, amelyek közül az adott ország klimatikus viszonyai alapján adják meg a szabványok a kívánt osztályt.

▪ **Összetevők**

-ólm tartalom: Gyökfogyó hatása miatt régen ólom-tetra-etilt, ill. ólom-tetra-metilt ($\text{Pb}(\text{C}_2\text{H}_5)_4$) ill. $\text{Pb}(\text{CH}_3)_4$ adagoltak a benzinhez a jobb kompressziótűrés érdekében. Az Pb környezetszennyező, a kipufogógázzal a környezetbe került ólom a tápláléklánccal az emberi szervezetbe kerül. Az ólom a kipufogógáz tisztító katalizátorokat (ld. később) hatástalanítja, emiatt a fejlett országokban nem hoznak ma már forgalomba ólmozott benzint (Magyarországon sem).

-kén tartalom: A kéntartalomról az égés során SO_2 . (esetleg SO_3), a jelenlevő vízzel kénessav, (kénsav) keletkezik, ami korróziót, savas esőt okoz. A kéntartalom limitálandó, ma jogszabályban előírva legfeljebb 0,005 % (azaz 50 ppm) lehet, de a MOL által forgalmazott motorbenzinek kéntartalma 10 ppm. A kőolaj feldolgozása során keletkező frakciók kéntartalma katalitikus hidrogénezéssel, H_2S alakban eltávolítható, belőle parciális (részleges) égetéssel elemi kén nyerhető, ami a kőolaj-feldolgozás hasznos mellékterméke.

-szénhidrogének csoportösszetétele: a felhasználási tulajdonságok szempontjából nem közömbös, hogy a motorbenzint milyen szénhidrogének alkotják. Az olefinek (különösen a diolefinek) reakcióképesek, stabilitási problémát okozhatnak. Állás közben belőlük (gyökös mechanizmusú) oxidációs-polimerizációs reakciókban nagy molekulájú, gumyszerű és savas kémhatású termékek alakulhatnak ki, lerakódást, dugulást, korróziót okozhatnak. Emiatt az olefintartalom Magyarországon

legfeljebb 18 V/V% lehet. Az aromások — bár kiváló kompressziótűrésűek — égési tulajdonságai kedvezőtlenek, kormozási hajlamuk nagy, mennyiségük hazánkban legfeljebb 35 V/V% lehet.

-**benzoltartalom**: A benzol az aromásokon belül is külön limitálandó, mert mérgező, rákkeltő, mennyiségét a fejlett országokban korlátozzák (Magyarországon max. 1 V/V%).

-**oxigéntartalom**: Az oxigéntartalmú vegyületek, az ún. oxigenátok (alkoholok, éterek, pl. metanol, tercier-butanol, MTBE: metil-tercier-butil-éter, ETBE: etil-tercier-butil-éter) javítják az oktánszámot, adagolásuk egy határon belül előnyös (max. 2,7 %). Minél rövidebb szénláncú a benzinnel kevert alkohol, annál inkább érzékenyebbé válik a motorbenzin vízfelvételeire, illetve az alkoholok égésekor ártalmas aldehidek keletkeznek. Emellett az oxigéntartalom a fűtőértéket is csökkenti.

▪ Gyantatartalom

A lerakódást, dugulást okozó aktuális vagy jelenlevő gyantatartalmat az ún. **elpárolgatási maradék** mérésével határozzák meg. A 100 cm³ benzinminta elpárolgatásakor visszamaradó gyanta legfeljebb 5 mg lehet. Ahogyan már említettük, a gyantaképzési hajlamot a hőbontással (krakkolással, ld. később) előállított benzinekben a krakkoláskor keletkező telítetlen kötések, főként diolefinok okozzák. Erre lehet következtetni az **indukciós periódus** mérésével: emelt hőmérsékleten azt vizsgálják, mennyi ideig nem lép reakcióba a vizsgálandó motorbenzin nagy nyomású oxigénnel (mennyi idő múlva kezd csökkenni egy előírt értéknél jobban az O₂ nyomása). A **potenciális gyantatartalom** mérésekor a motorbenzint 16 óráig tartják az indukciós periódus-vizsgálat körülményei között, majd ezután meghatározzák az elpárolgatási maradékot.

▪ Korróziós hatás

Az aktív S vegyületek miatt a motor egyes szerkezeti elemei károsodhatnak. Mérésekor emelt hőmérsékleten, bizonyos ideig, polírozott Cu lemezt mártanak a motorbenzinbe (**rézlemezpróba**). A Cu lemez elszíneződését szemrevételezéssel, etalon skálával hasonlítják össze.

A motorbenzinek jelenlegi minőségi követelményeit az 1.2.10. táblázatban foglaltuk össze.

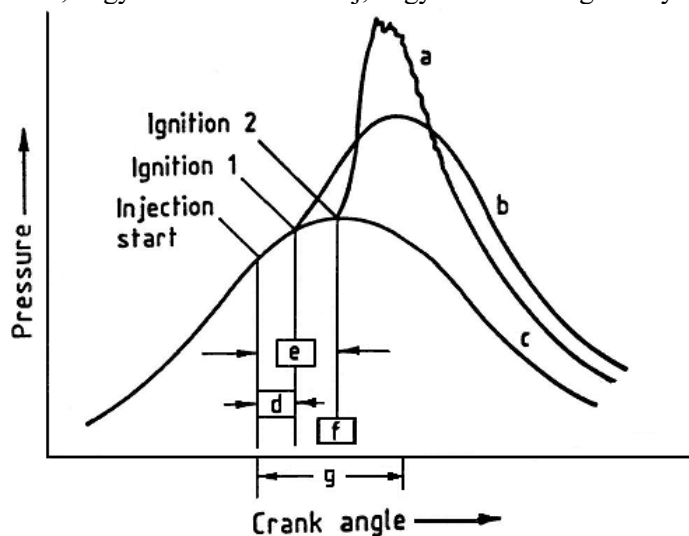
Minőségi fokozat	Esz-95	Esz-98
Jellemzők		
Kísérleti oktánszám	min. 95,0	min. 98,0
Motor oktánszám	min. 85,0	min. 88,0
Szín	színezetlen	színezetlen
Sűrűség 15 °C-on	720 — 775 kg/m ³	
Desztilláció		
Átdesztillált mennyiség		
70 °C-ig nyáron / télen	20 – 48 / 22 – 50 % (V/V)	
100 °C -ig	46 – 71 % (V/V)	
150 °C -ig	min. 75 % (V/V)	
Végforrpon	max. 210 °C	
Gőznyomás nyáron / télen	45 – 60 kPa / 60 – 90 kPa	
Szénhidrogén csoportok		
olefinek	max. 18 % (V/V)	
aromások	max. 35 % (V/V)	
Benzoltartalom	max. 1,0 % (V/V)	
Ólomtartalom	max. 5 mg/l	
Kéntartalom	max. 50 mg/kg	
Oxigéntartalom	max. 2,7 % (m/m)	
Gyantatartalom	max. 5 mg/100 ml	
Indukciós periódus	min. 360 perc	
Korróziós hatás rézlemezen	legfeljebb 1. osztály	

1.2.10. táblázat. Motorbenzinek minőségi követelményei

Gázolaj (dízel olaj)

Gyulladásí hajlam

A dízel-motor levegőt szív be, és azt komprimálja a második ütemben. Az ütem vége előtt ebbe a nagy nyomású és hőmérsékletű levegőbe fecskendezik az üzemanyagot, ami lehetőleg kis késedelemmel magától meg kell gyulladjon. A dízel-motorban is felléphet a nyomáslengés, kopogás jelensége, ha a gázolaj öngyulladó képessége kicsi. Ilyenkor a nagy gyújtási késedelem miatt sok üzemanyag halmozódik fel a befecskendezéskor, ami hirtelen kezd égni (ld. az 1.2.12. ábrát). Ennek eredményeként rosszabb lesz a hidegindítás, nagyobb lesz a motorzaj, nagyobb lesz a légszennyezés, („fehér füst”).



1.2.12. ábra Égés a Diesel-motorban

- a) kopogásos égés, b) normál égés, c) nyomás öngyulladás nélkül
 d) megfelelő gyulladási késedelem, e) túl nagy gyulladási késedelem,
 f) felső holtpont, g) befecskendezés

A gyulladási hajlamot (az oktánszám mérés logikájának megfelelően, és azzal analóg módon) a **cetánszám** meghatározásával jellemzik.

Etalonok: n-cetán (16 szénatomos, elágazás nélküli, telített lánc, $C_{16}H_{34}$) (100-as pont)
 α -metil-naftalin (kondenzált aromás vegyület) (0 pont)

(Újabbban a meghatározáshoz a 2,2,4,4,6,8,8-heptametil-nonánt (azaz az izocetánok egyikét, cetánszáma 15) használják a α -metil-naftalin helyett.)

A gyulladási hajlam és a kompressziótűrés éppen ellentétes tulajdonságok. Vizsgáljuk meg a cetánszám skála etalonjainak elhelyezkedését az 1.2.10. ábrán! Adjuk meg az oktánszám analógiájára a cetánszám definícióját!

A cetánszámot ritkábban mérik vizsgálómotorban, mint az oktánszámot, mert az ún. **cetán-index** könnyebben meghatározható. Ehhez sok üzemanyag kiértékelésével megszerkesztett tapasztalati képletet használnak, amely az üzemanyag sűrűségéből és a forrponthőgörbe adataiból számítja a cetánszámot közelítő cetán-indexet (CI):

$$CI = 454,74 - 1641,416 \rho + 774,74 \rho^2 - 0,554 T_{50} + 97,803(\log T_{50})^2 \quad \text{ahol}$$

ρ : a sűrűség 15 °C-on

T_{50} : a forrponthőgörbe 50 %-os pontjához tartozó hőmérséklet

A cetánindex ma Magyarországon 48-50 körüli érték.

Szivattyúzhatóság

Az üzemanyag szállíthatósága is fontos. A szivattyúzhatóság a **viszkozitás** (a folyadékok belső súrlódása, a fogalom meghatározását ld. a kenőanyagoknál) és az ún. **hidegtulajdonságok**, a hűlés hatására bekövetkező szilárdulás függvénye. A viszkozitás 40 °C-on 2-4,5 mm²/s között kell legyen. Kisebb értéknél a szivattyút, adagolót az üzemanyag nem keni megfelelően, (vékony a folyadékfilm az egymáson elmozduló fémeken), nagyobb értéknél nagy energiát igényel a gázolaj mozgatása. Az üzemanyag szilárdulása azért fontos, mert a gázolajat alkotó nagyobb molekulájú szénhidrogének télen kikristályosodva eltömíthetik az üzemanyagszűrőt, s ezzel a motor működése leáll.

Az üzemanyag hűtésekor a szilárdulás jellemző pontjai:

zavarosodási pont: ahol az első szilárd alkotó megjelenik

dermedéspont: ahol a nehézségi erő hatására már nem folyik

folyáspont: dermedéspont +3 °C

Tapasztalat szerint az üzemanyagszűrő eltömődése a zavarosodási és a dermedéspont között következik be, ezért ennek modellezésére az ún. **hidegszűrhetőségi határhőmérséklet** (CFPP: Cold Filter Plugging Point) vizsgálatát szabványosították: a mintát egyre hűtve azt vizsgálják, hogy 20 ml üzemanyag 45 µm finomságú szűrőn, adott nyomáskülönbséggel milyen hőmérsékleten szívható fel még 60 másodpercen belül. A CFPP értéke Magyarországon télen legfeljebb - 20°C, nyáron legfeljebb + 5 °C lehet.

Porlaszthatóság

Egyrészt az **illékonyosság** függvénye. A forráspont tartomány 150-360 °C között lehet. Másrészt a **kokszképzési hajlam** szabja meg, amely lehetőleg kicsi legyen, ne képződjön koksz-szerű lerakódás a porlasztásnál. Meghatározása a Conradson szám mérésével történik: a lepárlási próba utolsó 10%-ából meghatározzák a léghianyos hevítéssel keletkező koksz tömegét.

Összetétel

kéntartalom (a gázolaj minőségi besorolásának alapja). A kéntartalom az elmúlt időszakban folyamatosan csökkent, jelenleg max.0,005 % lehet.

vízartalom (legfeljebb 200 mg/kg)

hamutartalom (szilárd égéstermék korlátozása, max. 0,01 %)

többgyűrűs aromás szénhidrogének mennyisége (max. 11 %)

Korróziós hatás

ld. **rézlemezpróba**

Kenőképesség

A gázolaj megfelelő kenőképessége a befecskendező szivattyú védelme érdekében fontos. Erre a HFRR (High Frequency Reciprocating Rig) vizsgálattal következtetnek. Egy acélgolyót síkfelületen megszabott ideig, megszabott hőmérsékleten, terheléssel, frekvenciával, lökethosszal mozgatnak, a kenési helyre megszabott olajtérfogatot juttatva. A vizsgálat után a golyó legnagyobb átmérőjén bekövetkező kopás mértékét állapítják meg.

Oxidációs stabilitás

Állás során nem alakulhat ki benne káros reakciótermék. Mérése: megszabott hőmérsékleten és ideig oxigént buborékolatnak át a mintán, mérik az olajban oldhatatlan öregítési termékek mennyiségét.

Lobbanáspont

A tűzveszélyességi besorolásnak is ez az alapja, legalább 55 °C kell legyen.

Sűrűség és energiatartalom

Nagyobb gázolaj-sűrűség nagyobb volumetrikus energiatartalmat eredményez, de nagyobb légszennyezést is okoz.

Habképzési hajlam

Lehetőleg kicsi legyen, mert a tankolás nehezzé válhat.

A dízel-olajok követelményeit ld. az 1.2.11. táblázatban.

Jellemző	Mértékegység	Követelmény	
		legalább	legfeljebb
Cetánszám		51,0	
Cetánindex		46,0	
Sűrűség 15 °C-on	kg/m ³	820	845
Átdestillált mennyiség 250 °C-ig	% (V/V)		65
350 °C-ig	% (V/V)	85	
95 %	°C-ig		360
Lobbanáspont	°C	55	
Kinematikai viszkozitás 40 °C-on	mm ² /s	2,00	4,50
Hidegszűrhetőségi határhőm. (CFPP) nyáron / télen	°C		+5 / -20
Többgyűrűs aromások	% (m/m)		11
Kéntartalom	mg/kg		50
Oxidációs stabilitás	g/m ³		25
Conradson szám	% (m/m)		0,30
Víztartalom	mg/kg		200
Hamutartalom	% (m/m)		0,01
Kenőképeség, korrigált kopási bemaródás átmérője 60 °C-on	µm		460
Korróziós hatás rézlemezen			1. osztály

1.2.11. táblázat. Dízel olajok minőségi követelményei

Speciális petróleum

Hideg tulajdonságok

A repülőgépeknél a külső hőmérséklet –50 °C is lehet, mérése ld. gázolaj.

zavarosodási pont mínusz 40-47 °C legfeljebb

viszkozitás 20 °C -on min 1,25 mm²/s

-20 °C -on vagy - 40 °C-on max 8 mm²/s

vízmentesség

Illékonyág

A forráspont 150-300 °C között lehet. Hasonlítsuk össze a három motorhajtóanyag forráspont tartományát!

Összetétel

aromás szénhidrogének mennyisége a kormozó láng miatt max.18,5 vagy 25 %. A koromszemcsék erősen koptatják a turbina lapátokat.

olefin tartalom 0-5%

kéntartalom: - teljes: max. 0,3 %
- SH kötésben lévő (agresszív): max.0,003 %

Hőstabilitás, oxidációs stabilitás

ld. gázolaj

A motorhajtóanyagok előállítása

Motorhajtóanyagként ma döntően a kőolajból nyerhető szénhidrogén elegyeket használnak, mert ezzel biztosíthatók ma a leggazdaságosabban azok a tulajdonságok, amelyeket az előző fejezetben megismertünk. Ahogyan már említettük a kőolaj nagyon bonyolult összetétele miatt közvetlenül nem használható fel, az alkotóit homogénebb összetételű részekre, ún. frakciókra kell bontani. Ennek legegyszerűbb és leggazdaságosabb módja a már megismert **atmoszférikus és vákuum desztilláció**.

Az atmoszférikus, ill. vákuumdesztilláció termékei közvetlen felhasználásra csak nagyon ritkán alkalmasak. A kőolaj feldolgozó üzemekben ezért a motorhajtó anyagok előállítása érdekében is ún. konverziós (átalakító) és hozam (feldolgozottság) növelő eljárásokat alkalmaznak.

A motorhajtó anyagok gyártási eljárásainak ismertetése előtt az 1.2.12. táblázat alapján tekintjük át az egyes szénhidrogén típusok főbb tulajdonságait, hogy szerepüket a motorhajtóanyagban megítélhessük.

	gyull. hajlam	Kompr. tűrés		derm. pont	egys. térf. fűtőértéke	sűrűség	füstölés
		RON	érzékeny-ség				
n-paraffinok	nagyon jó	nagyon rossz	nagyon kicsi	rossz	kicsi	kicsi	enyhe
izo-paraffinok	rossz	jó	nagyon kicsi	jó	kicsi	kicsi	enyhe
olefinek	rossz	magas	nagyon nagy	jó	kicsi	kicsi	enyhe - közepes
naftének	közepes	közepes	kicsi	jó	közepes	közepes	közepes
aromások	nagyon rossz	nagyon jó	nagy	közepes	nagy	nagy	erős

1.2.12. táblázat **Az egyes szénhidrogén típusok tulajdonságai**

Tanulmányozzuk át alaposan a táblázatot! A motorhajtóanyagok előállításakor az egymásnak ellentmondó igények, ill. az előállítás költségigénye miatt **optimalizálni kell**, azaz a szénhidrogének fenti tulajdonságait figyelembe véve több komponens és adalékok keverésével olyan elegyeket állítanak elő, amelyek kielégítik a motor által támasztott követelményeket.

A motorbenzinek előállítása

Az atmoszférikus desztilláció terméke, az ún. straight run (egyenes lefutású) benzin közvetlenül Otto motorok hajtására nem alkalmas, elsősorban azért, mert a kísérleti oktánszáma alacsony, legfeljebb 60 körüli érték, a mai motorok pedig 90 fölötti oktánszámú motorbenzint igényelnek. A motorbenzineket a kőolaj finomító különböző termékeinek keverésével állítják elő. A keverés közben több tulajdonság folyamatos mérésével és a végső összetételt optimalizálják.

Keverőkomponensek

- *straight run benzin*
Az említett okok miatt mennyisége legfeljebb 10 % lehet.
- *i-bután*
A göznyomás növelhető vele, jó RON, de növekvő párolgás, tűzveszély, légszennyezés.
- *reformátum*
A reformálás során 70-190 °C-os forráspontú, előzetesen kéntelenített benzinpárlatokat katalizátor (Al₂O₃/SiO₂ hordozón Pt/Re nemesfém) jelenlétében kb. 500 °C-on, 5-10 bar H₂ nyomáson kezelnek.
A lejátsszódo főbb reakciók:
 - naftének dehidrogéneződése aromás vegyületekké
 - n-paraffinok izomerizálódása
 - paraffinokból aromás vegyületek képződése (dehidrociklizáció)
 - paraffinok tördelődése és hidrogéneződése (hidrokrakkolódása)A lejátsszódo folyamatokat jelölik az 1.2.10. ábrán a nyilak. A folyamatok eredményeként 70-90 %-nyi reformátum (60-70 % aromás tartalom, sok izo-paraffin), egy-négy szénatomos (C₁-C₄) gázok és H₂ keletkezik. Bár a reakciók során H₂ termelődik, a technológiában (a Le Chatelier - Braun-féle legkisebb kényszer elvének ellentmondva) mégis hidrogén-nyomást alkalmaznak. Ennek az az oka, hogy krakkolódás is lejátsszódik, mint mellékreakció, aminek az eredményeként kokszt rakódik a katalizátorra, aktivitását csökkentve. A hidrogén a krakkreakciókban képződő telítetlen vegyületek telítését végzi, így szorítva vissza a kokszt képződést. Korábban nagyobb hidrogén-nyomást alkalmaztak, mégis a termelést sűrűn le kellett állítani, hogy a katalizátort regenerálják, leégetve a kokszt. A legfejlettebb, Százhalombattán is megvalósuló technológiában folyamatos a termelés, egy reaktorban a reformálás, míg egy másikban a katalizátor-regenerálás történik. A katalizátor a reaktorokban fölülről lefelé halad, a reaktor aljáról a másik tetejére emelik át. Az átmenet közben a hidrogénes és oxigénes terek precíz elválasztása, zsilipelése szükséges!
A katalizátor bifunkciós, a hordozó az izomerizációt, a nemesfém a dehidrogénezést segíti elő.
A reformáló üzemben termelődő hidrogén is értékes termék, azt az egyes termékek katalitikus kénmentesítésére, a telítetlen kötések telítésére használják fel. A reformálás a jó oktánszámú motorbenzinek gyártásának kulcsfontosságú folyamata, az említett százhalombattai technológiában kb. 100-as oktánszámú keverőkomponens keletkezik. A reformálás célja lehet aromás vegyületek előállítás is, ugyanis a reformátumból az aromás vegyületek elválaszthatók.
- *krakkbenzin*
A (hőbontás) krakkolás célja nagyobb szénatomszámú (forráspontú) szénhidrogének bontása kisebb szénatomszámú, értékesebb szénhidrogénekké, főként motorhajtóanyag gyártás érdekében.
A legegyszerűbb megoldás a pakura termikus krakkolása 450-600 °C-on, 1-70 bar nyomáson. Ma már ezt a technológiát motorhajtó anyagok gyártására nem használják, de benzinből olefinek (etilén, propilén) gyártására igen.
A krakkolás vákuumpárlatokból (Al-szilikát) katalizátor segítségével is végrehajtható kb. 500 °C hőmérsékleten. Fő terméként 55-60 %-nyi, kb. 92-es oktánszámú krakkbenzin keletkezik. Igen értékes a nagy olefin tartalmú 3-4 szénatomos gáz frakció is, amelyet az alkilezéshez (ld. később) használnak fel. Az ugyancsak keletkező krakkgázolajat általában visszavezetik a folyamatba, míg a maradványolajat fűtőolajként értékesítik, vagy belőle kokszt gyártanak. Százhalombattán 1984 óta működik ilyen üzem, amelyben a katalizátort fluid állapotban tartják, lebegtetik (FCC üzem).
A reakciók lejátsszathatók (70-210 bar) hidrogén-nyomás mellett is (hidrokrakk eljárás), 300-400 °C hőmérsékleten. Ekkor az aromás vegyületek, a naftének hidrogéneződnek, a H/C arány nő, nagyobb a fehéráru hozam, de a benzin oktánszáma kevésbé jó, reformálni kell.

Valamennyi krakkolásnál keletkezik értékes gáz, benzin, gázolaj, maradvány frakció, de mennyiségük, összetételük a körülmények miatt változó. A krakkbenzinek nagy olefintartalmúak lehetnek, különösen a többszörös telítetlen kötések miatt szükség lehet telítő hidrogénezésükre (ld. indukciós periódus).

- *izomerizátum*

A straight run benzinből nyerhető elágazás nélküli, normális láncú C₄-C₆ szénhidrogének 300-500 °C hőmérsékleten, Pt/Pd katalizátoron, H₂ nyomás mellett izoparaffinokká alakíthatók, értékes keverőkomponens nyerve.

- *alkilátum*

Az alkilezés erősen savas (hidrogén-fluorid) közegben hajtható végre. Izo-bután és C₃ - C₅ olefinek reakciójában C₇ - C₉ izoparaffinok keletkeznek. A legjobb keverőkomponens (ld. az 1.2.12. táblázatot), mivel izo-paraffinokból áll, de a legdrágább is.

- *polimer benzin*

A műanyagok gyártásának egyik alapvető technológiája a benzin-pirolízis, azaz -hőbontás. Ekkor nagy hőmérsékleten, rövid ideig kezelik a benzint, amelynek eredményeként olefinekben (etilénben, propilénben) gazdag gáz halmazállapotú terméket és a motorbenzin forrástartományába tartozó, nagyobb szénatomszámú telítetlen szénhidrogéneket tartalmazó folyékony halmazállapotú terméket, ún. pirolízis benzint nyernek. Ez utóbbiból a telítetlen szénhidrogének egymásra építésével (nem is polimerizálással, valójában csak oligomerizálással, ld. műanyagok) nyerhető benzin is bekeverhető a motorbenzinbe.

- *oxigenátok*

Az említett oxigén-tartalmú vegyületek (alkoholok, éterek) értékes oktánszámjavító keverőkomponensek, előállításuk gyakran a finomítóban történik.

A dízel olaj előállítása

A cetánszám szempontjából az atmoszférikus desztillátum általában megfelelő, de kénteleníteni kell, valamint a dermedéspont is csökkentendő, különösen a téli gázolaj esetében. A kéntelenítés az említett katalitikus hidrogénezéssel oldható meg, a dermedéspont bizonyos mértékig csökkenthető adalékokkal. Az adalék sok apró kristály kialakulását segíti elő a szűrőt könnyebben eltömő, nagy kristályok helyett. A dermedéspont csökkenés hatékonyabb módszere a szelektív hidrokrakkolás, azaz a molekulák kismértékű tördelése. A legjobb minőségű (city) gázolajok aromás tartalmát is csökkentik, telítő hidrogénezéssel. A krakkgázolaj (főként hidrokrakk) is alkalmas keverőkomponens lehet.

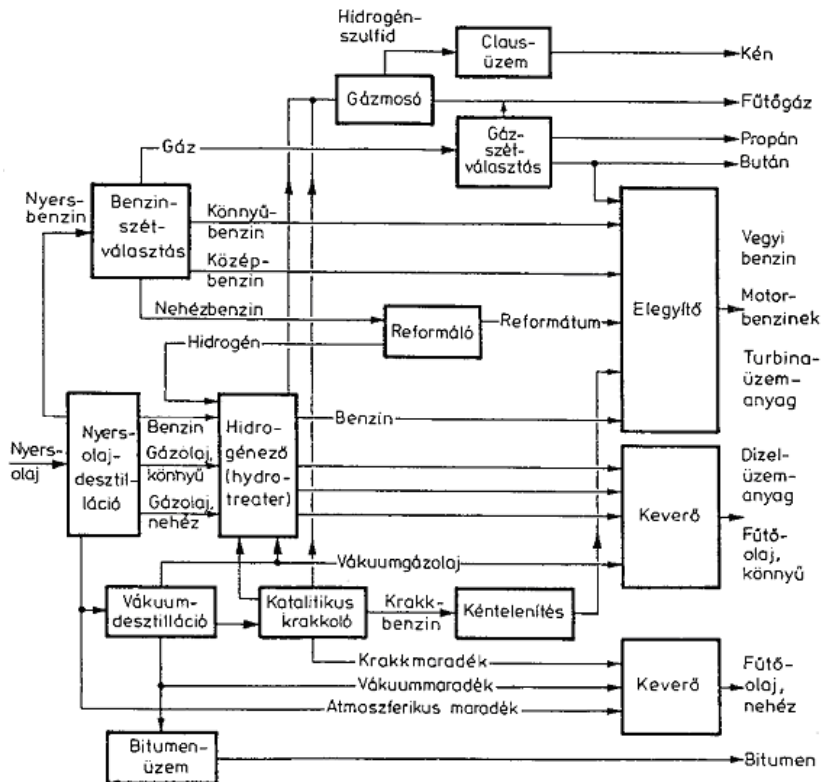
A speciális petróleum előállítása

A speciális petróleumot az atmoszférikus desztillátum kéntelenítésével, újra desztillálásával, adalékolással állítják elő.

Motorhajtóanyag adalékok

Az egyes tulajdonságok javítására, 1 % alatti mennyiségben adalékokat kevernek a motorhajtóanyagokba. Ilyenek pl. a kopogásgátló adalékok, antioxidánsok (az oxidációs reakciókban keletkező lerakódások ellen), a korróziós inhibitorok, a cetánszám javító, dermedéspont csökkentő, habzásgátló adalékok. Általában szintetikus vegyületek.

Motorhajtóanyagokat gyártó finomító egyszerűsített folyamatábráját mutatja be az 1.2.13. ábra.



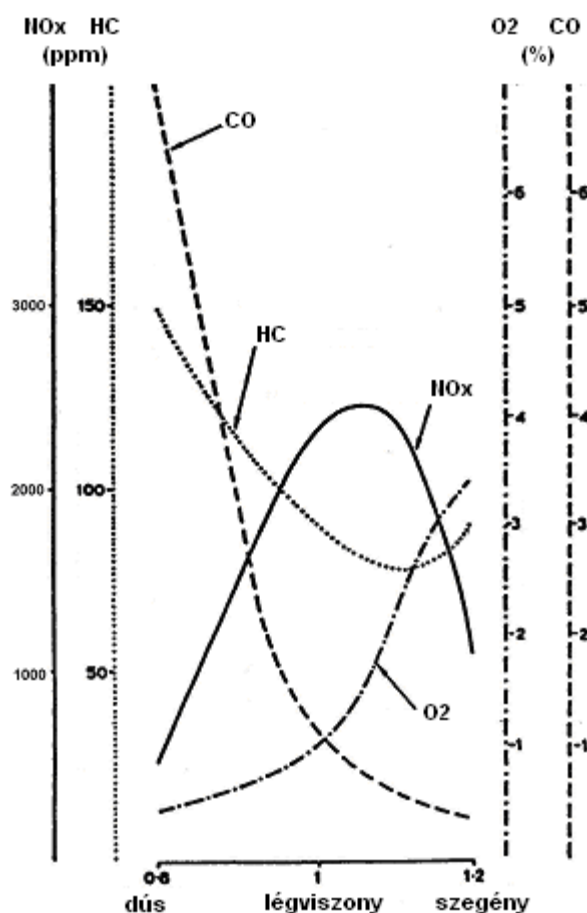
1.2.13. ábra. Motorhajtóanyag-finomító folyamatábrája

A motorhajtóanyagok felhasználása, elégetésük környezeti hatása

Otto motor

A kipufogógáz a motorban, (egy tartály típusú reaktorban) végbemenő kémiai reakció, égés terméke, összetételét a reakció lejátszódását befolyásoló tényezők: a nyomás, a hőmérséklet, a koncentráció és a tartózkodási idő határozzák meg. Mindezekre hatással vannak a motor konstrukciója és az üzemi paraméterek, (pl. a kompresszió viszony, a fordulatszám, az előgyújtás szöge), a motorbenzin kémiai összetétele, a beszívott levegő jellemzői. A kipufogógázokkal közvetlenül és közvetetten is kerülnek ártalmas anyagok a levegőbe. Az égés a nagy fordulatszám miatti kis reakcióidő és a nem tökéletes keveredés miatt mindig tökéletlen, emiatt a kipufogógáz néhány tized % - néhány % közötti mennyiségben szén-monoxidot (**CO**-t) és néhány száz ppm-nyi (néhány század %-nyi) mennyiségben sokféle elégetlen, részben elégett, vagy az égés során keletkezett új szénhidrogént (az angol kifejezés rövidítésével **HC**-t) tartalmaz. Emellett a nagy motortér hőmérséklet miatt a levegő nitrogénje oxidálódik, döntően **NO**-t (néhány tized %), kisebb mennyiségben **NO₂**-t (együttesen **NO_x**-t) eredményezve. Másodlagos reakciók eredményeként **fotokémiai szmog** keletkezik, a szénhidrogének és az **NO_x** ultraibolya sugárzás hatására peroxid kötésű szerves vegyületeket, és ózont képeznek. A motorbenzin S tartalma kén-dioxidá (**SO₂**) ég el. A káros komponensek emberre és környezetre gyakorolt hatását ismertettük.

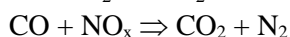
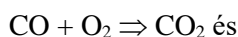
A kipufogógáz komponensek mennyisége döntően a motorba belépő gázelegy összetételétől, azaz a légviszonytól függ. Az 1.2.14. ábra a kipufogógáz átlagos összetételét mutatja be a λ függvényében. (Az ábrán az **SO₂** tartalom nem szerepel, azt a benzin kéntartalma szabja meg, csökkentése a benzin kéntelenítésével oldható meg.)



1.2.14. ábra Az Otto motor kipufogógázának összetétele a légviszony függvényében

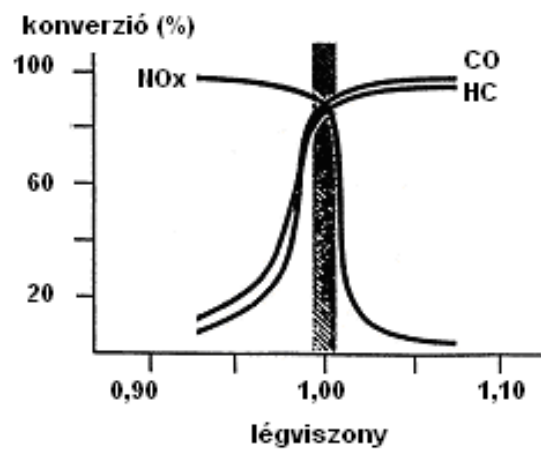
Látható, hogy bár elméletileg léghiányban nem maradhatna oxigén, illetve légfeleslegben nem keletkezhetne CO, mindkettő kis mennyiségben jelen van ezekben a tartományokban is. A CO keletkezését nagy motortér hőmérsékleten indokolhatja a szén-dioxid hőbomlása is a $2 \text{CO}_2 \leftrightarrow 2 \text{CO} + \text{O}_2$ megfordítható reakció szerint. Az NO_x koncentrációja (a $\lambda \approx 1$ -nél maximumot elérő motortér hőmérséklet és a megmaradó oxigén-tartalom miatt) 5-10 %-os légfeleslegnél maximum görbét mutat. A szénhidrogének mennyisége λ növekedésével csökken, de nagyobb légfeleslegnél, ha a felesleges levegő nagyon lehűti az égésteret, újra nőhet.

A kipufogógázok káros komponenseinek mennyiségét korábban sokféleképpen próbálták csökkenteni. Magában a motorban, ha a jó hatásfokú energiatermelést fenn akarjuk tartani, egyidejűleg valamennyi káros kibocsátás jelentősen nem csökkenthető, hiszen az egyes szennyezők csökkentése egymással ellentétes irányú változtatásokat igényelne. Pl. a tartózkodási idő a fordulatszám csökkentésével nem növelhető, mert a csökkenő fordulatszám csökkenti a motor teljesítményét és a nyomatékot. A termodinamikailag végbemehető, de a motorban kinetikailag gátolt folyamatok lejátszódását katalizátorral segíthetjük egy (második, csőtípusú) kémiai reaktorban, amelyre rávezetjük a motorból távozó gázt. Az ártalmatlanítás történhet a HC-k és CO oxidációjával CO_2 -dá és vízzé, valamint az NO_x visszaredukálásával N_2 -né. Az oxidációs folyamatot platina (**Pt**) és palládium (**Pd**) tartalmú katalizátorok gyorsítják, míg a redukció leghatékonyabb katalizátora a ródium (**Rh**). A legkorszerűbb, hármashatású katalizátorok mindhárom káros komponens (CO, HC, NO_x) egyidejű ártalmatlanítására alkalmasak. A lejátszódó sokféle reakció közül a meghatározóak:



A katalizátor átalakítási hatásfokát az egyes komponensekre vonatkozó **konverzió** jellemzi, amely definíciószerűen az illető komponens fogyása a katalizátoron, osztva az eredeti koncentrációval. A konverziót alapvetően a légviszony tényező, a hőmérséklet és (mivel a katalizátor szilárd, a lejátszódó reakciók gáz fázisúak, azaz heterogén katalízisról van szó) a katalizátor felülete befolyásolja.

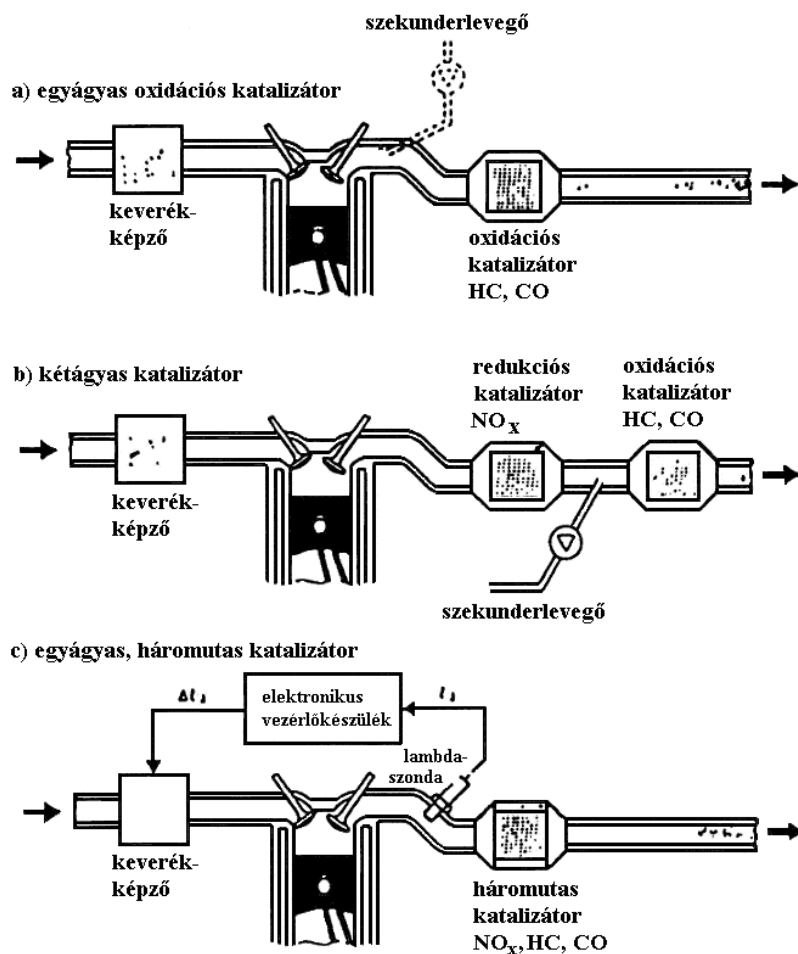
A légviszony tényezőtől függ ugyanis a kipufogógázban jelenlevő oxidálószer (O₂ és NO_x) valamint redukálószer (CO és HC) aránya. Meghatározó a CO és az O₂ mennyisége. Léghiányban sok a CO, míg az O₂ kevés. Emiatt a fenti reakciókban a CO csak kis mértékben fogyhat el, míg az NO_x fogyása jelentős. Légfeleslegben az O₂ és a CO aránya megfordul. A szén-monoxid a fenti első reakció szerint a sokszoros oxigén feleslegben szinte maradéktalanul elég, míg a nitrogén-oxidokkal alig lép reakcióba, emiatt azok mennyisége csak kevéssé csökken. Tehát az oxidációs reakcióknak a levegőfelesleg, a redukciónak a léghiány kedvez. A konverzió-légviszony összefüggést ideális esetben, azaz kellően magas hőmérsékleten és elegendően nagy aktív felületen mutatja be az 1.2.15. ábra.



1.2.15. ábra A konverzió-légviszony összefüggés ideális esetben

Amint az ábrán is látható, a hatékony működés (nagy konverzió mind az oxidációs, mind a redukációs folyamatokban) szempontjából döntő, hogy a légviszonyt optimalizáljuk, $\lambda \sim 1$ környékén minél pontosabban egy szűk sávban, "ablakban" tartjuk. A hagyományos porlasztók erre képtelenek. A korszerű gépkocsikban ezt a feladatot egy ún. lambda-szonda és benzin befecskendező rendszer segítségével oldják meg. A szonda a kipufogógáz oxigén tartalmát méri a katalizátor előtt, és a vezérlő egység ennek alapján — valamint egyéb motorikus paraméterek figyelembevételével — szabályozza a befecskendezést. A fejlett országok környezetvédelmi előírásai csak ilyen **szabályozott hármashatású (a CO-ra, HC-re és NO_x-re ható) katalizátoros** gépkocsikkal elégíthetők ki, így csak ilyenek kerülhetnek forgalomba. (A lambda-szonda nélkül szabályozatlan hármashatású katalizátorról beszélünk.)

A katalizátor fejlesztés lépéseit mutatja az 1.2.16. ábra. Először csak oxidációs katalizátorokat alkalmaztak, majd a második fejlődési stádiumban a léghiányos körülmények között végrehajtott redukció után — pótlólagos oxigén hozzávezetést követően — egy második katalizátor testben oxidáltak (kétágyas, hármashatású katalizátor). Az angol elnevezés (three way) tükörfordításaként találkozhatunk a „háromutas” elnevezéssel is, de helyesebb a „hármashatású” elnevezés használata.

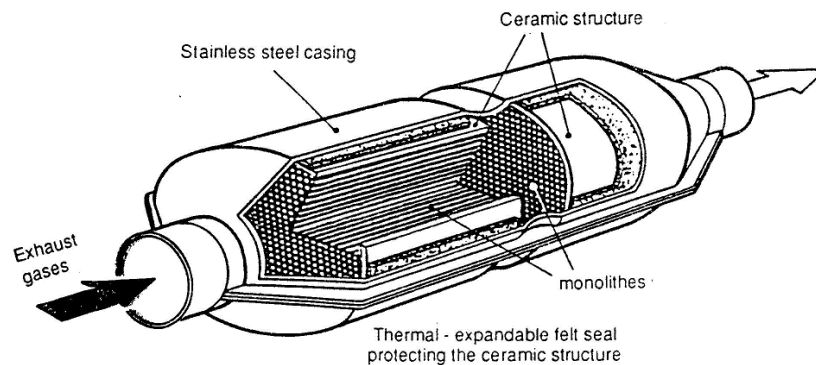


1.2.16. ábra. Katalizátorrendszerek fejlődése

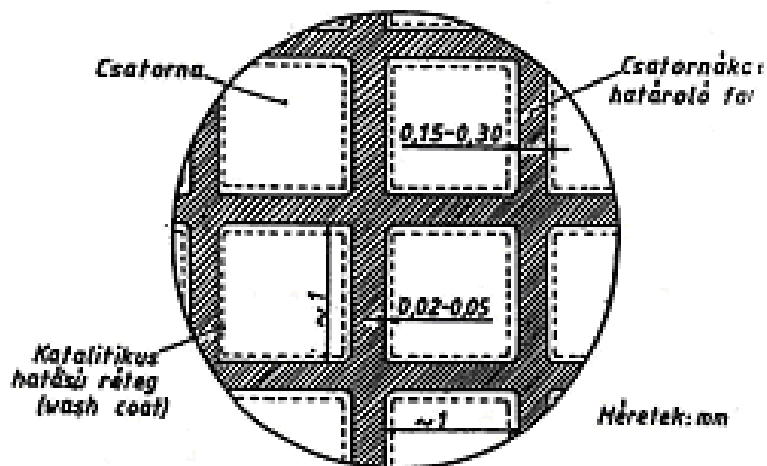
Az oxidációs és redukciós folyamatok 300-800 °C hőmérséklettartományban mennek végbe megfelelően nagy sebességgel. Alacsony hőmérsékleten a katalizált reakció sebessége sem nagy, az átalakítás kis mértékű. (Definíció szerint a katalizátor ún. indulási hőmérsékletén az átalakítás 50 %-os.) A motor indításakor a benzinben dúsabb keverék és a még "hideg" katalizátor miatt a CO és a HC kibocsátás jelentős lehet, ezt a benzinhoz (egyébként az oktánszám növelése érdekében is) adagolt oxigéntartalmú vegyületekkel lehet csökkenteni. A katalízis igényelte nagyobb kipufogógáz hőmérséklet egyúttal nagyobb füstgáz veszteséget is jelent, emiatt a kipufogógáz hőmérsékletet is optimalizálni kell.

A hatékony működés érdekében a katalizátor felülete nagy, 15000-20000 m²-es kell legyen. A szerkezet kialakítása is optimalizálást igényel, mert a nagyon drága nemesfémekből lehetőleg kis mennyiséget, viszonylag kis térfogatban, kis áramlási ellenállást okozva kell nagy felületen elosztatni. A nagy áramlási ellenállás ugyanis a motor hatásfokának (nagyobb mértékű) romlását okozná. Ezen tényezők eredményeként alakult ki az 1.2.17. a és b. ábrán látható szerkezet. A katalizátor vázát fém vagy kerámia alkotja, amelyben a kb. 1 mm széles hosszanti csatornákat 0,1 - 0,3 mm vastag fal választja el. A falra viszik fel néhány század mm-es vastagságban a katalizátorhordozó (leggyakrabban γ -Al₂O₃) réteget, amely az 1-3 tömegszázaléknyi nemesfémeket tartalmazza. A motorbenzinek kompressziótűrésének növelésére a korábban használt ólom-adalékok nem használhatóak, mert az ólom a katalizátor felületén irreverzibilisen megkötődve azt hatástalanítja. Ezért a katalizátoros gépkocsik csak ólmozatlan benzinnel üzemelhetnek. Ez a körülmény a fejlett országokban az (ólom mérgező hatása miatt egyébként is visszaszorulóban volt) ólmozást teljesen megszüntette. Magyarországon sem hozható forgalomba ólmozott motorbenzin. További aktivitás-csökkenést okozhatnak a kenőolaj adalékok, ill.

túl nagy hőmérsékleten is károsodhat a katalizátor finom szerkezete, emiatt óvni kell (pl. a gyújtás kimaradás miatti) túlhevüléstől.



1.2.17. a ábra. A katalizátor szerkezete



1.2.17. b ábra. A katalizátor szerkezete nagyítva

Figyelem! A katalizátor **nem szűri ki** az ártalmas komponenseket, hanem a gáz halmazállapotú szennyezők átalakítását gyorsítja gáz halmazállapotú termékekké, megfelelő körülmények esetén.

Diesel motor

Általában kevésbé környezetszennyezőnek tekintik, mint az Otto-motort, mert a CO, és a HC kb. a katalizátoros Otto motorral megegyező. Nagy problémát okoz azonban, hogy az NO_x kibocsátás nem kisebb jelentősen, viszont a szilárd részecske (rákkeltő korom, szulfát) kibocsátás az Otto-motorénak sokszorososa. Mivel a motorban mindig légszelesleg (maradék O₂) van, a hármasszűrésű katalizátor éppen az NO_x ártalmatlanítására nem alkalmas. Az NO_x katalitikus redukciójához redukálószer (pl. karbamidból felszabadított ammóniát, kis mennyiségű üzemanyagot, azaz szénhidrogént) kell a kipufogócsőbe juttatni. A korom kiszűrhető, de a folyamatos üzem biztosításához a szűrő regenerálása (leégetése) nehéz. Vagy emelt hőmérsékletet kell biztosítani, vagy valamilyen katalitikus hatású anyagot, mely a leégetéshez szükséges hőmérsékletet csökkenti.

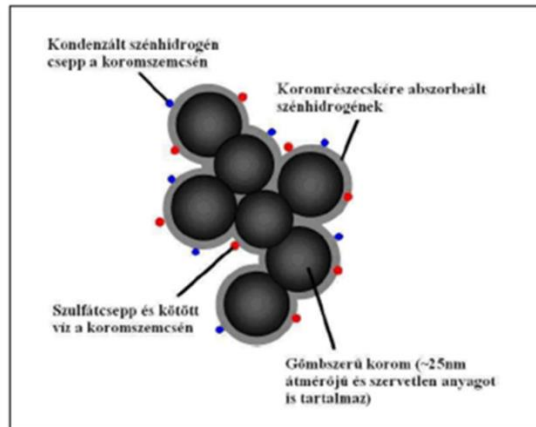
Az előadás főlíái:

A dízel motor légszennyezése

a CO, és a HC kb. a katalizátoros Otto motorral megegyező
az NO_x kb. egyenlő az Otto motoréval

a szilárd részecske („particulate matter - PM” korom, kenőolaj származék, szulfát, fémkopadék) kibocsátás sokkal nagyobb

A szilárd részecskék felépítése



A motorban mindig légfelesleg (maradék O_2) van, a hármass hatású katalizátor az NO_x ártalmatlanítására nem jó.

Megoldás:

- 1) dízel részecskeszűrés „Diesel Particulate Filter - **DPF**” – eljárás
- 2) az NO_x szelektív katalitikus redukciója „Selective Catalytic Reduction – **SCR**” (redukáló szert kell a kipufogócsőbe juttatni).

A részecskeszűrésnél

a lerakódás miatt megnövekszik az áramlási ellenállás,
csökken a teljesítmény
megnö a fogyasztás.

A szűrő regenerálása és tisztítása nehéz.

regenerálás: leégetés

tisztítás: a nem éghető lemosása (ellenáramú levegő, vagy mosó folyadék)

Regenerálási eljárások (kb. 500-1000 km-enként):

passzív: nem igényel külső energiaforrást (elterjedtebb)

aktív: külső beavatkozás hatására korom leégetés.

A leégetés $600^\circ C$ fölötti hőmérsékleten megy végbe.

a részecske széntartalma a kipufogógáz oxigénjével szén-dioxiddá alakul.

Ezt a hőmérsékletet csak a motor névleges teljesítményének közelében lehet elérni, normál üzemeltetési feltételek mellett nem, vagy csak ritkán.

Megoldás:

a kipufogógáz hőmérsékletének emelése, vagy
a koromszemcske gyulladási hőmérsékletét kell lecsökkenteni.

Aktív DPF regenerálási eljárások:

a szűrő elé tüzelőanyag befecskendezésével és elégetésével
elektromos fűtőszállal

Folyamatos passzív regenerálás:

Continuously Regeneratig Technology – **CRT**

két kamra

az elsőben platínával borított oxidációs katalizátor,

NO-ból NO₂

CO-ból CO₂

HC-kből CO₂ és H₂O

a második a DPF

az NO₂ reagál a korom (C) részecskékkal, újra NO és CO₂

Catalysed Diesel Particulate Filter- **CDPF**

katalitikus bevonatú (pl. Pt) részecskeszűrő

a CO és a HC az oxidációs katalizátorokhoz hasonlóan oxidálódik

a bekövetkező hőmérséklet-növekedés leégethetővé teszi a kormot

gyulladásai hőmérséklet-csökkentéshez az üzemanyaghoz kevert adalék

(cérium vagy vasvegyületek)

A DPF hátránya: jelentős NO_x főként NO

SCR: Az NO_x katalitikus redukciója:

a kipufogócsőbe befecskendezett folyadékból hőbomlási folyamattal ammónia (NH₃) szabadul fel,

az NO_x - katalizátorban (egyszerűsítve):



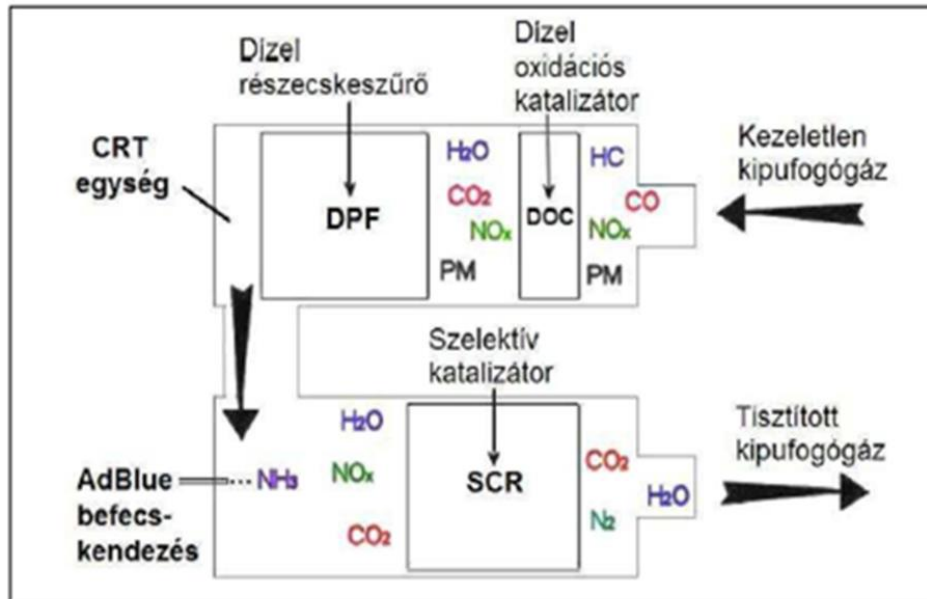
Az **SCRT**-rendszer:

Continuous Regenerating Technology + Selective Catalytic Reduction

Az SCR elé adagolást az SCRT rendszer után elhelyezett NO_x vagy/és NH₃ szenzor jelével vezérlik

előny: DPF regenerálás és NO_x mérséklés egyszerre

Az SCRT-rendszer



1.3. Atomenergia

1.3.1. Az atommag

Az atommag - protonokból (p) és neutronokból (n) – épül fel. Semleges atomban a mag pozitív töltéseinek a száma, azaz a protonszám meghatározza az atommagot körülvevő elektronok számát, tehát a protonok száma, az ún. rendszám (Z) az elem kémiai tulajdonságaira jellemző érték. A protonok Z és a neutronok N száma együttesen az elem tömegszámát (A), az ún. nukleonszámot adja meg.

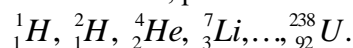
$$A=Z+N$$

A proton (a hidrogén atom magja) az elektronnál 1837-szer nehezebb, vagyis $1,6724 \cdot 10^{-24}$ g tömegű pozitív töltésű, $\frac{1}{2}$ spinű, stabilis részecske. Egy proton nyugalmi tömegének 938,2 MeV energia felel meg. ($1 \text{ MeV} = 1,602 \cdot 10^{-13} \text{ J}$) A neutron elektromosan semleges, a protonnál valamivel nehezebb, $\frac{1}{2}$ spinű részecske, tömege 1839 elektrontömegnek felel meg ($1,6747 \cdot 10^{-24} \text{ g}$). A neutron nyugalmi tömegének megfelelő energia 939,5 MeV. Instabilis, átlagos élettartama 16,9 s; spontán bomlása során proton és elektron keletkezik, tehát lényegében radioaktív bomlási folyamat (β -bomlás) megy végbe. Az átalakulás 0,8 MeV energia felszabadulásával jár.

Azonos protonszámú és eltérő neutronszámú atommagok izotópok (Z állandó, N és A különböző), ugyanannak az elemnek különböző tömegszámú változatai. A természetben az elemek többnyire izotópjaiak keverékeként fordulnak elő. Ez azt jelenti, hogy legtöbbször az atommagokban azonos protonszám mellett a neutronok száma különböző. Így az atomtömeg a különböző tömegszámú izotópok százalékos arányától függ. (Az atomtömeg számítás alapja 1961 óta a 12 tömegszámú szénizotóp atomtömegének $\frac{1}{12}$ része (u.), tehát $1,6604 \cdot 10^{-24} \text{ g} = 1,6604 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$.)

A természetes izotópok vizsgálata azt mutatta, hogy a periódusos rendszer elején az atommagokban a protonok és neutronok száma közel egyenlő, a rendszám növekedésével a neutronok száma egyre inkább meghaladja a protonok számát. A 92 rendszámú urán atommagokban például a 92 proton mellett 143-146 neutron található.

Az izotóp atommagokat úgy jelöljük, hogy az elem kémiai jele mellé balra felül írjuk a tömegszámot. A kémiai jel megadja ugyan a mag rendszámát, ennek ellenére szokás feltüntetni az elem mellett balra alul a rendszámot is, pl:



Különböző mérések szerint a magsugár általában néhányszor 10^{-13} cm , és csak a legnehezebb elemek esetén közelíti meg a 10^{-12} cm -t. Ha ezt az értéket összevetjük a teljes atom sugarával, amely 10^{-8} cm nagyságrendű, láthatjuk, hogy az anyagok csaknem teljes tömege kiterjedésének mintegy 10^{-15} részében koncentrálódik. Az a tény, hogy a magsugár a tömegszám köbgyökével nő, arra mutat, hogy a különböző elemek maganyagának sűrűsége nagyjából állandó.

A réz atommagjának ($A = 63$) tömege például

$$m_{\text{Cu}} = \frac{63}{6,02 \cdot 10^{23}} \approx 10^{-22} \text{ g},$$

ahol $6,02 \cdot 10^{23}$ az *Avogadro*-szám.

A réz atommagjának sugara:

$$R_{\text{Cu}} \approx 1,3 \cdot \sqrt[3]{63 \cdot 10^{-13}} \text{ cm} \approx 5,2 \cdot 10^{-13} \text{ cm},$$

tehát a sűrűsége $2 \cdot 10^{14} \text{ g/cm}^3$

1.3.2. Az atommag kötési energiája és stabilitása

A mag tömege mindig kisebb, mint a nukleonok tömegének összege, ami azt jelenti, hogy a mag elemeiből történő keletkezése exoterm folyamat. A mag energiaállapotára, stabilis vagy instabilis voltára nagyon jellemző az egy nukleonra vonatkoztatott tömegkülönbség értéke. A magot alkotó nukleonok tömegének és a mag tényleges tömegének Δm különbsége a tömegkülönbség. A Δm tömegváltozás mindig meghatározott ΔE energiaváltozással jár együtt; számszerű értékét az *Einstein* által felírt összefüggésből számíthatjuk:

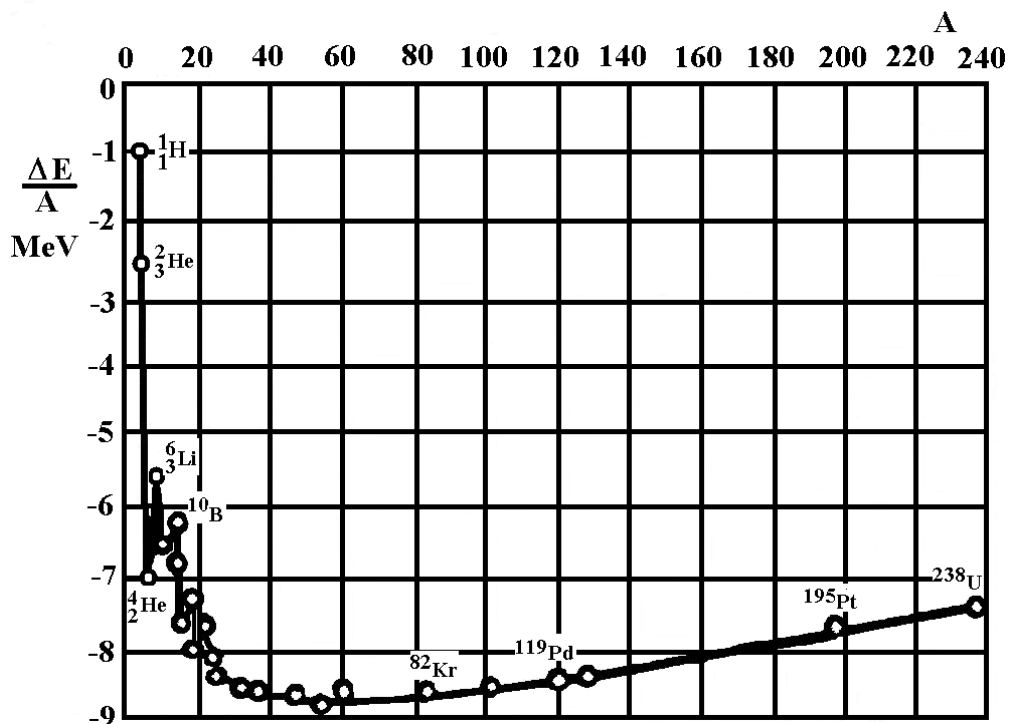
$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2$$

A felszabaduló energiát nevezzük a mag kötési energiájának, mert minimálisan ennyi energiát kell befektetni, ha a magot elemeire akarjuk felbontani. Egy atom egységnyi tömegváltozásának 931 MeV energia felel meg. Ez az atomi tömegállandó (m^u), egy C atom tömegének 1/12 része. Az elektron tömegével 0,51 MeV energia ekvivalens.

A Δm -ből számított ΔE tehát a mag kötési energiája, illetve $\frac{\Delta E}{A}$ az egy nukleonra eső átlagos kötési energia. Használatos a $\frac{\Delta m}{A}$ is, mint ún. tömörülési hányados.

(Az irodalomban a $\frac{\Delta E}{A}$ egyaránt szerepel pozitív, illetve negatív előjellel. Negatív előjel használata esetén a mag felépítésénél felszabaduló energiát adjuk meg, pozitív előjelnél a felbontáshoz szükséges befektetendő energiát tüntetjük fel. Abszolút értékben a két energiaérték természetesen egyezik).

Az 1.3.1. ábra az egy nukleonra eső átlagos kötési energia értékét mutatja be a tömegszám függvényében:



1.3.1. ábra Az egy nukleonra eső átlagos kötési energia a tömegszám függvényében

Az egy nukleonra eső kötési energia abszolút értéke, eltekintve a könnyű elemeknél tapasztalt ingadozástól, a 60-as tömegszámig nő, 60-70 között közel állandó, majd a nehezebb magok felé újra csökken. A magenergia-hasznosítás olyan magátalakulással lehetséges, melynek során a fajlagos kötési

energia nő. Mivel a fajlagos kötési energia úgy változik a tömegszám függvényében, hogy a közepes tömegszámánál maximuma van, ezért **elvileg két lehetőség** kínálkozik a magenergia-hasznosításra, a kisebb magok egyesítése (fúzió), vagy a nagyobbak hasítása (fisszió).

A kis tömegszámú magok egyesítésével – a magfúzióval – a fajlagos kötési energia növekszik. Ha két ^2H atommagot sikerül egyesíteni ^4He atommaggá, akkor a fajlagos kötési energia 6 MeV, azaz a felszabaduló energia 24 MeV.

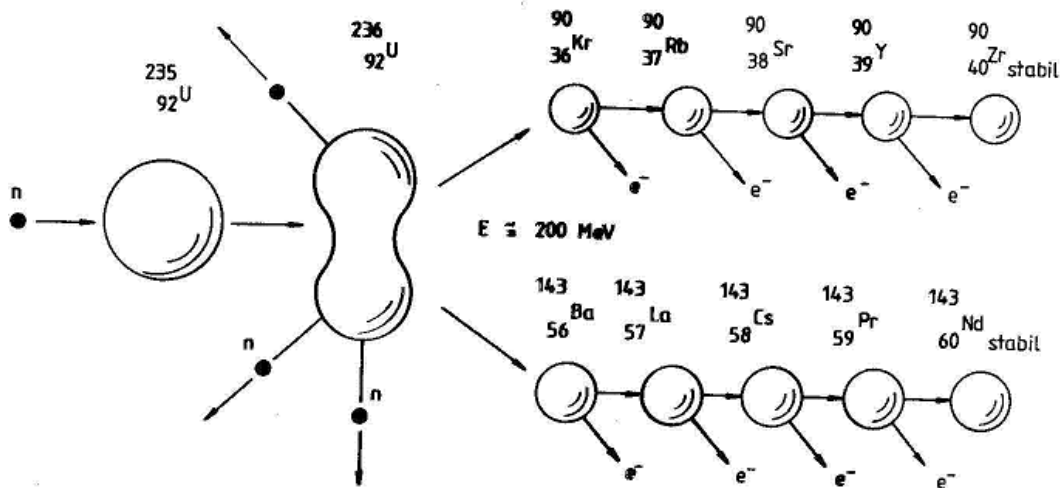
A nagy tömegszámú magok két közepes tömegszámú maggá történő elhasadása – a maghasadás – során szintén nő a fajlagos kötési energia. Ha az ^{235}U elhasad két közepes tömegszámú atommaggá, akkor a fajlagos kötési energia növekedése 0,9 MeV, így a felszabaduló energia 200 MeV.

Ha az atommag átlagos kötési energiáját összehasonlítjuk a kémiai reakciónál fellépő néhány eV-os energiaváltozásokkal, akkor azt látjuk, hogy az atommagot alkotó nukleonok kötési energiája több milliószorosa a kémiai kötések energiájának, tehát egy-egy új kötés kialakítása milliószorosán nagyobb energia felszabadítást jelent a kémiai kötések kialakulásánál felszabaduló energiához képest. A magon belüli és a kémiai kötések erősségének lényeges eltérése szükségszerű, ui. ha a mag kötési energiájának nagysága nem múlna sokszorosán felül a kémiai kötésekét, akkor az elemek (a magok) nem lehetnének ellenállóak a kémiai reakciókkal szemben, a természeti világ folyamatai egészen más képet mutatnának. A körülöttünk lefolyó jelenségek egyik meghatározó alapsajáttsága éppen az elemek (az atommagok) állandósága, melyet a mag nagy kötési energiája biztosít.

1.3.3. A maghasadás

1938-ban két német tudós, Otto Hahn és Fritz Strassmann meglepő, az akkori fizikai világgépet gyökeresen megváltoztató felfedezést tett: az urán atommagja, neutronokkal bombázva, kettéhasad, s eközben jelentős mennyiségű energia szabadul fel (atomonként ~ 200 MeV). Ez a kezdetben – tisztán tudományosnak tűnő – felfedezés a kor legfontosabb politikai tényezője lett. Az ember ugyanis, történelme során első ízben jutott olyan pusztító eszköz birtokába, amellyel néhány pillanat alatt a földgolyó óriási területein el tud pusztítani minden életet és kultúrát. Lehetséges egy másik alternatíva is: az atomenergia az emberiség távlati energiaellátásának pótolhatatlan forrásává válhat. Az urán ugyanis, mint nukleáris üzemanyag, a jelenleg ismert legkoncentráltabb energiaforrás: fajlagos energiataralma milliószor nagyobb a legjobb minőségű fosszilis tüzelőanyagok energiataralmánál. (Így pl. egy kb. $0,5\text{ cm}^3$ méretű UO_2 fűtőelem-tabletta energiataralmát tekintve egyenértékű $0,6$ tonna kőolajjal vagy 1 tonna jó minőségű energetikai szénnel.) Ezenkívül a nukleáris üzemanyag egységnyi energiaköltsége is kevesebb bármely ásványi tüzelőanyag energiaköltségénél.

Hahn és Strassmann felfedezése alapján Niels Bohr már 1939-ben arra a következtetésre jutott, hogy a természetes elemek közül csak a legnehezebb és legbonyolultabb atomok, az urán és a tórium atomjai képesek hasadásra, vagyis éppen azok, amelyeknek instabilitása a természetes radioaktivitást előidézi. Gyakorlatilag pedig az urán 235 -ös tömegszámú atommagja messze a legalkalmasabb arra, hogy benne neutronsugárzás hatására ez a folyamat előálljon. Egy ilyen folyamat szemléletesen látható az 1.3.2. ábrán.



1.3.2. ábra. A maghasadás egyik szemléletes folyamata

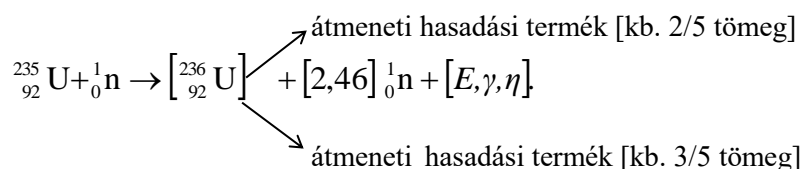
Az urán maghasadását tömege egy ezrelékének elvesztésével egyenértékű nagy energia kibocsátása és radioaktív hasadási termékek keletkezése kíséri. Úgy tűnt, a jelenség magyarázatot szolgáltatott arra, hogy a Földön normális körülmények között található természetes elemek száma miért korlátozódik 92-re. A legnehezebb elem atommagja ugyanis, ha ahhoz még egy anyagi részecske járul, széthasadhat, mint egy túlságosan terjedelmes vízcsepp. A hasadás jelentősége csupán erre az egyébként fontos elméleti vonatkozásra korlátozódnék, ha nem hordozná magában a megismétlődés lehetőségét.

1939. márciusában Joliot-Curie, Halban és Kowarski kimutatta, hogy a ^{235}U hasadását az energia-felszabaduláson és a hasadási termékek keletkezésén túl neutronok, az ún. szekunder neutronok kibocsátása kíséri (ma már tudjuk, hogy a neutronszám átlag 2,46). Ez a tény tette lehetővé, hogy az atomhasadás továbbterjedjen, mint ahogy az égéskor keletkezett hő lehetővé teszi, hogy az égés folytatódjék. A felszabadult, szekunder neutronok a környező uránban újabb maghasadásokat idézhetnek elő. Ezzel hozzáférhetővé vált az atommag energiakészlete.

1.3.4. Hasadóanyagok

A természetes hasadóanyag

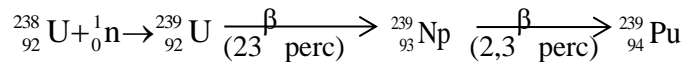
A természetben csak egyfajta tényleges hasadóanyag létezik az urán-235. A természetes urán alapvetően kétfajta izotópból tevődik össze: az urán 238-as tömegszámú (99,3 %) és az urán 235-ös tömegszámú izotópból. Ezek közül csak az urán-235 az elsődleges nukleáris üzemanyag, amely a reaktorban a termikus (lassú) neutronok hatására hasad. Ezeknek a neutronoknak a kinetikus energiája már olyan kicsi, hogy sebességük megközelíti a molekulák hőmozgásának (termikus) tartományát (~2200 m/s). A hasadás a következő folyamattal írható le:



A hasadási folyamatot meghatározott gamma, és neutronsugárzás, energia-felszabadulás (~200 MeV) és átlagosan 2,46 neutron keletkezése kíséri. A keletkezett neutronok egy rész-megfelelően lelassítva újabb urán-235 hasítására, tehát a láncreakció fenntartására fordítható.

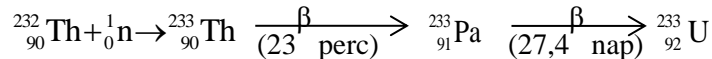
A mesterséges hasadóanyagok

A maghasadás folyamatában keletkezett neutronok másik része abszorbeálódik (befogódik) a másik uránizotóp magjában és létrehozza a következő folyamatot:



Amint a folyamatból látható, a keletkezett urán-239-ből, bétabomlások következtében, viszonylag rövid idő alatt plutónium-239 keletkezik, amely maga is hasad termikus neutronok hatására.

Hasonló folyamat hozható létre, ha neutronokkal besugározzuk a természetben található tóriumot:



A keletkezett urán-233 szintén képes hasadni termikus neutronokkal.

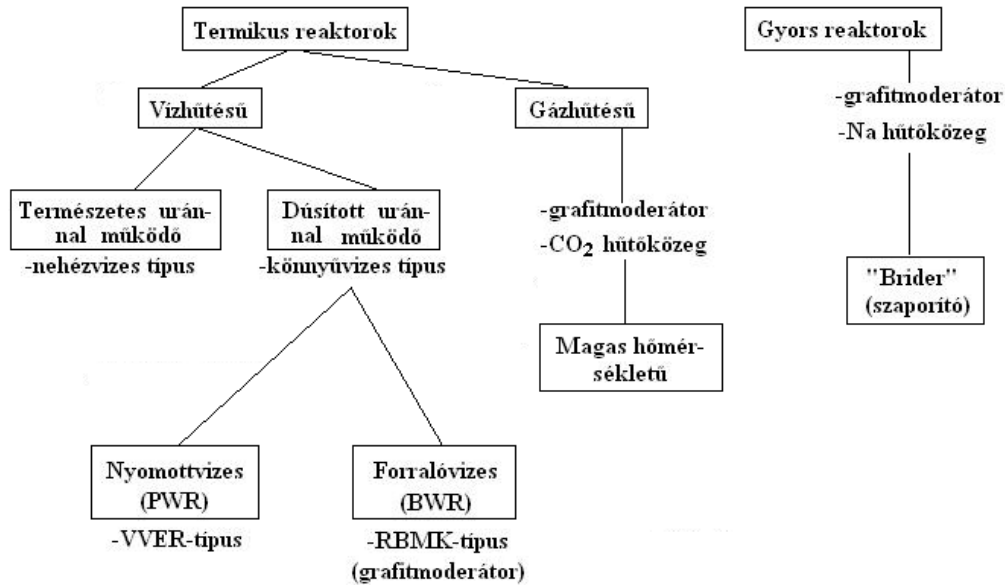
Láthatjuk tehát, hogy a természetben előforduló hasadóanyag-készlet lényegesen megnövelhető, így a nukleáris üzemanyagbázis esetében néhány száz évig nem fenyeget a veszély, hogy kimerül.

A manapság elterjedt, enyhén dúsított uránból (ld. később) készült nukleáris üzemanyagok uránizotóp összetételéből következik, hogy a bennük lévő hasadóanyag kezdetben kis mennyiségű. Gyakorlatilag e kis mennyiségnek is csak egy része van maghasadásnak kitéve (~1 %). A másik, még fontosabb tényező, hogy a mai termikus reaktorokban felhasznált urán közel 97 %-ban urán-238 izotópot tartalmaz, amelyből a fentebb vázolt folyamat szerint újabb hasadóanyag keletkezik. Nemcsak „elég” az üzemanyag energiát termelve, hanem közben nagy mennyiségű újabb hasadóanyag is keletkezik. Az ún. gyors szaporító reaktorok a szükséges energia termelése közben képesek megtermelni egy másik, hasonló teljesítményű reaktor teljes hasadóanyag szükségletét. Hasonló jelenség még a leggazdaságosabban működő fosszilis tüzelőanyaggal fűtött kazánok esetében is elképzelhetetlen. Az egyszer már felhasznált üzemanyag nem hasonlítható össze a klasszikus tüzelőanyagok maradékaival, mivel igen nagy mennyiségű fel nem használt és újabb keletkezett hasadóanyagot tartalmaz. Az erősen radioaktív hasadási termékeket eltávolítva — megfelelő kémiai technológiai módszerekkel — visszanyerhetjük a hasadóanyagot, és újra reaktor-fűtőelemeket gyárthatunk belőle.

1.3.5. Atomreaktorok és atomerőművek

Az 1942. december 2-át az atomkorszak történelmi dátumaként tartják számon. Ekkor indította be ugyanis az olasz fizikus, Enrico Fermi, a chicagói egyetem labdarúgó pályája alatt azt a grafit-uránépitményt, amelyet ő atommáglyának nevezett el. Az atommáglya felépítésénél abból indultak ki, hogy a maghasadást előidéző neutronokat előbb le kell lassítani. Ezért az uránrudakat üreges grafitömbben helyezték el, amely a lassítóközeg (moderátor) szerepét töltötte be. Ugyancsak grafitot alkalmaztak reflektorként is, amelynek az volt a szerepe, hogy a neutronokat visszaverje és így csökkentsék a neutronvesztésüket. Mivel a maghasadás keletkezett energia nagy része hővé alakul, gondoskodni kellett az aktív mag intenzív hűtéséről is. Ezt hűtővíz áramoltatásával érték el. A máglya szabályozására kadmiumrudakat használtak, mivel a kadmium a neutronokat erősen abszorbeálja. A külső betonköpeny a sugárvédelmet is szolgálta.

Az atommáglya megalkotását követő két évtized alatt sokféle reaktortípusról született elképzelés villamosenergia-termelő célra is. Ezek közül néhány gazdaságos típus honosodott meg a világ atomerőműveiben. A jelenlegi általános helyzetet érzékelteti a következő osztályozás:



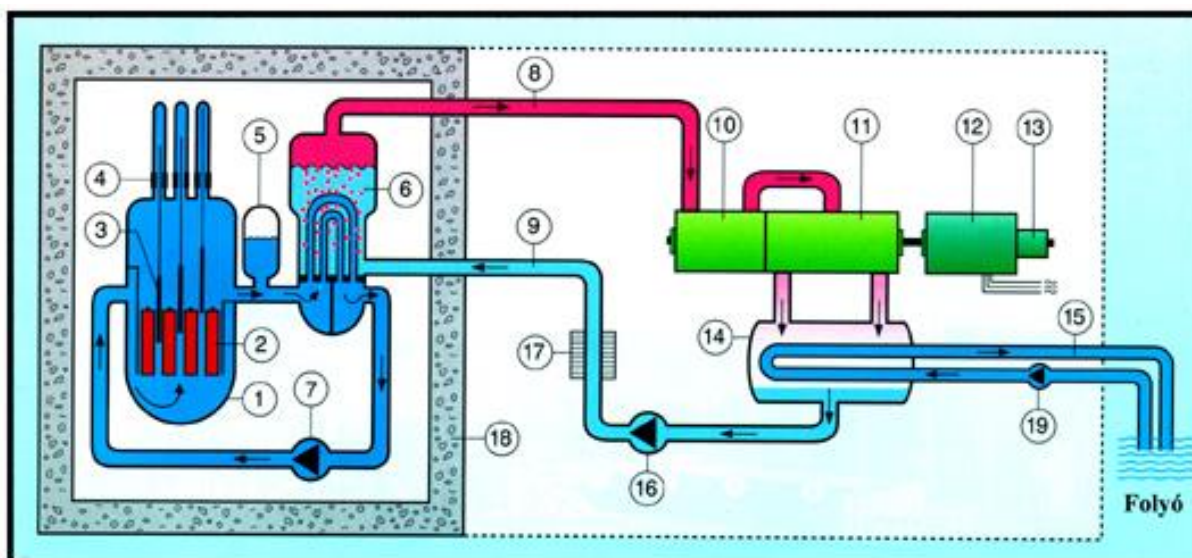
1.3.3. ábra. Atomerőművi reaktortípusok

Jelenleg a világ atomerőművei lényegében termikus reaktorokkal működnek. Ezekben lassú neutronok idézik elő a maghasadási folyamatot a fentebb már ismertetett módon. A gyors neutronokkal működő reaktorok – amelyek az ^{238}U –at is hasznosítják – a világ atomenergetikájában még nem képeznek számottevő tényezőt.

A termikus energetikai reaktorok közül jelenleg a legelterjedtebb az enyhén dúsított (~3,5 %) uránnal működő, természetes (könnyű) vízzel lassított (moderált) és hűtött típus. A neutronok leghatásosabban a tömegükkel nagyjából megegyező tömegű hidrogénnel lassíthatók. A természetes víz neutronelnyelése azonban jelentős, így a láncreakció fenntartásához a természetes uránban a hasadó képes, 235-ös magok arányát növelni, az uránt **dúsítani** szükséges. Másik lehetőség a természetes (dúsítás nélküli) urán és a kisebb neutron elnyelő (deutériumot tartalmazó) nehézvíz felhasználása. Moderátorként ezeken kívül még grafitot is alkalmaznak.

A termelődő hőt leggyakrabban vízzel vezetik el. A forralóvizes típusban az általában UO_2 -tablettákkal töltött fűtőelemeket tartalmazó reaktor aktív zónáján átvezetett csövekben külön-külön felforr a víz, amelynek energiáját hőcserélőkön keresztül, vagy azok nélkül hasznosítják a turbógenerátorban. (Ehhez a típushoz tartozik, pl. a csernobili atomerőmű reaktora.) A sokkal gyakoribb nyomottvizes típusú reaktorral működő atomerőművekben a víz a reaktortartályban alkalmazott nagy nyomás következtében nem forr fel, az elvezetett hőt egy hőcserélőben egy másik, ún. szekunder körben keringetett víznek adja át. A szekunder körben a nyomás kisebb, így a hőcserélőben a víz felforr. Ilyen VVER típusú (vízűtésű, vízmoderátorú energetikai) reaktorral működik a paksi atomerőmű 4 db, eredetileg egyenként 440 MW névleges teljesítményű blokkja is, amelynek elvi vázlata az 1.3.4. ábrán látható.

Az ábra szerinti reaktort (1) zárt körben (primerkörben) szivattyúval (3) keringetett, nagy nyomású víz hűti, amely a felszabaduló hőenergiát a gőzfejlesztőhöz (4) (hőcserélőhöz) szállítja. A gőzfejlesztőben a második, zárt körben (szekunderkörben) keringetett víz (tápvíz) elpárolog, és telített gőz keletkezik, amely a gőzturbinát (5) és hozzákapcsolt generátor (6) forgórészét forgatja. A generátorban keletkezett villamos energiát transzformátor (9) táplálja az Országos Villamos Energia Rendszer nagyfeszültségű vezetékálózatába. A gőzturbinából távozó gőz a kondenzátorban (8) hűl le és cseppfolyósodik a Dunából idevezetett hűtővíz hatására. (A Duna vize a hőszennyezés elkerülése érdekében csak előírt mértékben melegedhet fel.) A kondenzátor alján összegyűjtött vizet (kondenzátumot) szivattyúk (7) előmelegítőkön keresztül táplálják vissza a gőzfejlesztőbe.



- | | | |
|---|------------------------|-----------------------|
| 1 Reaktortartály | 8 Frissgőz | 14 Kondenzátor |
| 2 Fűtőelemek | 9 Tápvíz | 15 Hűtővíz |
| 3 Szabályozórudak | 10 Nagynyomású turbina | 16 Tápvíz szivattyú |
| 4 Szabályozórúd hajtás | 11 Kisnyomású turbina | 17 Tápvíz előmelegítő |
| 5 Nyomástartó edény 123 bar 297°C | 12 Generátor | 18 Betonvédelem |
| 6 Gőzfejlesztő 46 bar 223 °C
→ 258°C | 13 Gerjesztőgép | 19 Hűtővíz szivattyú |
| 7 Primer körű keringető szivattyú | | |

1.3.4. ábra. A Paksi Atomerőmű elvi vázlatja

1.3.6. A nukleáris üzemanyagciklus

A nukleáris energetika fejlődésével párhuzamosan megindult egy teljesen új technológia – a nukleáris kémiai technológia – gyors ütemű fejlődése, amely arra hivatott, hogy kielégítse a nukleáris üzemanyag és a különleges reaktorszerkezeti elemek előállítására terén jelentkező igényeket. De fontos feladattá vált az így kialakuló egész atomipar veszélyesen megnövekvő radioaktív hulladékainak a hatástalanítása is. Mindezek a problémák új feladatok elé állították a kémiai technológiát.

A legsürgősebb és legnagyobb feladat volt a fentiek közül egy olyan nagy ipari technológiai lánc létrehozása, amely biztosítani képes a reaktorok üzemanyaga terén ugrásszerűen megnőtt igényeket. Erre rövidtávon a legkézenfekvőbbnek bizonyult a megfelelő minőségű urán nagyipari kémiai technológiájának a kidolgozása, hosszú távon pedig – amely nagyságrendekkel megnövelheti a rendelkezésre álló és ténylegesen felhasználható nukleáris üzemanyagvagyont – egy olyan üzemanyagciklus technológiájának a létrehozása, amelyben hasznosíthatjuk a reaktorok által ki nem égetett természetes hasadóanyagot (^{235}U), valamint az ott keletkezett, ill. előállított újabb, mesterséges hasadóanyagokat (plutónium-239, urán-233).

Az urán a természetben gyakran előfordul, mintegy 200 fajta olyan ásvány ismeretes, amelyben uránt találtak. Ez az urán amfoter jellegével és nagyfokú komplexképző hajlamával magyarázható. Jelentős mennyiségei találhatóak a földkéregben ($\sim 10^{14}$ tonna, mintegy 2 g/t közepes koncentrációban), valamint

a világtengerekben ($\sim 10^{10}$ tonna, $2 \cdot 10^{-3}$ g/t átlagos koncentrációban). Ez az uránmennyiség azonban – mivel viszonylag könnyen képződnek vízben jól oldódó uránvegyületek – erősen diszpergált módon oszlik meg a földkéregben is. Mivel a kevés viszonylag dús (10 % urántartalom feletti) ércet már korábban kitermelték, ma csak 3 %-alatti urántartalmú ércet sikerül kinyerni, de a 0,3-0,1 %-os uránérc-lelőhelyet is feltárásra érdemesnek tartják.

A nagy tisztaságú urán előállítása több, egymást követő műveletből áll, amelyek végén UO_3 -ot nyernek, amely a nukleáris üzemanyag kiinduló vegyületeként szerepel.

Amint már fentebb láthattuk, a természetben előforduló egyedüli hasadóanyag – az urán-235 izotóp – túlságosan felhígítva szerepel az uránban: minden 1000 uránatomra csak 7 ilyen atom jut. A természetes vízzel történő moderálás érdekében az uránt dúsítani kell. Izotópdúsításra értelem szerűen csak fizikai módszerek alkalmazhatók (pl. desztilláció, termodiffúzió, gázdifffúzió, ultracentrifugálás, aerodinamikai módszerek), mivel az izotópok kémiaiailag nem különböznek, ugyanazon kémiai elem különböző tömegszámú változatai. A második világháború után – elsősorban katonai célra – leginkább a gázdifffúziós módszer terjedt el. Az eljárás azon alapszik, hogy porózus falon keresztül a gázmolekulák difffúziós sebessége a molekulatömeg négyzetgyökével fordítva arányos. Így a gázalakú UF_6 -ban lévő könnyebb urán-235-ös izotóp gyorsabban diffundál és a porózus fal túlsó oldalán enyhén feldúsul. Ha ezt a folyamatot megfelelő nagy számban megismételjük, már mérhető hatást érhetünk el.

Az atomerőművek reaktoraiban üzemanyagként az ún. fűtőelemek szolgálnak. Ezek a fűtőelemek rozsdamentes acélból vagy Zr-Nb-ötözetből készült vékony csövek, amelyek fém uránnal vagy urán-dioxiddal vannak töltve. Az urán-dioxidot pelletezik, a tablettákat magas hőmérsékleten zsugorítják.

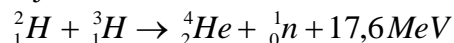
A paksi reaktorban a pelletek végső mérete: 9 mm magasság, 9 mm átmérő. A pelleteket cirkónium-niobium ötvözetből készült, 2,4 m hosszú csövek tartalmazzák. Ezeket a csöveket rozsdamentes acélból készült keretbe kötegelték, egy-egy ilyen köteg 126 db csövet tartalmaz. A 440 MW elektromos teljesítményhez 312 kötegre van szükség, amelyek összesen 42 tonna, átlagosan 3,5 %-ra dúsított urán-oxidot tartalmaznak.

Technológiai szempontból a nukleáris üzemanyag „kiegése”, az üzemanyageciklus egy fázisa. A maghasadás következtében radioaktív hasadási termékek keletkeznek. Ilyenformán egy-egy ún. reaktorkampány alatt (a fűtőelem-cserék között eltelt időszak, ami termikus reaktoroknál általában 1-1,2 év) a nukleáris üzemanyagban mintegy 30-féle kémiai elem különféle radioaktív izotópjai keletkeznek különböző bomlási sebességgel. Egy paksi típusú reaktorban ezek nagyságrendben 10^{18} Bq aktivitást képviselnek. Ezért a kiegészített fűtőelemek reaktorból történő kiemelése után az első teendő ezek „hűtése”, azaz hosszabb ideig történő pihentetése, abból a célból, hogy a keletkezett sokféle típusú, és rendkívül nagy aktivitású izotópok közül a rövidebb felezési idejűek elbomoljanak. (Felezési idő: az időintervallum, amely alatt a keletkezett radioaktív izotóp mennyisége a felére csökken.) Mivel a hasadási termékek között több hosszú felezési idejű radioaktív izotóp is van, a hulladék biztonságos elhelyezéséről több száz évre kell gondoskodni.

A „kiegített” nukleáris üzemanyagból a megmaradt és a keletkezett hasadóanyagok újabb fűtőelemek előállítása céljából megfelelő tiszta állapotban ki is nyerhetők, ezt a kémiai feldolgozó műveletet reprocesszálsnak nevezik.

1.3.7. Fúzió

A szóba jövő reakció a deutérium és a trícium egyesülése:



1 kg anyag 10^4 m³ kőolajjal egyenértékű energiát tartalmaz

A Coulomb tasztítás legyőzésére, $1-2 \cdot 10^8$ °C szükséges. A nemzetközi együttműködéssel folytatott kísérleteket mágneses térrel összetartott plazmában végzik. Az ún. Lawson kritérium szerint a plazmasűrűség*idő*hőm = $3,77 \cdot 10^{21}$ sK/cm³ kell legyen.

1.4. Alternatív energiahordozók

Vizsgálatuk oka: a kőolaj (és földgáz) készletek 50 (100) évre elegendők, a fosszilis energiahordozók elégetése környezetszennyezéssel jár (savas eső, üvegházhatás), az atomenergia hosszú távú kockázattal jár. A jövőben megújuló, tiszta energiahordozókra lesz szükség, különösen azt figyelembe véve, hogy ma a világ összes energiafogyasztásának 80 %-át a fejlett országok használják fel ahol a Föld népességének 20 %-a él.

1.4.1. Az alternatív energiahordozók általános jellemzése

Napenergia

A földre eső napsugárzás teljesítménye 176 mrd MW, óriási. A napos órák száma Magyarországon kb. 2000 óra/év, a Szaharában kb. 4000 óra/év. Az évi átlagos beeső sugárzási energia Magyarországon 4400-4800 MJ/m²*év.

A napenergia közvetlenül hasznosítható a fotovillamos cellában, a napkollektorban, a nap-hőerőműben és egyéb módokon (mezőgazdaságban termény-szárítás, szoláris építészet stb.) is. A napenergia közvetett hasznosításaként említhetjük a szél energiát, a víz energiát és a biomasszát.

A *fotovillamos cella* környezetvédelmi szempontból a legtisztább energiatermelési mód. Azt használja ki, hogy egy félvezető diódában a foton hatására töltés szétválasztás, elektron – lyuk pár jön létre. Az elektron az n félvezető, a lyuk a p félvezető felé vándorol. A keletkező egyenáram inverterrel hálózatra is kapcsolható, azonban a változó teljesítmény miatt (hagyományos, vagy új típusú, pl. víztározó a magasban, H₂) akkumulátorra van szükség. Általában csak kis teljesítménnyel, helyi igények kielégítésére alkalmazzák, helyigénye nagy. A jelenlegi ár még nem versenyképes a fosszilis energiahordozókkal, de egyre csökken, a határfok egyre javul. Magyarországon ma évente 2,6 MW-nyi teljesítményű cellát állítanak elő, főként exportra. A beruházási költség kb. 4 USD/W, az áram előállítására 6-120 Ft/kWh. A világban már néhány MW-nyi erőmű teljesítmény üzemel.

A *Nap-hőerőműben* az egyik megoldás szerint optikai tükrökkel gyűjtve a napsugarakat energiaáram-sűrűség növelést hajtanak végre, ezzel egy toronyban vizgőzt termelnek, amelyet hagyományos turbina-generátor rendszerre vezetnek. Az Egyesült Államokban már működik ilyen erőmű 10 MW teljesítménnyel. Egy másik megoldásban a napsugarakat parabola vályús kollektorban gyűjtik, a vályú fókusz vonalában csőben haladó olaj melegszik. Californiában 9 db 13–80 MW teljesítményű ilyen erőmű üzemel, 14 % átlagos határfokkal. Az erőmű helyigénye jelentős, a legnagyobb 464.000 m²-t foglal el.

A *napkollektorokat* főként a háztartások melegvíz szükségletének ellátására használják, alacsony hőmérsékletű folyadék hőcserélőben melegíti a használati melegvizet. Kiegészítő fűtésként alkalmazható, intelligens automatikát igényel. A beruházási költség egy átlagos lakóháza 500000 Ft, a megtérülési idő 8-10 év.

A napenergia hasznosítással kapcsolatban megállapítható, hogy környezetvédelmi szempontból a legjobb energiatermelési mód lehet, de egyelőre az ár nem versenyképes a fosszilis energiahordozókkal, illetve megfelelő akkumulátor szükséges.

Szélenergia

A szél oka, hogy a napsugarak különböző felületi felmelegedést okoznak. A hasznosítás során nyerhető energia elsősorban a szélebség függvénye. A változó intenzitás és szélirány miatt mozgatható tengelyű, állítható lapátos szélkerekek szükségesek. A váltakozó teljesítmény miatt szintén akkumulátor szükséges. 6m/s szélerősség (250 W/m^2) alatt csak házi energia ellátásra alkalmas, a megtérülés mintegy 8 év. 10 m/s-nál 1200 W/m^2 , a megtérülés 2-3 év. Magyarországon már üzembe léptek az első szélerőművek, Inota mellett, egy 30 m magas oszlopon 3 db 15 m hosszú turbinalapát forog, maximális teljesítménye 250 kW. A szélenergia hasznosítás előnye, hogy az építés csak 2 hónapot vett igénybe, viszont a beruházási költség jelentős, 100 mFt. (Dunaújváros közelében, Kulcson is működik már szélerőmű.)

A szélenergjáról környezetvédelmi szempontból hasonló megállapítások tehetők, mint a napenergia esetén, újabban ellenzői a táj elcsúfításával is vádolják a szélerőműveket.

Vízenergia

A vízenergia hasznosításának alapja a napenergia miatti vízkörforgás. Ha az eső a tengerszintnél magasabbra hullik, a helyzeti energia elvileg hasznosítható. A hasznosítás szintkülönbsége alapján 3 típust (nagy, közepes és kis esésű) különböztetnek meg. A legnagyobb, 2030 m-es esésű erőmű Olaszországban üzemel, a legnagyobb, $10000 \text{ m}^3/\text{s}$ -os vízhozamú Oroszországban. Magyarországon több törpeerőmű mellett a két legjelentősebb a tiszalöki ($\Delta H=7,5 \text{ m}$, 12 MW), és a kiskörei ($\Delta H=6,3 \text{ m}$, 21 MW).

Kis vízesésű folyóknál a vízenergia hasznosítás nem célszerű, a vízszint duzzasztás előtti emelése, duzzasztás utáni csökkentése hosszú szakaszon vízháztartás módosulást okoz. Ez ökológiailag kiszámíthatatlan következményekkel járhat. A beruházási költség egyébként is hatalmas, csak folyószabályozással, öntözőművel együtt lehet rentábilis. A vízerőművek általában alaperőműként üzemelnek, csúcsra járatásuk esetén az állandóan változó vízszint szintén számos ökológiai problémát felvet.

Biomassza

Becslések szerint a Földön évente 165 mrd t biomassza keletkezik. A legjobb hatásfokkal az őserdőben hasznosul a napenergia, itt 30 t/ha*év , de pl. egy gabonatóblán $6,5 \text{ t/ha*év}$ a biomassza termelés.

A hasznosítás módjai lehetnek: a közvetlen eltüzelés, a pirolízis, elgázosítás, a sajtolás, az alkoholos erjesztés, és a metános erjesztés (biogáz termelés).

A *közvetlen tüzelés*nél problémát jelent a magas oxigén-tartalom, a kis fűtőérték, a kis sűrűség, a hamu alacsony olvadáspontja, a változó összetétel. Emiatt kis tüztérhőmérsékletet lehet elérni, a hatásfok alacsony. A biomassza tüzelés speciális kazánokat igényel.

A *pirolízis*, az *elgázosítás* a kőszénknél alkalmazott módszerekkel analóg eljárás. A lényege az oxigén jelenlétében, illetve annak kizárásával végzett hevítés. Célja éghető gáz, illetve nemesebb tüzelőanyag nyerése.

Bizonyos növényi magvak *sajtolás*ával brikett, pellet, olaj nyerhető. Az olaj napraforgóból, repceből nyerhető a legjobb hatásfokkal, hektáronként mintegy 700 kg. A felhasználás történhet közvetlen, vagy átalakítás (repeceolaj metil-észter ld. később) utáni elégetésükkel.

Az *alkoholos erjesztés* ősidők óta ismert eljárás. Az így nyert etilalkohol desztillációval kinyerhető, közvetlenül, vagy motorbenzinbe keverve motorhajtóanyagként felhasználható.

A *metános erjesztéssel* kb. 50 – 50 %-ban metánt és szén-dioxidot tartalmazó *biogáz* nyerhető. Fűtőértéke kb. 22500 kJ/m^3 , a földgáz fűtőértékének 2/3-a, de a szén-dioxid kémiaiilag eltávolítható, a fűtőérték növelhető. Elsősorban melléktermékekből, pl. hígtrágya érdemes előállítani, de személtlerakókban anaerob baktériumos erjedéssel is keletkezik. A hígtrágyából keletkező folyadék műtrágyát helyettesítő öntözővíz is lehet.

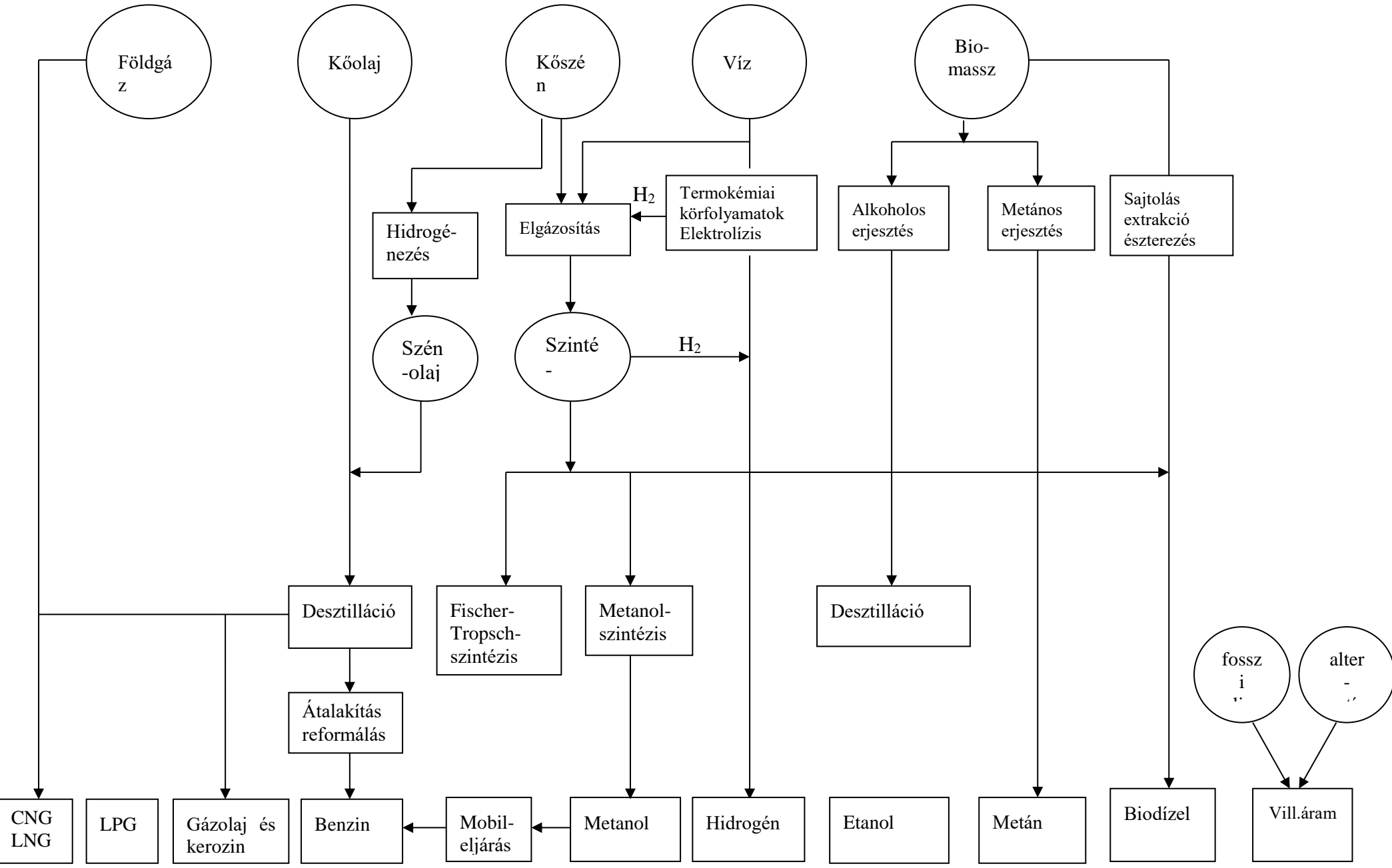
A biomasszából nyert tüzelőanyagok tüzeléstechnikai szempontból nem kedvezőek. Elsősorban melléktermékek hasznosítása jöhet szóba, a kultúrnövényeké az élelmezési problémák miatt nem.

Geotermális energia

A föld mélyéből nyerhető geotermális energia forrása 70 %-ban a radioaktív bomlás során keletkező hőből, 30 %-ban a Föld természetes hőkapacitásából származik. A Föld belseje felé haladva a hőmérséklet átlagosan 30 °C-kal emelkedik km-enként, de ez a gradiens akár 100 °C/km is lehet. Általában melegvizet termelnek ki, de ritkábban gőz is nyerhető. A hasznosítás után a vizet nagyobb távolságra kell visszavezetni, hogy a forrást ne hűtse. A geotermális energia hasznosítása környezetvédelmi szempontból kedvező, de energetikailag a kis hőmérsékletkülönbség, kémiaiilag a gyakran magas sótartalom miatti korrózió, vízkőképződés kedvezőtlen. Emiatt csak helyi energiaforrásként hasznosítható.

1.4.2. Alternatív motorhajtó anyagok

A szóba jövő lehetőségekről lásd az 1.4.1. ábrát.



Köszén

A készletek ugyan jelentősek, de belőle az 1.2.2. fejezetben ismertetett módokon nagyobb környezetszennyezéssel, drágábban állíthatók elő motorhajtó anyagok, mint a kőolajból.

Metanol

A metanol oktánszáma kiváló, nagyobb kompresszió viszony mellett, nagyobb hatásfokkal égethető el Otto-motorban, mint a motorbenzin. Mivel nincs benne C-C kötés, a kipufogógázokban kevesebb mérgező anyag (de több aldehid) keletkezik. A benzines elosztóhálózat alkalmas lehet a metanolra is. Hátrányai, hogy fűtőértéke a motorbenzinének fele (a tömegének fele oxigén!), emiatt csaknem kétszeres a volumetrikus fogyasztás, rossz a hidegindítás (a forráspontja 65 °C), korróziós problémákat okoz, vízzel korlátlanul elegyedő, mérgező folyadék, előállítása szintézisgázból drága, jelenleg kis kapacitások állnak rendelkezésre. Benzinhez keverőkomponensként kisebb mennyiségben kiválóan alkalmas lehet.

Etanol

Az etanol oktánszáma szintén kiváló, nagyobb termikus hatásfok érhető el vele is, mint motorbenzinnel. Fűtőértéke a motorbenzinnek mintegy 2/3-a, (oxigéntartalma 35 %), így 1 dm³ benzin kb. 1,25 dm³ etanollal egyenértékű. Az égése szintén tisztább, mint a benziné, de a forráspontja (78,5 °C) miatt itt is hidegindítási problémák léphetnek fel. Vízzel szintén korlátlanul elegyedik, de nem toxikus, így keverőkomponensnek a metanolhoz hasonlóan kiváló. Előállítása történhet biológiai úton. A *bioetanol*hoz azonban jelentős termőföldigényt kell kielégíteni, valamennyi gépkocsi bioetanolal történő hajtásához a jelenlegi összes termőföld kétszerese lenne szükséges, valamint nagy energiaigényű a desztilláció. Feltétlenül előnyös azonban, hogy a teljes ciklusban a szén-dioxid kibocsátás akár nulla is lehet, azaz a fotoszintézissel megkötött szén-dioxidot juttatjuk vissza a légkörbe a kipufogógázokkal. A vegyipari előállítási mód etilén hidratálásával történik, de az etilént jelenleg kőolajból nyerik, így az etilén előállítás kérdéses a kőolajkészletek kimerülése után.

Szénhidrogén gázok

Az 1-4 szénatomot tartalmazó szénhidrogén gázok (metán, etán, propán, bután) fűtőértéke és oktánszáma is kiváló:

	F (MJ/kg)	RON	MON
metán	50	133	130
etán	48	115	103
propán	47	110	100
n-bután	46	93	92
i-bután	46	100	98

Nagyobb hidrogén tartalmuk miatt elégetésükkor kevesebb szén-dioxidot bocsátanak ki, mint a motorbenzin. Az Otto-motor átalakítható, az égés tisztább, de nagyobb a volumetrikus fogyasztás, hármashatású katalizátor használható, az adókedvezmény miatt jelenleg olcsóbb az üzemeltetés, mint a motorbenzinnel.

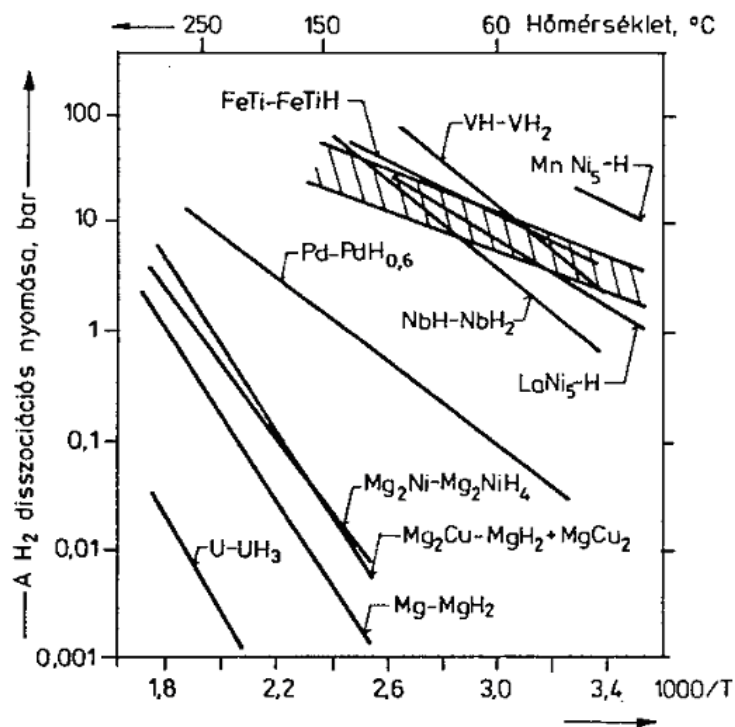
A megvalósítás történhet sűrített földgázzal (CNG), cseppfolyós földgázzal (LNG), vagy propán-butánnal (LPG). A sűrített földgáz 140-200 bar nyomású, nehéz tartályt igényel, nagy a balesetveszély és a ballaszt-tömeg. A földgáz cseppfolyósításához atmoszférikus nyomáson mínusz 160 °C szükséges, a hűtés nagy energiaigényt jelent. A propán-bután tűnik perspektivikus megoldásnak, mert könnyen cseppfolyósítható, a megtehető úthossz kevésbé korlátoz. A propán-bután földgázból és kőolajból

nyerhető, a készletek nem végtelenek, de még számottevőek. A gázüzemű autók elterjedéséhez új infrastruktúrát kell kiépíteni (Magyarországon kb. 300 kút, és 60-70 ezer gázüzemű gépkocsi van már). A „gázautó” néhány évtizedre átmeneti megoldás lehet.

Hidrogén

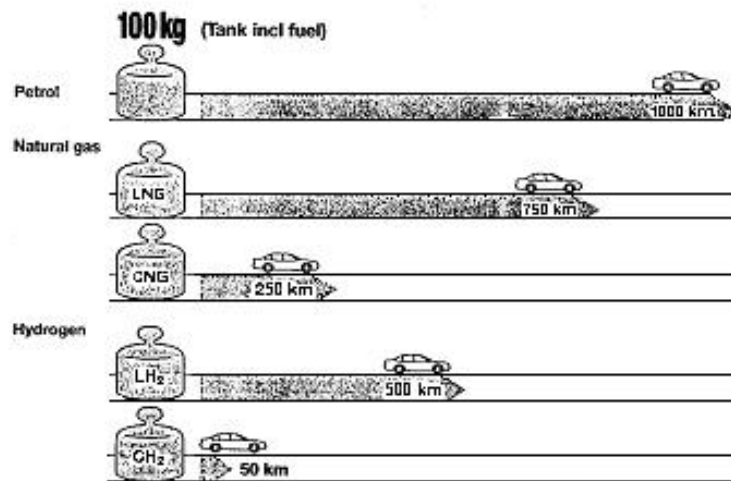
A hidrogén fűtőértéke tömegegységre vetítve a legnagyobb, 120 MJ/kg, de egységnyi térfogatra a metán fűtőértékének csak 1/3-a. A hidrogén nagy koncentráció-tartományban (4-76 tf%) ad robbanóképes elegyet a levegővel, a gyújtási energia igen kicsi, az égési sebessége, diffúzió sebessége nagy, emiatt a hidrogénes hajtáshoz szigorú biztonsági intézkedések szükségesek. Az égése viszont tiszta, a (desztillált) víz mellett csak NO_x keletkezik.

A hidrogén tárolása történhet egyrészt *fém-hidridekkel*, (ld. 1.4.2. ábra). A $\text{H}_2 + \text{Me} \leftrightarrow \text{Me-hidrid} + \text{hő}$ megfordítható reakció játszódik le. Balról jobbra a feltöltés, visszafelé a használat iránya. A kis hőmérsékletű hidridek már 100°C alatt kb. 1 atm nyomású hidrogént termelnek, a teljesítménysűrűségük 650 Wh/kg. A nagy hőmérsékletű hidridek csak 100°C fölött adnak 1 atm. nyomású hajtógázt, de teljesítménysűrűségük nagyobb, 2500 Wh/kg. A hidridek nagy ballaszt tömeget jelentenek. A másik tárolási lehetőség a *sűrített és a cseppfolyósított hidrogén*. Ezekre a tárolási módokra ugyanazok a megállapítások érvényesek, mint a szénhidrogén gázokra említettek. A hidrogén cseppfolyósításához légköri nyomáson -250°C szükséges! Az alacsony hőmérséklet biztosítása csak drágán oldható meg.



1.4.2. ábra. Fém-hidridek hőmérséklet-nyomás függvényei

A hidrogén tüzelőanyag cellában is elégethető (ld. elektrokémia), a termelt áram villamos motor hajtására használható. A teljes folyamat környezetszennyezése a hidrogén előállításától függ. Ha fosszilis energiahordozóból elgázosítással nyerjük, nagyobb a szennyezés. Ha fosszilis energiahordozóból nyert villamos árammal vizet elektrolizálunk, ugyancsak nagyobb a szennyezés. Ha a villamos áramot az elektrolízishez alternatív energiahordozóból nyerjük, a szennyezés kicsi, de ez a megoldás ma még drága. Az egyes megoldások hatótávolságát mutatja be az 1.4.3. ábra.



1.4.3. ábra. Hatótávolságok összehasonlítása

A hidrogén a jövőben energiatárolóként is szóba jöhet, a felesleges villamos energia felhasználásával vizet elektrolizálva állítható elő, amelyet a fogyasztás megnövekedésekor áramtermelésre lehet használni.

Elektromos autó

Az elektromos autó önmagában nem környezetszennyező. A kérdés inkább az, hogyan állítjuk elő a villamos áramot, és azt hogyan tároljuk az elektromos autóban. Ha fosszilis erőművekben állítjuk elő a villamos áramot, akkor a teljes folyamat környezetszennyezése nagyobb, mint pl. egy benzinüzemű, katalizátoros gépkocsié. Ha alternatív forrásból (pl. fotovillamos elemből) származik a villamos energia, akkor a teljes folyamat alig szennyezi a környezetet, viszont ez a megoldás ma még drága. Az akkumulátoros tárolásnál (1.4.1. táblázat) a jelenlegi akkumulátorokkal kicsi energia- és teljesítménysűrűség érhető el, az akku nehéz, hosszú ideig tartó, gyakori feltöltés szükséges, a hatótávolság kicsi. De a villamos motor csendes, állás közben nem fogyaszt, a fékezési energia visszanyerhető. A másik, perspektívikus megoldás lehet a tüzelőanyag cellában történő közel 80 %-os hatásfokú áramtermelés, és az ugyanilyen hatékonyságú elektromotor kombinációja. A tüzelőanyag cella további előnye, hogy benne bármilyen éghető anyag (pl. hidrogén, metanol) hasznosítható. A hidrogénnél ismertetett tárolási problémák a folyékony tüzelőanyagoknál nem jelentkeznek, de pl. a metanol előállítás problémája fennmarad. Ennek ellenére a járműgépész szakértők szerint is a jövő gépjárműveinek korszerű hajtása a tüzelőanyag cella és az elektromotor együttese lesz.

	Ólom-sav akkumulátor	Nátrium-kén akkumulátor	Benzin
Energiasűrűség	35 Wh/kg	1. generáció: 100 Wh/kg 2. generáció: 200 Wh/kg	12 000 Wh/kg
Optimális munkahőmérséklet	20 °C	330-380 °C	--
Feltöltés/utántöltés	~ 15 h	1. generáció: 10 h 2. generáció: 1 h	~ 2 min
Tömeg 400 km úttávolságra	2000 kg	300 kg	30 kg

1.4.1. táblázat. Energiatárolók összehasonlítása

Biodízel

A biodízel a biomassza hasznosításának egyik fajtája. A növényi olajokat elsősorban emberi tápanyagként és ipari nyersanyagként hasznosítják, de tulajdonságaik alapján kőolajtermékek kiegészítésére és helyettesítésére is alkalmasak lehetnek. A különböző növényekből az 1.4. fejezetben említett sajtolással, majd extrakcióval nyerhető olajok tulajdonságai a kőolajtermékek közül a gázolajhoz állnak a legközelebb. Motorhajtóanyagként történő felhasználásukkal, 100 évvel ezelőtt már Rudolf Diesel is foglalkozott, de kémiai átalakítás nélkül az olaj nem volt felhasználható belsőégésű motorban, mert sűrűségük nagyobb, fűtőértékük kisebb, viszkozitásuk kb. tízszeres, kokszképzési hajlamuk nagyobb, mint a gázolajé, viszont cetánszámuk nagyobb, biológiailag lebonthatók, kéntartalmuk elenyésző. Gond a termőföldigény, és az ár. Csak helyi, egyéb szempontokból (munkalehetőség az adott területen, a mezőgazdaság saját szükségletének megtermelése) indokolt megoldás lehet. A teljes ciklus (mint minden biomassza hasznosítás) az üvegházhatást nem, vagy alig növeli.

A motorban történő felhasználhatóságuk érdekében szükséges átalakításuk is évtizedek óta ismert. Ha a növényi olajokat alkotó zsírsav-glicerín észtereket (ld. középiskola) metil- vagy etilészterre alakítjuk, a tulajdonságok jelentősen javulnak. Így nyerhető, pl. a repceolaj metil-észter (RME), amely a magyar időjárási viszonyok között biodízelnként történő hasznosításra a legalkalmasabb motorhajtóanyag. Az ilyen típusú hajtóanyagokkal évtizedek óta több országban folytak kísérletek, de ezek eredményei gyakran különböznek, az ezzel kapcsolatos irodalomból ellentétes következtetések vonhatók le. Az utóbbi időben — főként német és osztrák példák alapján — Magyarországon is tízéves terv született a biodízel gyártás és felhasználás elterjesztésére, de a gyártás még nem indult meg.

Hibrid megoldások

A jövőben tág teret nyerhetnek az ún. hibrid megoldások is. Az ilyen autóknál benzin- vagy dízelmotor és villanymotor együttesen működik. Emellett generátor, akkumulátor és intelligens szabályozó rendszer is szükséges. Az egyik legkorszerűbb megoldásban, a ma már kereskedelmi forgalomba is került Toyota Priusnál biztosítják, hogy a benzinmotor minden üzemállapotban az optimuma közelében tudjon működni. Nagy terhelésnél a villanymotor az akku felhasználásával besegít a benzinmotornak, kisebb terheléskor a benzinmotor teljesítményfeleslegével, illetve fékezéskor a mozgási energiából a generátor áramot termel és tölti az akkumulátort. A kombináció eredményeként jelentősen csökken a légszennyezés és a fogyasztás is, akár 4 l / 100 km is elérhető.

A különböző megoldások összehasonlító értékelését tartalmazza az 1.4.2. táblázat

	Otto-motor üzemanyag		Dízel	Autógáz	Földgáz	Hidrogén	Bioetanol	Metanol	Villamos energia	
	katalizátor nélkül	katalizátorral							fosszilisból	atomból, Napból
Alkalmasság	0	0	0	-	-	-	0	0 / -	--	
Rendelkezésre állítás	0	0 / -	0	-	0	--- /+++/ ^{1/}	--	--	-- ^{4/}	
Gazdaságosság	0	0	+	+ / -	-	---	--	-	--	
Infrastruktúra	0	0 / -	0	--	---	---	--- ^{3/}	--- ^{3/}	--	
CO	0	++	++	+	+	+++	+	+	+	+
HC	0	++	++	+	+	+++	+ ^{5/}	+ ^{5/}	+	+
NO _x	0	++	+	-	-	+ / -	0	0	0	+
Részecske	0	+	---	+	+	+++	+	+	-	+
CO ₂	0	0	+	+	++	+++	++	0 / -- ^{2/}	--	+
Tüzelőanyag- toxicitás	0	0	+	+++	+++	+++	+++	--		+++

0 = azonos; + valamivel jobb
++ lényegesen jobb
+++ sokkal jobb

- valamivel rosszabb
-- lényegesen rosszabb
--- sokkal rosszabb

1/ vízben, 2/ gyártás által okozott,
3/ egy jelenlegi üzemanyagról való lemondás esetén
4/ villamosságra: 0 5/ aldehidek: -
6/ kettős rendszer katalizátor nélkül

1.4.2. táblázat Alternatív rendszerek értékelése