

# OTTO MOTOR MŰKÖDÉSÉNEK VIZSGÁLATA

Laborgyakorlat előirat  
a „Szénhidrogénipari technológia és katalízis” c. tantárgyhoz

Dr. Szabó Mihály, Dr. Vida László  
BME Vegyészmérnöki és Biomérnöki Kar  
Kémiai és Környezeti Folyamatmérnöki tanszék

A heterogén katalízis köznapi alkalmazásának fontos területe az Otto-motoros gépkocsik káros emissziójának csökkentése. A széleskörű alkalmazáshoz számos műszaki akadályt kellett megoldani, amelyek megismerése tanulságos lehet.

A gyakorlat célja: Otto-motorban a légviszony tényező (a benzin/levegő keverési arány) hatásának vizsgálata, **egyrészt** a kipufogógáz összetételére és adott hármashatású katalizátor átalakítási (tisztítási) hatásfokára, **másrészt** a motor energiamérlegére.

## 1. Elméleti összefoglaló

### 1.1. Az Otto-motor

A belsőégésű motorok: - reciprokáló (dugattyús) - Otto-motor, hajtóanyaga motorbenzin  
- Diesel-motor, hajtóanyaga gázolaj  
- gázturbina, hajtóanyaga speciális petróleum (kerozin)

A négyütemű Otto motor működését ld. az **1. ábrán**

A dugattyús motorok működési paraméterei:

Működési paraméter	Otto	Diesel
keverékképzés	külső	belső
szabályozás	mennyiségi	minőségi
$\lambda$ (légviszonytényező)	$\approx 1$ , $\approx$ állandó	mindig $>1$ , változó
gyújtás	szikra	öngyulladás
sűrítési viszony	$\approx 10$	15-22
sűrítési csúcshőmérséklet	400-500°C	600-900°C
előgyújtás	5-30°	—
befecskendezés	—	10-25°
égési csúcshőmérséklet	40-70 bar	60-100 bar
égési csúcshőmérséklet	2000-2500°C	1800-2100°C
középnomás	6-12 bar	5-8 bar
kipufogógáz hőmérséklete teljes terhelésnél	700-1000°C	500-700°C
kipufogógáz hőmérséklete részleges terhelésnél	300-500°C	200-300°C

A sűrítési, vagy kompresszió viszony ( $\epsilon$ ) a dugattyú alsó és felső holtpontja fölötti térfogatok aránya.

Az előgyújtás szöge a gyújtás időpontját jellemzi. Az a szögelfordulás, amelyet a forgattyús tengelynek a gyújtást követően még meg kell tennie, hogy elérje a felső holtpontot.

A forgattyús tengely fordulatszáma alapjáraton 700-900 1/min, átlagos terhelésnél percenként néhány ezer fordulat. Egy ütemhez fél forgattyús tengely fordulat tartozik, ezek alapján becsülhető az égéshez rendelkezésre álló idő a motorban.

## 1.2. Tüzeléstechnika

A tüzelőanyagból felszabadítható hő nagyságát jellemzi az **égéshő** ( $\dot{E}$ ) és a **fűtőérték** ( $F$ ). Az **égéshő** egységnyi mennyiségű, tüzelőanyag tökéletes elégetésekor felszabaduló hőmennyiség, ha a tüzelőanyag és a levegő hőmérséklete az elégés előtt és az égéstermékek hőmérséklete az elégés után egyaránt 20 °C, a H-tartalom elégéséből keletkezett víz, és a tüzelőanyag, a levegő eredeti nedvességtartalma az elégés után cseppfolyós halmazállapotban van jelen. Az egységnyi mennyiség szilárd, ill. cseppfolyós halmazállapotnál 1 kg-ot, gázhalmazállapotnál 1 Nm<sup>3</sup>-t, azaz normálállapotú, (azaz 0 °C-os és 101,325 kPa nyomású) gáz 1 m<sup>3</sup>-ét jelenti. A tökéletes égésnél a C-, S- és H-tartalomból szén-dioxid, kén-dioxid és víz keletkezik.

A **fűtőérték** az égéshőtől abban különbözik, hogy az égéstermékek víztartalma az égés után nem cseppfolyós, hanem gőz halmazállapotban van jelen.

A gyakorlatban a tüzelés hatásfokának kiszámításakor a fűtőértékhez viszonyítják a felszabaduló, illetve hasznosított hőt, mivel a keletkező füstgáz 100 °C-nál is melegebben, a vízgőzként távozik, azaz az égéstermék lehűlése során a víz párolgáshője nem szabadul fel.

Az égéshő méréssel (kaloriméterrel) állapítható meg. A fűtőérték kiszámításához az égéshőből le kell vonni az egységnyi mennyiségű tüzelőanyag égése során keletkező víz elpárologtatásához szükséges hőmennyiséget, az ún. Regnault hőt,  $F = \dot{E} - R$ . Ha a tüzelőanyag hidrogén-tartalma  $m_H$  kg hidrogén / kg tüzelőanyag, akkor 1 kg tüzelőanyagból  $9 * m_H$  kg víz keletkezik, mivel 1 kg hidrogén elégetése 9 kg vizet eredményez.

$R = L_p * 9 * m_H$ , ahol  $L_p$  a víz párolgáshője, (0 °C-on és 101,325 kPa nyomáson kerekítve 2500 kJ/kg).

Ha a tüzelőanyag is tartalmazott vizet, akkor  $R = L_p * (9 * m_H + m_{v\acute{z}})$ , ahol  $m_{v\acute{z}}$  jelöli a tüzelőanyag eredeti nedvesség-tartalmát kg víz/kg tüzelőanyag egységben.

A koncentrációval analóg fogalom a tüzeléstechnikában a légfeslegtényező ( $n$ ), Otto-motorok esetén (ahol léghiany is előfordulhat) a **légvizony tényező** ( $\lambda$ ).

Definíciójuk azonos:

$$\lambda = \frac{L}{L_0} \quad \text{ahol} \quad L \text{ az égéshez ténylegesen beszívott levegő mennyisége,}$$

$L_0$  az elméleti levegőszükséglet.

$L$  és  $L_0$  mértékegysége megegyezik, mindkét levegő mennyiség (pl. térfogat, vagy tömeg) vonatkozhat egységnyi mennyiségű tüzelőanyagra, vagy egységnyi időre, azaz lehet pl. Nm<sup>3</sup> levegő / kg tüzelőanyag, vagy Nm<sup>3</sup> levegő / h, tehát  $\lambda$  dimenzió-mentes viszonyszám.

$\lambda > 1$  esetén légfesleg (szegény keverék),  $\lambda < 1$  esetén léghiany (dús keverék) van a reakcióterben.

A légfeslegtényező, illetve a légviszony tényező értékét a gyakorlatban a füstgáz (maradék) oxigén tartalmából, vagy a szén-dioxid tartalmából határozzák meg. **Nagy légfeslegnél**, ahol a tökéletlen égés miatti térfogatváltozás elhanyagolható, (a füstgáz maradék O<sub>2</sub> koncentrációja legalább 2 %), az égéstérből (motorból) kilépő gáz O<sub>2</sub> tartalmából sztöchiometriai számítások segítségével  $\lambda$  az alábbiak szerint kiszámítható:

A füstgáz (fg) maradék O<sub>2</sub>-koncentrációja

$$[O_2] = \frac{O_2 \text{ térfogat}}{\text{összes száraz fg térfogat}}$$

1 kg tüzelőanyagra felírva:

$$[O_2] = \frac{(L - L_o) * 0,21}{V_o^{sz} + (L - L_o)}, \quad \text{ahol } V_o^{sz} \text{ az elméletileg keletkező száraz füstgáz térfogata.}$$

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

$$\lambda = 1 + \frac{[O_2 \%]}{21 - [O_2 \%]} * \frac{V_o^{sz}}{L_o}$$

$V_o^{sz}$  és  $L_o$  (valamint az energiamérleghez szükséges, elméletileg keletkező nedves füstgáz térfogata,  $V_o^n$ ) kiszámítható a üzemanyag elemi összetételéből az alábbiak szerint.

A tüzelőanyag 1 kg-ja  $m_C$  kg karbonból,  $m_H$  kg hidrogénből,  $m_S$  kg kénből és  $m_O$  kg oxigénből áll. A karbon, a hidrogén és a kén égéséhez szükséges oxigén térfogatát kiszámíthatjuk, majd ezek összegéből levonjuk a tüzelőanyag oxigén tartalmának megfelelő oxigén térfogatot. Az így nyert oxigén térfogatot átszámítjuk levegő térfogatra:

C	+	O <sub>2</sub>	=	CO <sub>2</sub>
12 kg		22,41 Nm <sup>3</sup>		22,41 Nm <sup>3</sup>
1 kg		22,41 / 12 Nm <sup>3</sup>		22,41 / 12 Nm <sup>3</sup>
$m_C$ kg		(22,41 / 12) * $m_C$ Nm <sup>3</sup>		(22,41 / 12) * $m_C$ Nm <sup>3</sup>
4 H	+	O <sub>2</sub>	=	2 H <sub>2</sub> O
4 kg		22,41 Nm <sup>3</sup>		2 * 22,41 Nm <sup>3</sup>
1 kg		22,41 / 4 Nm <sup>3</sup>		2 * 22,41 / 4 Nm <sup>3</sup>
$m_H$ kg		(22,41 / 4) * $m_H$ Nm <sup>3</sup>		(2 * 22,41 / 4) * $m_H$ Nm <sup>3</sup>
S	+	O <sub>2</sub>	=	SO <sub>2</sub>
32 kg		22,41 Nm <sup>3</sup>		22,41 Nm <sup>3</sup>
1 kg		22,41 / 32 Nm <sup>3</sup>		22,41 / 32 Nm <sup>3</sup>
$m_S$ kg		(22,41 / 32) * $m_S$ Nm <sup>3</sup>		(22,41 / 32) * $m_S$ Nm <sup>3</sup>

Mivel emiatt 32 kg oxigén térfogata 22,41 Nm<sup>3</sup> ,  
 mo kg oxigén térfogata 22,41 \* mo / 32 Nm<sup>3</sup> .

Az elméleti oxigénszükséglet tehát:

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

Az oxigénnel együtt az égésterbe jutó nitrogén elméleti mennyisége:

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

A levegőszükséglet a kettő összege:

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

Az elméleti száraz füstgáz térfogata a levegővel bevitt nitrogén, a szén-dioxid és a kén-dioxid 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 a száraz füstgáz és a vízgőz együttes térfogata:

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

Amennyiben a tüzelőanyagnak is volt víztartalma, az ebből keletkező vízgőz térfogata a fenti képlethez hozzáadandó:

Mivel	1 kg vízgőz mólszáma	1 / 18 kmol,
	ennek térfogata	22,41 * 1 / 18 Nm <sup>3</sup> , emiatt
	$m_{v\acute{z}}$ kg vízgőz térfogata	$m_{v\acute{z}} * 22,41 * 1 / 18 \text{ Nm}^3$ .

Az energiamérleg a mérnöki gyakorlatban használt fogalom. Egy hőegyensúlyban lévő rendszerben az egységnyi idő alatt betáplált (hő)energia és az egységnyi idő alatt kilép (hő)energia megegyezik. Ezen elv alapján számszerűsíthető például, hogy a motorba az üzemanyag fűtőértékével bevitt hőnek hányad része távozik az egyes kimeneteken.

### 1.3. A motorbenzin tulajdonságai

Kompressziótűrés: Ha nem megfelelő, öngyulladás is lejátszódik, nyomáslengés (kopogás) lép fel a motorban, ennek eredményeként teljesítményromlás, mechanikai károsodás következik be.

Az egyes benzinalkító szénhidrogének kompressziótűrése eltérő. A sok elágazást tartalmazó izoparaffinoké és az aromás vegyületeké nagyon jó, a hosszú láncú normál paraffinoké nagyon rossz. A kompressziótűrés mérésére szabványosított motorok szolgálnak, amelyekben rögzített körülmények mellett etalon elegyekkel hasonlítják össze a vizsgálandó motorbenzin kompressziótűrését. Etalonok: n-heptán (0 pont), 2,2,4-trimetil-pentán (azaz az izo-oktánok egyike) (100-as pont).

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.

Illékonyság: Fontos, mert az égés gázfázisú, előzetesen el kell párolognia az üzemanyagnak. Gondot okozhat a nagy és a kicsi illékonyság is. A motorbenzinek forrásponttartománya 40-210°C.

### Összetevők

-ólom tartalom: Régen ólom-tetra-etilt, ill ólom-tetra-metilt adagoltak a benzinhoz a jobb kompressziótűrés érdekében. Az Pb környezetszennyező, a katalizátorokat (ld. később) hatástalanítja. Magyarországon, a fejlett országokhoz hasonlóan nem forgalmazznak ólmozott benzint. Az ólomtartalom legfeljebb 5 mg/l lehet.

-kén tartalom: A kéntartalomtól az égés során SO<sub>2</sub>, részben SO<sub>3</sub>, a jelenlevő vízzel kénessav, kénsav keletkezik, ami korróziót, savas esőt okoz. A kéntartalom limitálandó, ma az Európai Unióban legfeljebb 10 mg/kg lehet.

-szénhidrogének csoportösszetétele: az olefintartalom a megfelelő stabilitás érdekében legfeljebb 18 V/V% lehet. Az aromások égési tulajdonságai kedvezőtlenek, mennyiségük hazánkban max. 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 ún. oxigenátok (alkoholok, éterek, pl. metanol, tercier-butanol, MTBE: metil-tercier-butil-éter) javítják az oktánszámot, adagolásuk egy határon belül előnyös (max. 2,7 m/m%).

Gyantatartalom: A jelenlevő, vagy állás közben kialakuló nagy molekulájú, gyantyszerű anyagok lerakódást, dugulást okozhatnak a keverékképzésnél. A gyantaképzési hajlamot a hőbontással (krakkolással) előállított benzinekben a krakkolásakor keletkező telítetlen kötések, főként diolefinok okozzák. Ezek oxidációs-polimerizációs reakcióiban gyanta képződhet.

Korróziós hatás: Az aktív S vegyületek miatt a motor egyes szerkezeti elemei károsodhatnak.

## 1.4. A motorbenzin előállítása

A kőolaj atmoszférikus desztillációjának terméke, az ún. straight run benzin közvetlenül Otto-motorok hajtására nem alkalmas, elsősorban azért, mert a szénhidrogén összetétele miatt a kísérleti oktánszáma 40-60 körüli érték, a mai motorok pedig 90 fölötti oktánszámú motorbenzint igényelnek, illetve — katalitikus hidrogénezéssel — el kell távolítani a heteroatomokat, pl. a kéntartalmat, és a forrásponttartománya is pontosabban beállítandó. Másrészt mennyisége kisebb, mint a felhasználási igény, míg a nagyobb szénatomszámú, főként maradvány olajok mennyisége az igényeket meghaladja, ezért a nagyobb szénatomszámú szénhidrogének tördelésével, krakkolásával kisebb szénatomszámú frakciókat állítanak elő. A forgalomba hozott motorbenzinek a kőolaj finomító alábbi termékeinek **keverésével**, majd adalékok hozzáadásával állítják elő. A keverés közben több tulajdonság folyamatos mérésével a végső összetételt optimalizálják.

straight run benzin, az említett okok miatt mennyisége legfeljebb 15 % lehet.

i-bután, a göznyomás növelhető vele, jó oktánszám, de növekvő párolgás, tűzveszély, légszennyezés.

reformátum, a reformálás során 100-170 °C-os forráspontú, előzetesen kéntelenített benzinpárlatokat bifunkciós katalizátor (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> hordozón Pt/Re nemesfém) jelenlétében kb. 500 °C-on, 5-10 bar H<sub>2</sub> nyomáson kezelnek (ld. előadás). A lejátszódó folyamatok eredményeként 70-90 %-nyi reformátum (60-70 % aromás tartalom, sok izo-paraffin), C<sub>1</sub>-C<sub>4</sub> gázok és H<sub>2</sub> keletkezik. A reformáló üzemben termelődő hidrogén is értékes termék, azt az egyes termékek

katalitikus kénmentesítésére használják fel. A reformálás a jó oktánszámú motorbenzinek gyártásának kulcsfontosságú folyamata, de a célja lehet aromás vegyületek előállítása is.

krakkbenzin, katalitikus krakkoláskor katalizátor segítségével vákuumpárlatokból kb. 500 °C hőmérsékleten fő termékként 55-60 %-nyi, kb. 95-ös oktánszámú krakkbenzint nyernek. Igen értékes a nagy olefin tartalmú 3-4 szénatomos gáz frakció is, amelyet az alkilezéshez használnak fel. A krakkbenzinek nagy olefintartalmúak lehetnek, különösen a többszörös telítetlen kötések miatt szükség lehet telítő hidrogénezésükre.

izomerizátum, a straight run benzinből nyerhető elágazás nélküli, normális láncú C<sub>5</sub>-C<sub>6</sub> szénhidrogének 300-500 °C hőmérsékleten, Pt/Pd katalizátoron, H<sub>2</sub> nyomás mellett izoparaffinokká alakíthatók, értékes keverőkomponenst nyerve.

alkilátum, az alkilezés erősen savas közegben hajtható végre. Izo-bután és C<sub>3</sub> - C<sub>5</sub> olefinek reakciójában C<sub>7</sub> - C<sub>9</sub> izoparaffinok keletkeznek. A legjobb keverőkomponens, mivel izoparaffinokból áll, de a legdrágább is.

oxigenátok, oxigén-tartalmú vegyületek értékes oktánszám-javító keverőkomponensek, előállításuk gyakran a finomítóban történik.

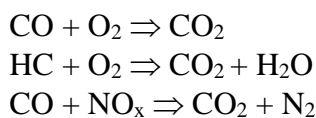
## 1.5. Az Otto-motoros gépjárművek légszennyezése

Az Otto-motoros gépjárművek légszennyezését a motorbenzin párolgása és a kipufogógázok okozzák. A párolgással levegőbe kerülő benzinalkotó szénhidrogének mennyisége jelentősen csökkenthető egyrészt a motorbenzin kémiai összetételének megváltoztatásával, amikor az illékonyt, tehát a gőznyomást csökkentjük, másrészt adszorpcióval, pl. a benzintartály légzővezetékébe épített adszorberekkel, és a tankolás közben a tartályból kiáramló benzingőzökkel telített levegő elszívásával (gázinga), majd azt követően a szénhidrogének adszorpciós kivonásával.

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 NO<sub>2</sub>-t (együttesen NO<sub>x</sub>-t) eredményezve. Másodlagos reakciók eredményeként **fotokémiai szmog** keletkezik, a szénhidrogének és az NO<sub>x</sub> ultraibolya sugárzás hatására peroxid kötésű szerves vegyületeket, és ózont képeznek. A motorbenzin S tartalma kén-dioxidá (SO<sub>2</sub>) ég el. A káros komponensek emberre és környezetre gyakorolt hatását ismertnek tételezzük fel, (ld. előadás).

A kipufogógáz komponensek mennyisége döntően a motorba belépő gázelegy összetételétől, azaz a légviszony tényezőtől függ. A **2. ábra** a kipufogógáz átlagos összetételét mutatja be  $\lambda$  függvényében. (Az ábrán az SO<sub>2</sub> tartalom nem szerepel, azt a benzin kéntartalma szabja meg, csökkentése a benzin kéntelenítésével oldható meg.) Látható, hogy bár elméletileg léghiányban nem maradhatna oxigén, illetve légszennyezésben 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<sub>x</sub> koncentrációja (a  $\lambda \approx 1$ -nél maximumot elérő motortér hőmérséklet és az oxigén-tartalom miatt) kis légszennyezésnél maximum görbét mutat. A szénhidrogének mennyisége  $\lambda$  növekedésével csökken, de 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. 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<sub>2</sub>-dá és vízzé, valamint az NO<sub>x</sub> visszaredukálásával N<sub>2</sub>-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<sub>x</sub>) egyidejű ártalmatlanítására alkalmasak. A lejátszódó sokféle reakció közül a meghatározóak:



A lejátszódó redox (oxidációs és redukációs) reakciókban a szénhidrogének és a CO a redukálószer (amelyek oxidálódnak) és az O<sub>2</sub> és az nitrogén-oxidok az oxidálószer (amelyek redukálódnak). A legkorszerűbb, hármashatású katalizátorok mindhárom káros komponens (CO, NO<sub>x</sub>, HC) egyidejű ártalmatlanítására alkalmasak.

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 katalízisről van szó) a katalizátor felülete befolyásolja.

A légviszony tényezőtől függ ugyanis a kipufogógázban jelenlevő oxidálószer (O<sub>2</sub> és NO<sub>x</sub>) valamint redukálószer (CO és HC) aránya. Meghatározó a CO és az O<sub>2</sub> mennyisége. Léghiányban sok a CO, míg az O<sub>2</sub> kevés. Emiatt a fenti reakciókban a CO csak kis mértékben fogyhat el, míg az NO<sub>x</sub> fogyása jelentős. Légfeleslegben az O<sub>2</sub> 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 **a 3. ábra**. Amint az ábrán is látható, a hatékony működés (nagy konverzió mind az oxidációs, mind a redukációs folyamatokban) szempontjából döntő, hogy a légviszonyt optimalizáljuk, minél pontosabban egy λ~1 környéki 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 katalizátoros** gépkocsikkal elégíthetők ki, így csak ilyenek kerülhetnek forgalomba. (A lambda-szonda nélkül szabályozatlan hármashatású katalizátorról beszélünk.)

Az oxidációs és redukációs folyamatok 300-800 °C hőmérséklettartományban mennek végbe megfelelően nagy sebességgel. Alacsony hőmérsékleten a katalizált reakció sebessége sem nagy, az átalakítás kismértékű. (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 benzinhez (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 (lehetőleg kis mennyiségű) nemesfémeket viszonylag kis térfogatban nagy (15000-20000 m<sup>2</sup>) felületen kell eloszlatni, de ez nem jelenthet nagy áramlási ellenállást, mert ez is a motor hatásfokának romlását okozná. Ezen újabb optimalizálás eredményeként alakult ki a **4. 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  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) réteget, amely az 1-3 tömegszázaléknyi nemesfémeket tartalmazza. A motorbenzinek kompressziótűrésének növelésére a korábban használt ólom-adalékok nem használhatóak, mert az ólom a katalizátort 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. 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.

## 2. Kísérleti rész

A mérés során különböző légviszony értékeket beállítva mérjük egy Otto-motor tisztítatlan és hármashatású katalizátorral tisztított kipufogógázának összetételét, valamint a motor energiamérlegét.

### 2.1. A motor

A gyakorlatot a Kémiai Technológia Tanszék BASF típusú oktánszám meghatározó motorján végezzük, amely álló, egyhengeres, 332 c m<sup>3</sup>-es lökettérfogatú, négyütemű, vízhűtéses Otto-motor. Lendítőkereke egy villamos szinkronmotor ékszíjtárcsájával van kényszerkapcsolatban. A villamos szinkronmotor szolgál az Otto-motor indítására, illetve az égés elindulása után generátorként működve fékezi, állandó fordulatszámon tartja az Otto-motort, és a (fogyasztásmérővel meghatározható) termelt villamos áramot visszatáplálja a hálózatba. A benzinmotor primer, desztillált vízzel működő hűtőkörét egy hőcserélőben csapvízzel hűtjük, a hőcserélőbe belépő csapvíz térfogata vízórával, hőmérsékletemelkedése higanyos hőmérőkkel mérhető.

Az oktánszám méréséhez szabályozható a beszívott levegő vagy keverék hőmérséklete ( $t_{lev.}$ ,  $t_{kev.}$ ), az előgyújtás szöge ( $\alpha$ ) és a fordulatszám ( $n=600$  vagy  $900$  1/min), valamint üzem közben is változtatható a kompresszióviszony ( $\epsilon$ ).

A gyakorlat céljára az teszi alkalmassá e motort, hogy a benzin / levegő keverési arány is szabályozható. A porlasztóba beszívott levegő állandó térfogatáramú, mert állandó a lökettérfogat, a levegő nyomása, hőmérséklete és a motor fordulatszáma. A beporlasztott üzemanyag térfogatárama szabályozható. Az úszóházban elhelyezett tűszelep fel-le mozdítható, ennek segítségével az úszóházban levő üzemanyagoszlop magassága (úszóállás,  $h$  mm), tehát hidrosztatikai nyomása is változtatható. Az úszóállás növelésével a betáplált benzin térfogatárama is nő, így a légviszony csökken, egyre dúsabb a beszívott keverék.

### 2.2. A katalizátor



Műszaki adatai:

típusa: egyágyas, hármashatású  
hatóanyaga: Pt, Pd, Rh  
mérete: 100x100x130 mm  
fajlagos cellasűrűsége: 62 / cm<sup>2</sup>  
fajlagos belső felülete: 18,0 m<sup>2</sup> / cm<sup>3</sup>  
teljes belső felülete: 15.080 m<sup>2</sup>

A katalizátort közvetlenül a motor után helyeztük el a kipufogócsőben. Az elé és mögé iktatott egy-egy közdarab biztosítja a gázmintavételt és a termoelemek illesztését.

## 2.2. A gázelemzők

Az **ECOM-α** automatikus füstgázelemző alkalmas kipufogógázok összetételének meghatározására is. A műszer a beépített szivattyú segítségével 250 l/h gázmintát szív be, majd azt elektrokémiai cellákra (galvánelemekre) vezeti, amelyek a mért gázkomponensre specifikusan, annak mennyiségével arányos villamos jelet állítanak elő.

A műszerrel a következő gázösszetevőket mérjük:

	méréshatár	felbontóképesség
O <sub>2</sub>	20,9 %	0,1 %
NO	3999 ppm	1 ppm
NO <sub>2</sub>	99 ppm	1 ppm
CO	1999 ppm	1 ppm
1. cella		
2. cella	9,99 %	0,01 %

A fentiekén kívül alkalmas a HC és az SO<sub>2</sub> tartalom meghatározására, a gáz- és a szobahőmérséklet valamint a kormozás mérésére is.

A HORIBA cég **MEXA 324 GE** gázelemzője ugyancsak alkalmas a kipufogógáz CO és HC tartalmának mérésére. Működésének alapja az, hogy a heteroatomos gázok az infravörös fény tartományában bizonyos hullámhosszú sugárzást szelektíven nyelnek el. Az elnyelés mértéke arányos az illető komponens koncentrációjával. A készülékkel a HC tartalmat mérjük, méréshatára 0-10000 ppm, felbontóképessége 10 ppm.

## 2.4. A mérés

A gyakorlaton adott, állandó paraméterek ( $\epsilon$ ,  $\eta_{lev.}$ ,  $n$ ,  $\alpha$ ) mellett járattuk a felmelegedett motort, és a porlasztóban változtatva az úszóállást ( $h$ ), tehát  $\lambda$ -t, minden egyes úszóállásnál megvárva az állandósult (stacioner) állapot beálltát feljegyezzük a kipufogógáz összetételét és hőmérsékletét a katalizátor előtt és után, valamint az energiamérleg felvételéhez mérjük a fogyasztásmérővel mért, 0,01 kWh villamos munka hálózatba történő visszatáplálásának idejét, és a csapvíz be- és kilépő hőmérsékletét. A csapvíz térfogatárama a mérés ideje alatt nem változik, meghatározására két, rögzített időpontban leolvassuk a vízóra állását.

A katalizátor előtti füstgáz-hőmérsékletet ( $t_{kat.e.}$ ) az **ECOM-α** műszer termoelemével mérjük, a katalizátor utáni gáz hőmérsékletét ( $t_{kat.u.}$ ) termoelemhez kapcsolt hagyományos analóg leolvasó műszerrel állapítjuk meg.

## 3. A mérési adatok kiértékelése

### 3.1. A légviszonytényező számítása

A gyakorlat céljának elérése érdekében először meg kell határoznunk a légviszony ( $\lambda$ ) értékeit az egyes úszóállásoknál.

**A legnagyobb légfeleslegnél**, azaz a legkisebb úszóállásnál a légviszony értéke az elméleti bevezetőben szereplő, bekeretezett összefüggéssel a motorból kilépő gáz  $O_2$  tartalmából kiszámítható. A többi úszóállásnál azonban már nemcsak a tökéletes égés termékei vannak jelen, a képlet nem alkalmazható. A rövid reakcióidő miatt léghiányban is van oxigén, a képlet ekkor is 1 fölötti  $\lambda$ -t eredményez!

**A többi úszóállásnál** az alábbi összefüggés segítségével számíthatjuk a légviszonyt.

Ha  $\lambda$  definícióját az egységnyi időre vonatkozó levegő térfogatokra írjuk fel (az egységnyi időre vonatkozó mennyiségeket mindig a jel fölötti pont mutatja):

$$\lambda = \frac{\dot{L}}{\dot{L}_o} \quad \text{ahol} \quad \dot{L} : \text{az égéshez ténylegesen beszívott levegő (Nm}^3\text{/h)}$$
$$\dot{L}_o : \text{az elméleti levegőszükséglet (Nm}^3\text{/h).}$$

Ahogy már szóltunk róla,  $\dot{L}$  értéke ebben a motorban állandónak tekinthető, jelöljük  $A_1$  állandóval.

Az evidens, hogy  $\dot{L}_o$  arányos a motor üzemanyag-fogyasztásával:

$$\dot{L}_o = A_2 * \dot{V}_b \quad \text{ahol} \quad A_2 \text{ szintén állandó (Nm}^3 \text{ levegő / dm}^3 \text{ benzin),}$$
$$\dot{V}_b \text{ a motor fogyasztása (dm}^3 \text{ benzin / h)}$$

Korábban végzett fogyasztásmérések azt igazolták, hogy  $\dot{V}_b$  az úszóállás lineáris függvénye:

$$\dot{V}_b = A_3 * h \quad \text{ahol} \quad A_3 \text{ szintén állandó.}$$

A fentiek alapján tehát

$$\lambda = \frac{\dot{L}}{\dot{L}_o} = \frac{A_1}{A_2 * \dot{V}_b} = \frac{A_1}{A_2 * A_3 * h} = \frac{A}{h} \quad \text{ahol}$$

$$A = \frac{A_1}{A_2 * A_3} = \lambda * h \quad \text{szintén állandó (mm), amelynek fizikai tartalma is van, ugyanis ha } \lambda = 1, \text{ akkor } A = h, \text{ azaz } A \text{ éppen a } \lambda = 1\text{-nél aktuális úszóállást adja meg mm-ben.}$$

A értéke meghatározható a legkisebb úszóállásnál a fentiek szerint a maradék oxigén-tartalomból kiszámolt  $\lambda$  és a legkisebb úszóállás szorzataként. A többi, már nem nagy légfelesleget reprezentáló úszóállásokhoz tartozó  $\lambda_i$  értékek pedig a

$$\lambda_i = \frac{A}{h_i} \quad \text{összefüggés segítségével számíthatók ki.}$$

Ezen eljárással tehát a mérés során beállított különböző úszóállások átszámíthatóak a megfelelő légviszony értékekre.

### 3.2. A konverzió számítása

A konverziót a csökkentendő komponensekre valamennyi légviszonynál a következő összefüggéssel számítjuk:

$$\eta = (\text{fogyás a katalizátoron} / \text{eredeti koncentráció}) * 100 \quad (\%)$$

(A CO-ra, és az NO-ra megfelelő a mérés pontossága, a HC-re és NO<sub>2</sub>-re kis mennyiségük miatt nagy hibával terhelt lehet.)

### 3.3. Az energiamérleg számítása

Az energiamérleg felvétele során meghatározzuk, az egyes úszóállásoknál, azaz légviszony értékeknél a motorba időegység alatt bevitt hőt, és a három, általunk mért kimeneten időegység alatt távozó hőt. Az általunk mért kimenetek: az Otto-motor fékezésére szolgáló generátor által termelt villamos teljesítmény, a szekunder hűtővízzel elvitt hőteljesítmény, a füstgázzal elvitt hőteljesítmény.

**Az egységnyi idő alatt betáplált hő** az i-edik úszóállásnál a benzin tömegáramának (egységnyi idő alatt eltüzelt tömegének) és fűtőértékének szorzata:

$$\dot{Q}_{bi} = \dot{m}_{b_i} * F = \dot{V}_{b_i} * \rho_b * F = A_3 * h_i * \rho_b * F$$

ahol  $\rho_b$  a benzin sűrűsége. A képlet kiszámításához a gyakorlaton megadjuk  $A_3$  értékét, a benzin sűrűségét, égéshőjét és párolgáshőjét.

**A hűtővízzel egységnyi idő alatt eltávozó hőmennyiséget** az i-edik úszóállásnál az ismert összefüggés alapján számíthatjuk:

$$\dot{Q}_{víz_i} = \dot{m}_{víz} * c_{víz} * \Delta t_{víz_i} = \dot{V}_{víz} * \rho_{víz} * c_{víz} * \Delta t_{víz_i} = \frac{\Delta V_{víz}}{\tau_{víz}} * \rho_{víz} * c_{víz} * \Delta t_{víz_i}$$

ahol  $\Delta t_{víz_i}$  a csapvíz hőmérséklet-emelkedése,  $c_{víz} = 4,2 \text{ kJ/kgK}$ , a víz fajhője,  $\rho_{víz} = 1000 \text{ kg/m}^3$ , a víz sűrűsége,  $\Delta V_{víz}$  a vízáramlásán mért térfogat-változás,  $\tau_{víz}$  a vízáramlás két leolvasása között eltelt idő.

**A villamos teljesítmény** az i-edik úszóállásnál az adott villamos munka (0,01 kWh) hálózatba táplálásának idejéből  $\tau_{vill_i}$ -ből számítható:

$$\dot{Q}_{vill_i} = \frac{0,01 \text{ kWh}}{\tau_{vill_i}}$$

**A füstgázzal elvitt hőteljesítmény** (a füstgáz veszteség) az i-edik úszóállásnál ugyancsak az ismert összefüggés alapján számítható, de a gázok fajhőjét térfogatra vonatkoztatják:

$$\dot{Q}_{fg_i} = \dot{V}_{fg_i} * c_{fg} * \Delta t_{fg_i} = \dot{m}_{b_i} * V_{fg_i} * c_{fg} * \Delta t_{fg_i}$$

ahol  $\dot{V}_{fg_i}$  az időegység alatt keletkező füstgáz térfogata, számítható a benzin tömegárama ( $\dot{m}_{b_i}$ ), és az egységnyi tömegű benzin elégetésekor keletkező (nedves!) füstgáz térfogata ( $V_{fg_i}$ )

$$\text{szorzataként: } \dot{V}_{fg_i} = \dot{m}_{b_i} * V_{fg_i}$$

$c_{fg}$  a füstgáz fajhője, melyet a gyakorlaton megadunk,

$$\Delta t_{fg_i} = (t_{kat.e.} - t_{lev.}) \text{ értéke mért adat.}$$

$V_{fg_i}$  az alábbi összefüggésekkel közelíthető:

$$\text{légfeleslegnél} \quad V_{fg_i} \approx V_o^n + (L_i - L_o) = V_o^n + L_o * (\lambda_i - 1) \text{ ill.}$$

$$\text{léghiánynál} \quad V_{fg_i} \approx V_o^n$$

A be- és kilépő hőket így teljesítmény dimenzióban számoljuk. Hasznos megállapítások tehetők, ha kiszámoljuk a három kimenő hő és a betáplált hő %-os arányát is minden úszóállásnál:

$$\eta_{víz_i} = \frac{\dot{Q}_{víz_i}}{\dot{Q}_{b_i}} * 100$$

$$\eta_{vill_i} = \frac{\dot{Q}_{vill_i}}{\dot{Q}_{b_i}} * 100$$

$$\eta_{fg_i} = \frac{\dot{Q}_{fg_i}}{\dot{Q}_{b_i}} * 100$$

Ezek összege természetesen nem ad 100 %-ot, mivel a mérés során nem mérünk minden hőkimenetet. Nem ismert a primer hűtővízből a környezetbe távozó hő, a villamos generátor vesztesége, a motor által a környezetnek leadott hő, valamint az ún. elégtelen veszteség, ami a nem tökéletes égés miatt lép fel.

#### 4. A jegyzőkönyv

1. Rövid elméleti bevezető (nem a jegyzet kimásolása)
2. A mérés célja, tárgya
3. A használt berendezések kapcsolási rajza
4. A mérési adatok táblázata
5. Számítások
  - az egyes úszóállásokhoz tartozó  $\lambda$  értékek a fentiek szerint
  - konverziók az egyes  $\lambda$  értékeknél
  - a betáplált, és a három mért kimeneten távozó hőteljesítmény abszolút értéke valamint a három kimenő hőteljesítmény a bemenő hőteljesítmény %-ában
6. Összefoglaló táblázat a számítások eredményéről
7. Diagramok
  - gázösszetétel  $\lambda$  függvényében katalizátor előtt és után (az y tengelyen többféle lépték szükséges!)
  - konverziók és gázhőmérsékletek  $\lambda$  függvényében
  - a kimenő hőteljesítmények abszolút értéke  $\lambda$  függvényében
  - a kimenő hőteljesítmények bemenetre vetített %-a  $\lambda$  függvényében
8. Értékelés, a motor működésének optimuma

#### 5. Ellenőrző kérdések

Sorolja fel a motorbenzinek tulajdonságait!  
Hogyan állítják elő a motorbenzineket?  
Mi a katalízis, heterogén katalízis?

Milyen komponenseket, milyen koncentráció tartományban tartalmaz az Otto-motor kipufogógáza?

Melyek okoznak ezek közül légszennyezést?

A légviszony definíciója és kiszámítása

Mekkora  $L_0$  értéke oktánra?

Mekkora  $\lambda$  értéke, ha oktán levegővel történő égetése esetén a száraz füstgáz tartalma 2 % ?

oxigén

Az égéshő és a fűtőérték definíciója

Hogyan változik a kipufogógáz összetétele a légviszony függvényében?

Hogyan változik a kipufogógáz  $CO_2$  tartalma a légviszony függvényében?

Írjuk fel a hármashatású katalizátoron lejátszódó kémiai reakciókat!

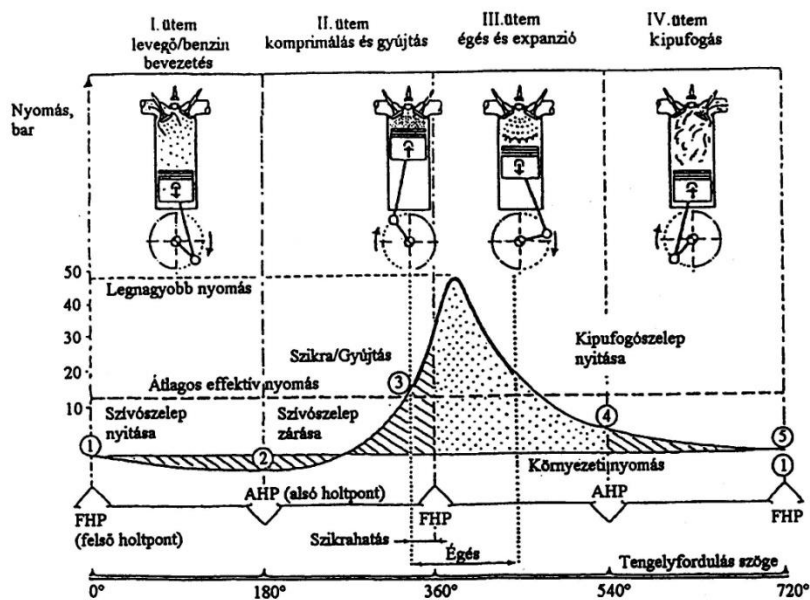
Mi a konverzió, milyen paraméterek és hogyan befolyásolják az értékét?

Hogyan változik az elméleti konverzió a légviszony függvényében?

A hármashatású katalizátor hatóanyagai és szerkezete

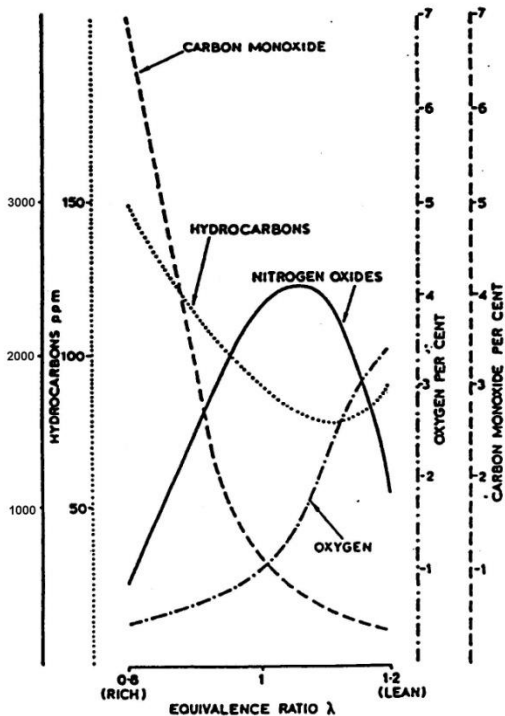
Melyek a mérés közben állandó motorikus paraméterek?

Milyen, általunk nem mért módon távozik még hő a motorból?

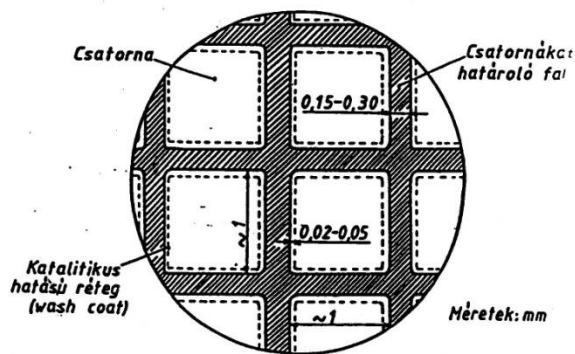


1. ábra

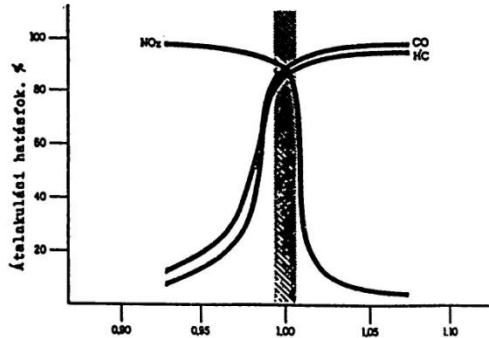
A négyütemű Otto-motor működési elve



2. ábra Otto-motor átlagos kipufogógáz-összetétele a légviszony függvényében



4. ábra Kerámia vázas katalizátor keresztmetszete



3. ábra A CO, HC és NO<sub>x</sub> átalakítási hatásfokának változása a légviszony függvényében ideális esetben