

**BME Vegyészmérnöki és Biomérnöki Kar
Kémiai és Környezeti Folyamatmérnöki Tanszék**

Műszaki kémia (BMEVEKTAKO1)

Levegő és vízvédelem (BMEVEKTA604)

Szénhidrogénipari technológia és katalízis (BMEVEKFA503)

**Otto-motor
(Kipufogógáz vizsgálat, energiamérleg)**

2022

**dr.Szabó Mihály, dr.Vida László
BME Vegyészmérnöki és Biomérnöki Kar
Kémiai és Környezeti Folyamatmérnöki Tanszék**

1. Elméleti összefoglaló

Az Otto-motor működését, a tüzeléstechnika alapfogalmait, a motorbenzinek tulajdonságait és előállítását részletesen az előadási anyag tartalmazza, azokat csak vázlatosan foglaljuk össze.

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:

	Otto	Diesel
keverékképzés	külső	belső
szabályozás	mennyiségi	minőségi
λ (légvizony)	≈ 1 , \approx állandó	mindig >1 , változó
gyújtás	szikra	öngyulladás
sűrítési viszony	≈ 10	15-22
sűrítési csúcsnyomás	10-15 bar	30-55 bar
sűrítési csúcshőm.	400-500 °C	600-900 °C
előgyújtás	5-30°	—
befecskendezés	—	10-25°
égési csúcsnyomás	40-70 bar	60-100 bar
égési csúcshőmérséklet	2000-2500 °C	1800-2100 °C
középnnyomás	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 sűrítési viszony, vagy kompresszió viszony (ϵ) 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 fordulatszámja aljáraton 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** (É) 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 Nm³-t, azaz normál állapotú, (0 °C-os és 101,325 kPa nyomású) gáz 1 m³-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 víz gőzként távozik, azaz az égéstermék lehűlése során a víz párolgáshője nem szabadul fel.

Az égéshő mérésével (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, (ez motorhajtóanyagoknál nem fordulhat elő) akkor $R = L_p * (9 * m_H + m_{viz})$, ahol m_{viz} jelöli a tüzelőanyag eredeti nedvesség-tartalmát kg víz/kg tüzelőanyag egységben.

A koncentrációval analóg fogalom a tüzeléstechnikában a légfelesleg tényező (n), Otto-motorok esetén (ahol léghiány is előfordulhat) a **légviszony** (λ).

Definíciójuk azonos:

$$\lambda = \frac{L}{L_o} \quad \text{ahol} \quad L \text{ az égéshez ténylegesen beszívott levegő mennyisége,} \\ L_o \text{ az elméleti levegőszükséglet.}$$

L és L_o mértékegysége megegyezik, mindkét levegő mennyiség (pl. térfogat, vagy tömeg) vonatkozhat egységnyi mennyiségű tüzelőanyagra, vagy egységnyi időre, azaz lehet pl. Nm³ levegő / kg tüzelőanyag, vagy Nm³ levegő / h, tehát λ dimenzió-mentes viszonyszám. $\lambda > 1$ esetén légfelesleg (szegény keverék), $\lambda < 1$ esetén léghiány (dús keverék) van a reakciótérben.

A légfelesleg tényező, illetve a légviszony értékét a gyakorlatban a füstgáz (maradék) oxigén tartalmából, vagy a szén-dioxid tartalmából határozzák meg. **Nagy légfeleslegnél**, ahol a tökéletlen égés miatti térfogatváltozás elhanyagolható, (a füstgáz maradék O₂ koncentrációja legalább 2 %), az égéstérből (motorból) kilépő (száraz) gáz O₂ tartalmából sztöchiometriai számítások segítségével λ az alábbiak szerint kiszámítható:

A füstgáz (fg) maradék O₂-koncentrációja

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

1 kg tüzelőanyagra felírva:

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

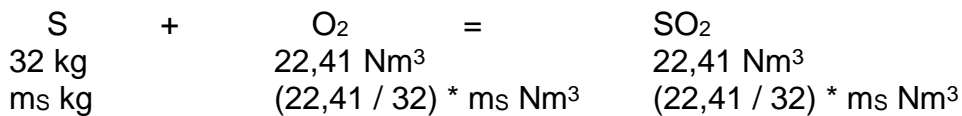
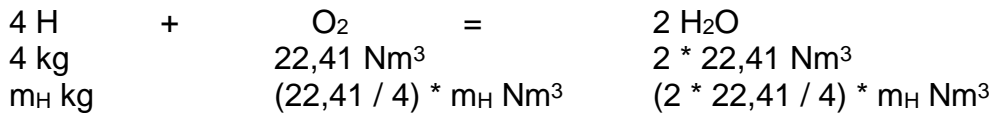
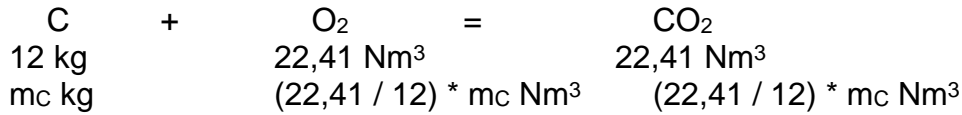
$L = L_o * \lambda$ behelyettesítésével és λ -ra rendezve:

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

Az elméleti levegőszükséglet, az elméletileg keletkező száraz és nedves füstgáz térfogata:

L_o , V_o^{SZ} és 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:



Mivel 32 kg oxigén térfogata 22,41 Nm³,
emiatt m_O kg oxigén térfogata $22,41 * m_O / 32$ Nm³.

Az elméletileg szükséges oxigén térfogata 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 égéstérbe jutó nitrogén elméleti mennyisége 79/21-szer ennyi:

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

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. Összeadás és rendezés után:

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

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 ³ , emiatt
$m_{\text{víz}}$ kg vízgőz térfogata	$m_{\text{víz}} * 22,41 * 1 / 18 \text{ Nm}^3$.

Az energiamérleg a mérnöki gyakorlatban használt fogalom. Egy hőegyensúlyban lévő rendszerben az egységnyi idő alatt betáplált (hő)energia és az egységnyi idő alatt kilépő (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

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

Az egyes benzinalkotó szénhidrogének kompresszió tűrése eltérő. A sok elágazást tartalmazó izo-paraffinoké és az aromás vegyületeké nagyon jó, a hosszú láncú normál paraffinoké nagyon rossz. A kompresszió tűrés mérésére szabványosított motorok szolgálnak, amelyekben rögzített körülmények mellett etalon elegyekkel hasonlítják össze a vizsgálandó motorbenzin kompresszió tűrését. Etalonok: n-heptán (0 pont), 2,2,4-trimetilpentán (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 kompresszió tűrésűnek 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 40-200°C.

Összetevők:

- ólom tartalom: Régen ólom-tetra-etilt, ill. ólom-tetra-metilt adagoltak a benzinhez a jobb kompresszió tűrés érdekében. Az Pb környezetszennyező, a katalizátorokat (ld. később) hatástalanítja, Magyarországon, a fejlett országokhoz hasonlóan 2000 óta nem forgalmazznak ólmozott benzint. Az ólomtartalom legfeljebb 5 mg/l lehet.

- kén tartalom: A kéntartalomból az égés során SO₂, részben SO₃, a jelenlevő vízzel kénessav, kénsav keletkezik, ami korróziót, savas esőt okoz. A kéntartalom limitálandó, a magyar motorbenzinek 10 mg/kg alatti kéntartalmúak.

- 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.

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

- oxigén tartalom: Az ún. oxigenátok (alkoholok, éterek, pl. (bio)etanol, tercier-butanol, MTBE: metil-tercier-butyl-éter, ETBE: etil-tercier-butyl-éter) javítják az oktánszámot, adagolásuk egy határon belül előnyös (max. 2,7 m/m%, vagy az E10-es motorbenzinnél 3,7 m/m%).

Gyantatartalom: A jelenlevő, vagy állás közben kialakuló nagy molekulájú, gyantaszerű anyagok lerakódást, dugulást okozhatnak a keverékképzésnél. A gyantaképzési hajlamot a hőbontással (krakkolással) előállított benzinekben a krakkoláskor keletkező telítetlen kötések, főként diolefinek 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 az oktánszáma alacsony, 60-70 körüli érték, a mai motorok pedig 90 fölötti oktánszámú motorbenzint igényelnek, illetve — katalitikus hidrogénezéssel — el kell távolítani a heteroatomokat, pl. a kén-tartalmat, és a forrásponttartománya is pontosabban beállítandó. Másrészt mennyisége kisebb, mint a felhasználási igény, míg a nagyobb szénatom számú, főként maradvány olajok mennyisége az igényeket meghaladja, ezért a nagyobb szénatom számú szénhidrogének tördelésével, krakkolásával kisebb szénatom számú frakciókat állítanak elő. A forgalomba hozott motorbenzineket 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 a bekevert mennyisége nagyon kicsi lehet.

reformátum: A reformálás során előzetesen kéntelenített benzinpárlatokat katalizátor ($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ hordozón Pt/Re nemesfém) jelenlétében kb. 500 °C-on, 5-10 bar H_2 nyomáson kezelnek (ld. előadás). A lejátszódó folyamatok eredményeként reformátum (aromás vegyületekben és izoparaffinokban gazdag termék), egy-négy szénatomos gázok és H_2 keletkezik. A reformálás a jó oktánszámú motorbenzinek gyártásának kulcsfontosságú folyamata.

krakkbenzin: Katalitikus krakkoláskor katalizátor segítségével nagy szénatom számú szénhidrogének kb. 500 °C-on végzett tördelésével 90-esnél jobb oktánszámú krakkbenzint nyernek. Igen értékes a nagy olefin tartalmú három-négy szénatomos gáz frakció is, amelyet az alkilezéshez használnak fel.

izomerizátum: A straight run benzinből nyerhető elágazás nélküli, normális láncú négy-hat szénatomos szénhidrogének 300-500 °C hőmérsékleten, Pt/Pd (platina/palládium) nemesfém katalizátoron, H_2 nyomás mellett izoparaffinokká alakíthatók, értékes keverőkomponenst nyerve.

alkilátum: Az alkilezés erősen savas közegben hajtható végre. Izo-bután és három-öt szénatomos olefinek reakciójában hét-kilenc szénatomos izoparaffinok keletkeznek. A legjobb keverőkomponens, mivel izo-paraffinokból áll, de a legdrágább is.

oxigénátok: Oxigén-tartalmú vegyületek (alkoholok, éterek) értékes oktánszám-javító keverőkomponensek, előállításuk gyakran a finomítóban történik.

1.5. Az Otto-motoros gépjárművek légszennyezése

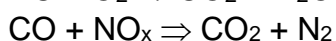
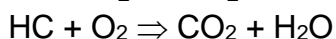
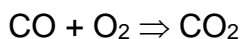
Az Otto-motoros gépjárművek légszennyezését a motorbenzin párolgása és a kipufogógázok okozzák. A párolgással levegőbe kerülő benzinalkotó szénhidrogének mennyisége jelentősen csökkenthető egyrészt a motorbenzin kémiai összetételének (és így illékonyságának) a csökkentésével, másrészt adszorpcióval (nagyfelületű anyagon történő megkötéssel), pl. a benzintartály légző-vezetékébe épített adszorberekkel, és a tankolás közben a tartályból kiáramló benzingőzökkel telített levegő elszívásával (gázinga), majd azt követően a szénhidrogének adszorpciók 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. Mind ezekre 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 még légszerűségben is többé-kevésbé 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 ismertnek tételezzük fel, (ld. előadás).

A kipufogógáz komponensek mennyisége döntően a motorba belépő gázelegy összetételétől, azaz a légviszonytól függ. A **2. ábra** a kipufogógáz átlagos összetételét mutatja be λ függvényében. (Az ábrán az **SO₂** tartalom nem szerepel, azt a benzin kéntartalma szabja meg, csökkentése a benzin kéntelenítésével oldható meg.) Látható, hogy bár elméletileg léghiányban nem maradhatna oxigén, illetve légszerűségben nem keletkezhetne **CO**, a kis reakcióidő miatt 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 az oxigén-tartalom miatt) kis légszerűségben maximum görbét mutat. A szénhidrogének mennyisége λ 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. Mint ismert, a termodinamikailag végbemehető, de (a motorban) kinetikailag gátolt folyamatok lejátszódását katalizátorral gyorsíthatjuk. Esetünkben ezt egy (második, csőtípusú) kémiai reaktorban végezhetjük, amelyre rávezetjük a motorból távozó gázt. Az ártalmatlanítás történhet a **HC**-k és **CO** oxidációjával **CO₂**-dá és vízzé, valamint az **NO_x** visszaredukálásával **N₂**-né. Az oxidációs folyamatot platina (**Pt**) és palládium (**Pd**) tartalmú katalizátorok gyorsítják, míg a redukció leghatékonyabb katalizátora a ródium (**Rh**). Ebben az esetben tehát heterogén katalizátorról van szó, amikor a katalizátor és a lejátszódó reakciók más fázisban (halmazállapotban) vannak. A kipufogógáz-tisztító katalizátor szilárd, amelynek a felületén lejátszódó sokféle reakció közül a meghatározóak:



A lejátszódó redox (oxidációs és redukációs) reakciókban a szénhidrogének és a **CO** a redukáló szerek (amelyek oxidálódnak) és az **O₂** és a nitrogén-oxidok az oxidálószer (amelyek redukálódnak). A legkorszerűbb, hármashatású katalizátorok mindhárom káros komponens (**CO**, **HC**, **NO_x**) egyidejű ártalmatlanítására alkalmasak.

A lejátszódó kémiai reakciók mértékét (a tisztítás hatásfokát) az egyes ártalmatlanítandó komponensek fogyásának mértékével jellemezhetjük. A katalizátor (átalakítási) hatásfokát

az egyes komponensekre (a CO-ra, a szénhidrogénekre és a nitrogén-oxidokra) vonatkozó **konverzió** jellemzi, amely a komponens fogyása a katalizátoron, osztva az eredeti koncentrációval. Pl. a CO konverziója:

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

értelemszerűen a fogyás a katalizátoron a katalizátor előtti és utáni CO koncentráció különbsége, az eredeti CO koncentráció pedig a katalizátor előtti.

Vizsgáljuk meg, milyen paraméterek befolyásolják a konverzió értékét! A konverziót alapvetően a légviszony, a hőmérséklet és (mivel a katalizátor szilárd, a lejátszódó reakciók gáz fázisúak) a katalizátor felülete befolyásolja.

A légviszonytól függ ugyanis a kipufogógázban jelenlevő oxidálószer (O₂ és NO_x) valamint redukáló szer (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 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 $\lambda \sim 1$ 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 befecskendezett üzemanyag mennyiségét. 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 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 benzinhez (egyébként az oktánszám növelése érdekében is) adagolt oxigén-tartalmú 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 m²) 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 γ -Al₂O₃) réteget, amely az 1-3 tömegszázaléknyi nemesfémeket tartalmazza.

A motorbenzinek kompresszió tőrésének növelésére a korábban használt ólom-adalékok nem használhatók, 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 gyakorlat célja: Otto-motorban különböző paraméterek hatásának vizsgálata **egyrészt** a kipufogógáz összetételére és adott hármashatású katalizátor átalakítási (tisztítási) hatásfokára, **másrészt** a motor energiamérlegére.

2.1. A légviszony hatásának vizsgálata

A gyakorlat során a tanszék oktánszám meghatározó motorján korábban végzett mérések kiértékelése történik. Vizsgáljuk a különböző légviszony értékekhez tartozó tisztítatlan és hármashatású katalizátorral tisztított kipufogógáz összetételeket és a tisztítás hatásfokát.

A motor

A BASF típusú oktán-motor álló, egyhengeres, 332 cm³-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. Az oktánszám méréséhez szükséges, hogy szabályozható legyen a beszívott levegő vagy (a porlasztó utáni benzin-levegő) keverék hőmérséklete ($t_{lev.}$, $t_{kev.}$), az előgyújtás szöge (α) és a fordulatszám ($n=600$ vagy 900 1/min), valamint üzem közben is változtatható a kompresszió-viszony (ϵ).

A gyakorlat céljára az teszi alkalmassá e motort, hogy a benzin / levegő keverési arány is szabályozható. A porlasztóba időegység alatt beszívott levegő mennyisége állandó, mert állandó a lökettérfogat, a levegő nyomása, hőmérséklete és a motor fordulatszáma. Az időegység alatt beporlasztott üzemanyag mennyisége 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 lineárisan nő, így a légviszony csökken, egyre dúsabb a beszívott keverék.

A katalizátor

Műszaki adatai:

típusa: egyágvas, hármashatású

hatóanyaga: Pt, Pd, Rh

mérete: 100x100x130 mm

fajlagos cellasűrűsége: 62 / cm²

fajlagos belső felülete: 18,0 m² / cm³

teljes belső felülete: 15.080 m²

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

A mérés

A (korábbi) gyakorlaton adott, állandó kompresszió-viszony, levegőhőmérséklet, fordulatszám és előgyújtási szög (ϵ , $t_{lev.}$, n , α) mellett járatták a motort, és a porlasztóban változtatva az úszóállást (h), tehát λ -t, minden egyes úszóállásnál megvárva az állandósult (stacioner) állapot beálltát feljegyezték a kipufogógáz összetételét és hőmérsékletét a katalizátor előtt és után. A gyakorlaton ilyen mérés eredményeként kapott adatokat értékelünk ki.

2.2. A terhelés hatásának vizsgálata

A gyakorlat során a tanszék Otto-motoros villamos generátorán (aggregátorán) különböző villamos terhelések mellett felvesszük a motor energiamérlegét.

A berendezés

Az aggregátor egy kéthengeres, 359 cm³-es lökettérfogatú, négyütemű, vízhűtéses Otto-motor, amely egy vele közös tengelyen futó villamos generátort hajt meg. (A berendezés célja villamos energia biztosítása olyan helyeken, ahol nincs hálózat, illetve a hálózat kimaradása nem engedhető meg.) A motor fordulatszáma a villamos frekvencia miatt állandó (3000 1/min), a motor kompresszió viszonya 8,5:1. A motorban felmelegedett, (vízórával és stopperrel mérhető térfogatáramú) hűtőfolyadék egy ventilátorral hűtött hőcserélőben hűl vissza, de magát a motort is hűti egy, a közös tengellyel meghajtott ventilátor. A motor üzemanyag szivattyúja által beszívott üzemanyag térfogatárama mérőhengerrel és stopperrel követhető. A kipufogógáz egy, a 2.1. fejezetben leírtak megfelelő hármashatású katalizátoron és kipufogódobon áthaladva, ventilátorral megszívott kéményen keresztül hagyja el a helyiséget. A hőcserélőbe belépő, és onnan távozó hűtőfolyadék hőmérséklete, valamint a motorból kilépő és a katalizátort elhagyó füstgáz hőmérséklete ellenállás-hőmérővel mérhető. A katalizátor előtt és után lehetőség van a kipufogógázból mintát venni, és azt gázelemzőre vezetni. Ezt a mérésen nem tesszük, mert az aggregátor állandó, 1 körüli légiszonnyal működik.

A belsőégésű motor által meghajtott generátorban termelődő villamos áramot 2 db, 1 és 2 kW-os névleges teljesítményre kapcsolható olajradiátorra, valamint 2x400 W névleges teljesítményű hőszugárzóra vezethetjük. A bekapcsolt fűtőtestekkel szabályozott, megtermelt villamos teljesítmény mérhető.

A gázelemző

A készülék alkalmas benzin- és dízelüzemű gépkocsik káros anyag kibocsátásának, és egyéb motorikus paramétereknek (fordulatszám, olajhőmérséklet, zárásszög stb.) a vizsgálatára. A gázelemző modul méri a CO₂, a CO, a HC, az O₂ és a NO tartalmat, valamint (az elméleti bevezetőben leírtánál bonyolultabb képlettel) számítja a légviszonyt. A gázkomponensek mérése többek között elektrokémiai cellákkal, illetve infravörös sugárzás elnyelésével történhet. Az elektrokémiai cellák (galvánelemek) az adott gázkomponensre szelektív elektrokémiai reakciók segítségével, annak mennyiségétől függő villamos jelet állítanak elő. Az infra-cellák működésének alapja, hogy a heteroatomos gázok az infravörös fény tartományában bizonyos hullámhosszú sugárzást szelektíven nyelnek el. Az elnyelés mértéke arányos az illető komponens koncentrációjával.

A mérés

A gyakorlaton mérhetjük a terheletlen, illetve az 1 - 4 kW-os teljesítménnyel terhelt, állandósult állapotba került berendezésben (stopperrel és a vízórával) a hűtőfolyadék térfogatáramát, a hűtőfolyadék hőcserélő előtti és utáni hőmérsékletét, a kipufogógáz

katalizátor előtti és utáni hőmérsékletét, a leadott villamos teljesítményt, (stopperrel és a mérőhengerrel) az üzemanyag-fogyasztást.

3. A mérési adatok kiértékelése

3.1. A légviszony hatásának értékelése

A 2.1. gyakorlat céljának elérése érdekében először meg kell határoznunk a légviszony (λ) értékeket az egyes úszóállásoknál.

Ha λ definícióját az egységnyi időre vonatkozó levegő mennyiségekre írjuk fel (az egységnyi időre vonatkozó mennyiségeket mindig a jel fölötti pont mutatja):

$$\lambda = \frac{\dot{L}}{\dot{L}_o} \quad \text{ahol}$$

\dot{L} : az égéshez időegység alatt ténylegesen beszívott levegő mennyisége (pl. kg/óra)

\dot{L}_o : az időegység alatt elégetett motorbenzin elméleti levegőszükséglete (pl. kg/óra).

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:

$$\dot{L}_o = A_2 \cdot \dot{V}_b \quad \text{ahol} \quad A_2 \text{ szintén állandó (kg levegő / dm}^3 \text{ benzin),}$$

$$\dot{V}_b \text{ a motor fogyasztása (dm}^3 \text{ benzin / óra)}$$

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

$$\dot{V}_b = A_3 \cdot h \quad \text{ahol} \quad A_3 \text{ szintén állandó (dm}^3 \text{ benzin / (óra} \cdot \text{mm))}.$$

A fentiek alapján tehát

$$\lambda = \frac{\dot{L}}{\dot{L}_o} = \frac{A_1}{A_2 \cdot \dot{V}_b} = \frac{A_1}{A_2 \cdot A_3 \cdot h}$$

A három állandót egy állandóba összevonhatjuk: $A = \frac{A_1}{A_2 \cdot A_3}$

Ezzel a légviszony képlet: $\lambda = \frac{A}{h}$ ahol

az **A** egyesített állandó mértékegysége (mivel a légviszony dimenzió mentes) szintén (mm), és amelynek fizikai tartalma is van, ugyanis ha

$\lambda = 1$, akkor $A = h$, azaz az **A** állandó éppen a $\lambda = 1$ -nél aktuális úszóállást adja meg.

Az aktuális mérésnél **A** konkrét értéke természetesen számos tényezőtől függ, (pl. a beszívott levegő hőmérsékletétől, nyomásától, oxigén tartalmától, a benzin sűrűségétől, összetételétől), de tapasztalataink szerint kb. 46 mm. Ezért, ha a mérésnél 46 mm alatti és

feletti úszóállásokat is beállítunk, akkor légfeszültséget és léghiányt is előidézhetünk a motorban.

A beállított úszóállásoknál a légviszony értékét az alábbi megfontolással számíthatjuk:

A legkisebb úszóállásnál, azaz a **legnagyobb légviszonynál**, (ahol a maradék oxigén koncentrációja legalább 2 %, és a CO csak néhány száz ppm), a tökéletes égés feltételezésével a légviszony értéke az elméleti bevezetőben szereplő, bekeretezett összefüggéssel a motorból kilépő gáz O_2 tartalmából kiszámítható. Előtte természetesen a motorbenzin megkapott elemi összetételéből az L_o , és V_o^{SZ} is kiszámolandó.

A **többi légviszonynál** (úszóállásnál) azonban már nemcsak a tökéletes égés termékei vannak jelen, a képlet nem alkalmazható. Mint bemutattuk, a rövid reakcióidő miatt léghiányban is van oxigén, és a képlet ekkor is 1 fölötti λ - t eredményez!

A legkisebb úszóállásnál meghatározott légviszony segítségével viszont az **A** állandó értékét megkaphatjuk az

$$A = \lambda_{legnagyobb} * h_{legkisebb} \quad \text{összefüggés segítségével.}$$

A többi légviszony pedig rendre a

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

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

A konverzió számítása

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

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

Az összefüggések értékelése

A kiértékeléshez készítsünk két diagramot! Az egyikben ábrázoljuk a légviszony függvényében a tisztítatlan és tisztított gáz összetételét, azaz az egyes komponensek koncentrációját. (Figyelem, az egyes komponensek nagyságrendje különböző, több y tengely szükséges!) A másik diagramban ábrázoljuk a légviszony függvényében a CO és a NO konverzióját, valamint a katalizátor előtti és utáni hőmérsékleteket!

Értékeljük a tisztítatlan és tisztított gáz összetételének, és a konverzióknak az alakulását a légviszony függvényében, magyarázzuk meg a görbék alakját!

3.2. A terhelés hatásának értékelése

Az energiamérleg felvétele során meghatározzuk, az egyes terheléseknél a motorba időegység alatt bevitt hőt, és a három, általunk mért kimeneten időegység alatt távozó hőt.

Az általunk mért kimenetek: a generátor által termelt villamos teljesítmény, a hűtőfolyadékkal elvitt hőteljesítmény, a füstgázzal elvitt hőteljesítmény.

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

$$\dot{Q}_{b_i} = \dot{m}_{b_i} * F = \dot{V}_{b_i} * \rho_b * F = \frac{\Delta V_{b_i}}{\tau_b} * \rho_b * F$$

ahol ρ_b a benzin sűrűsége, \dot{V}_{b_i} a benzin térfogatárama, ami kiszámítható az elfogyasztott benzin térfogata (ΔV_b) és az ehhez tartozó idő (τ_b) hányadosaként. A képlet kiszámításához a gyakorlaton megadjuk a benzin sűrűségét, égéshőjét és a víz párolgáshőjét.

A hűtővízzel egységnyi idő alatt eltávozó hőmennyiséget az ismert összefüggés alapján számíthatjuk:

$$\dot{Q}_{v_{iz_i}} = \dot{m}_{v_{iz}} * c_{v_{iz}} * \Delta t_{v_{iz_i}} = \dot{V}_{v_{iz}} * \rho_{v_{iz}} * c_{v_{iz}} * \Delta t_{v_{iz_i}} = \frac{\Delta V_{v_{iz}}}{\tau_{v_{iz}}} * \rho_{v_{iz}} * c_{v_{iz}} * \Delta t_{v_{iz_i}}$$

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

A villamos teljesítmény az i -edik terhelésnél közvetlenül mért villamos teljesítmény (\dot{Q}_{vill_i}).

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

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

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

(nedves!) füstgáz térfogata ($V_{f_{gi}}$) szorzataként: $\dot{V}_{f_{gi}} = \dot{m}_{b_i} * V_{f_{gi}}$

$c_{f_{gi}}$ a füstgáz fajhője, melyet a gyakorlaton megadjuk,

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

$V_{f_{gi}}$ az alábbi összefüggésekkel közelíthető:

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

1-es légviszonynál és léghiánynál $V_{f_{gi}} \approx V_o^n$

Mint említettük, az aggregátor kb. 1-es légviszonnyal üzemel.

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 terhelésnél:

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

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

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

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

A mért adatok alapján állapítsuk meg a terhelés függvényében hogyan alakul az egyes kimeneteken távozó hők aránya.

A berendezésben lehetőség van a katalizátor kiiktatására is egy megkerülő vezeték (by pass) segítségével. Végezhető mérés úgy is, hogy azonos villamos terhelés mellett a kipufogógázt először a katalizátoron vezetjük át, majd a katalizátort kiiktatjuk, és a két mérésnél felvett energiamérlegek összehasonlításával a katalizátor ellenállására, (hatásfok rontó hatására) következtethetünk.

4. Ellenőrző kérdések

Beugró kérdések a méréshez:

Mi a katalízis, heterogén katalízis?

A légviszony definíciója és kiszámítása

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

Melyek okoznak ezek közül légszennyezést?

Az égéshő és a fűtőérték definíciója

Írjuk fel a hármashatású katalizátoron lejátszódó kémiai reakciókat!

Mi a konverzió, milyen paraméterek befolyásolják az értékét?

Milyen kimenő hőteljesítményeket mérünk az energiamérleg felvételekor?

Kérdések a számítások után:

Sorolja fel a motorbenzinek tulajdonságait!

Hogyan állítják elő a motorbenzineket?

Mekkora L_o , V_o^{sz} és V_o^n értéke oktánra?

Mekkora λ értéke, ha oktán levegővel történő égetése esetén a száraz füstgáz oxigén tartalma 2 % ?

Hogyan változik a kipufogógáz összetétele a légviszony függvényében?

Hogyan változik a kipufogógáz CO₂ tartalma a légviszony függvényében?

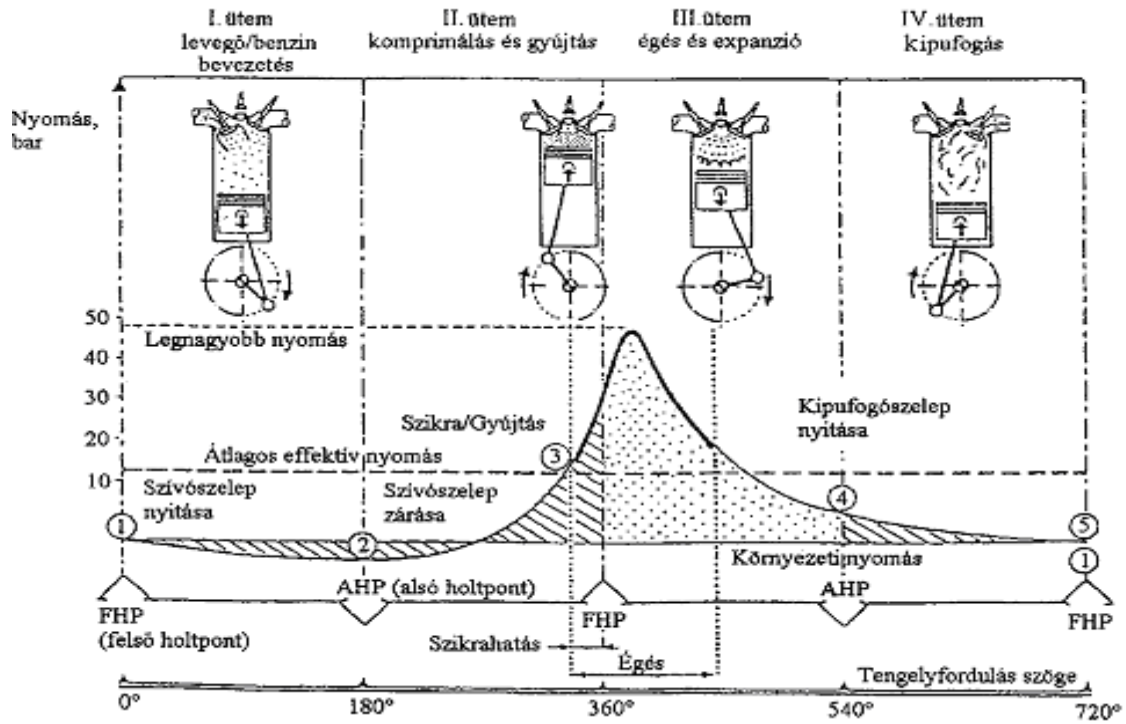
Hogyan változik az elméleti konverzió a légviszony függvényében?

A hármashatású katalizátor hatóanyagai és szerkezete

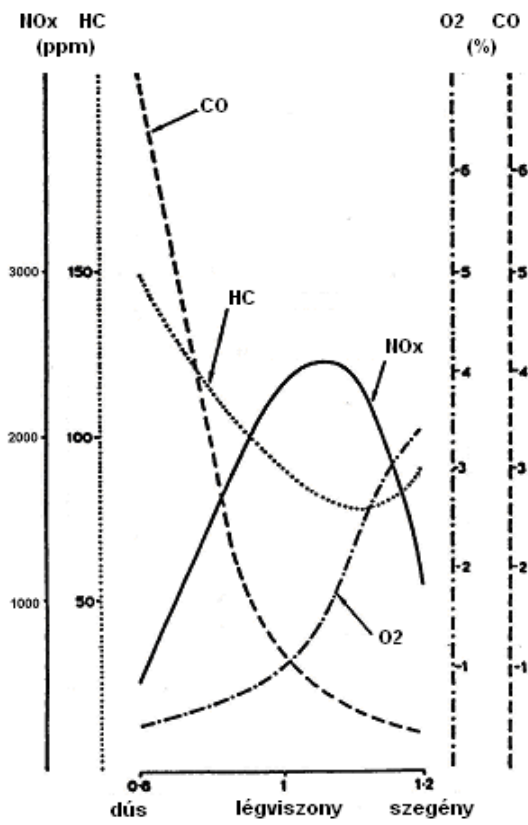
Milyen, általunk nem mért módon távozik még hő a motorból?

Milyen paraméterek, hogyan befolyásolják a konverzió értékét?

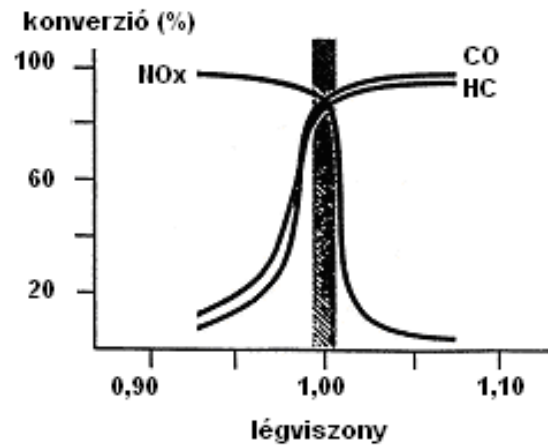
Kapott mérési adatok kiértékelése



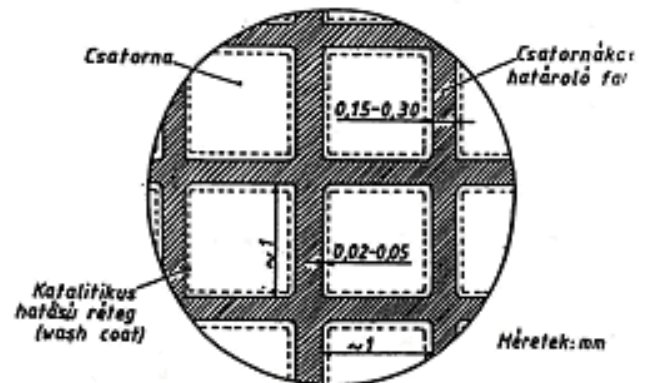
1. ábra A négyütemű Otto motor működési elve



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



3. ábra A CO, HC és NO_x átalakítási hatásfokának változása ideális esetben



4. ábra Kerámia vázas katalizátor szerkezete nagyítva