

Járművek és motorok hő- és áramlástanai rendszerei

5. Előadás Az égés folyamatai

Égés előkészítése

Az égési folyamat előkészítő fázisai:

- keverékképzés,
- gyújtás.

Otto-motor

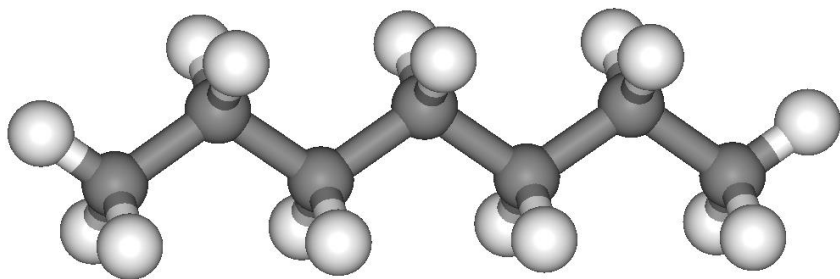
Benzin

- Nyers, természetes kőolajból desztillálás útján kapott folyadék.
- Nem egységes vegyület, hanem sokféle telített és telítetlen szénhidrogén elegye.
- **Forráspontja** 60 és 200 °C közé esik.
- **Gőznyomása** nyáron 70 kPa, télen 90 kPa.
- **Sűrűsége** 0.720 – 0.775 g/cm³.
- **Lobbanáspont:** -40 °C
- **Öngyulladás:** 250 -260 °C

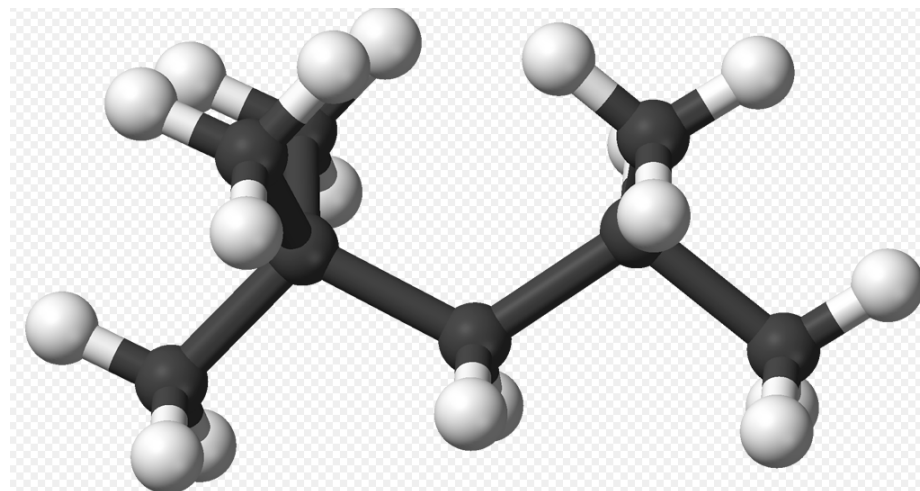
Benzin

Oktánszám: kompressziótűrés, öngyulladással szembeni ellenállás.

A benzin kompressziótűrését egy olyan keverékkel hasonlítják össze, melyet a heptán (7-es szénatomszámú lánc), és az izooktán (8-as szénatomszámú lánc) keverésével állítanak elő.



Heptán



Izooktán (2,2,4 trimetil pentán)

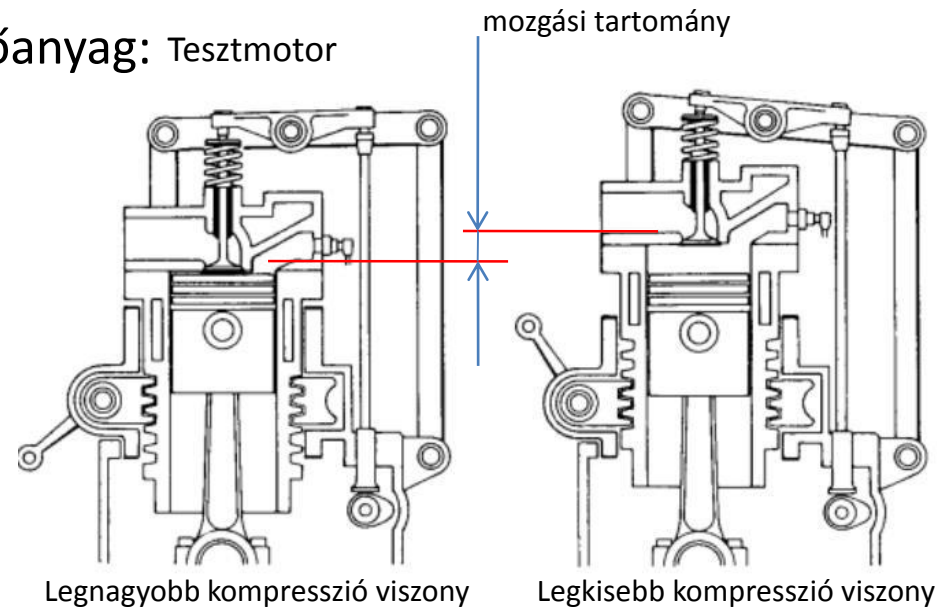
Benzin

- Az oktánszám jelenti azt az oktán-komponens arányt, amelynél a keverék és a benzin kompressziótűrése megegyezik.
- A megállapodás szerint a 7-es szénatomszámú tiszta heptán oktánszáma 0, a tiszta izooktán tartalmú üzemanyag oktánszáma 100. (A 95-ös benzin kompressziótűrése megegyezik a 95 % izooktánt és 5 % heptánt tartalmazó keverékével.)
- Az elágazó láncú szénhidrogén jobban tűri a sűrítést és kevésbé hajlamos a robbanásszerű, kopogásos égésre ellentétben a hosszú egyenes láncsal, mely több helyen szakad fel egyszerre a kémiai reakció során, így az égés jellege agresszív.
- Magas oktánszámú benzin önmagában nem eredményez nagyobb teljesítményt és alacsonyabb fogyasztást, de a kompresszióviszony megemelésével már igen!
- Régebben ólommal (ólom-tetraetil és ólom-tetrametil) javították az oktánszámot, ami rendkívül mérgező és károsítja a katalizátort.
- Magas kompresszióviszonyú motorokban használják, lassítja az égést.

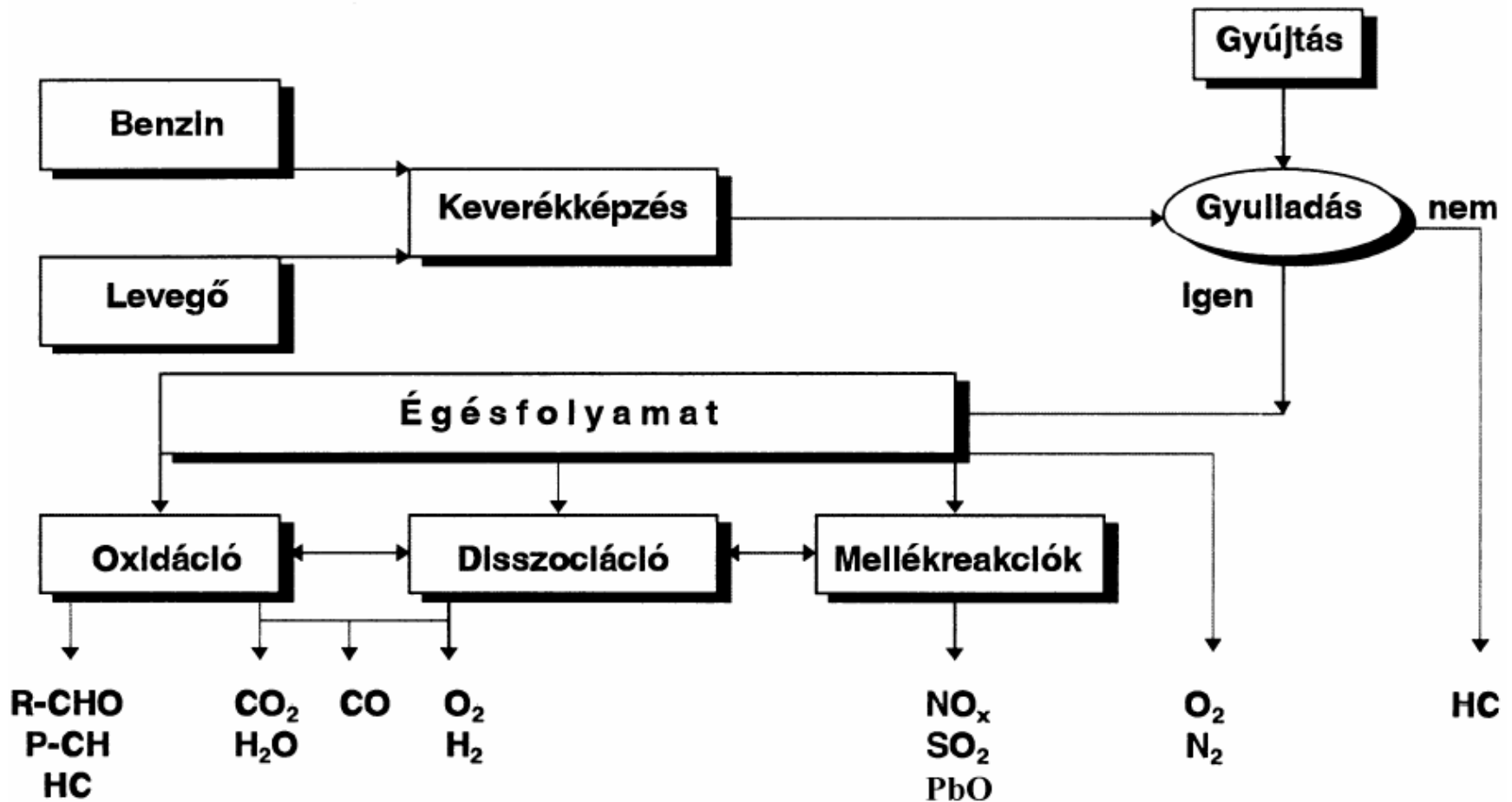
Benzin

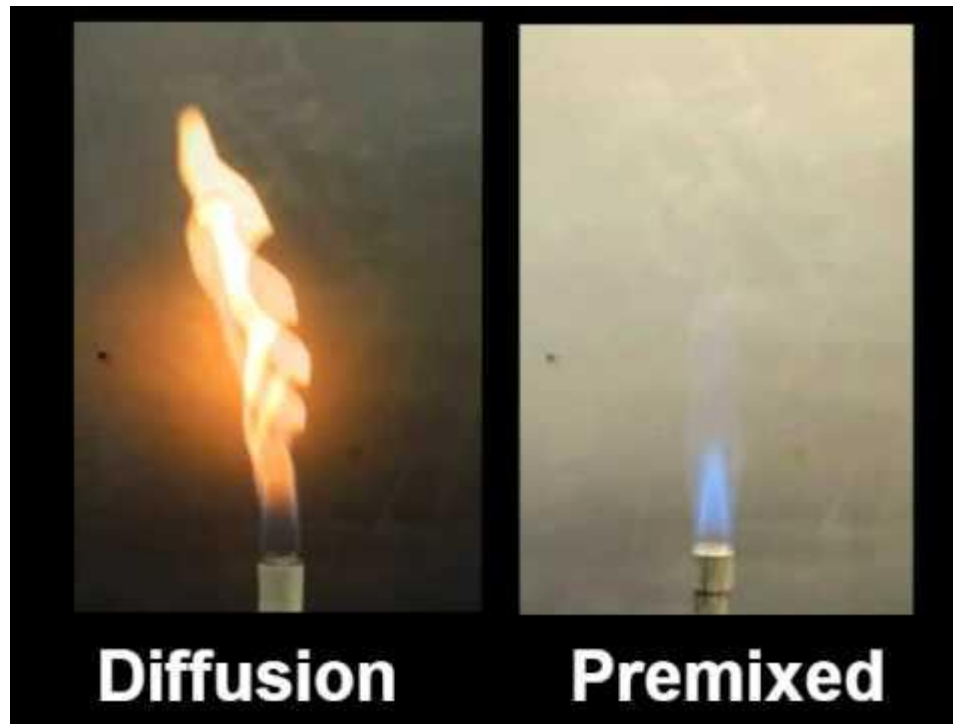
Oktánszám mérése

- Kétféle oktánszám létezik:
 - Motor oktánszám (MOZ, MON): tesztmotor fordulatszáma 900 $\frac{1}{perc}$
 - Kísérleti oktánszám (ROZ, RON): tesztmotor fordulatszáma 600 $\frac{1}{perc}$
- Az oktánszámot mindenütt egy adott típusú, szabványos kísérleti motorral határozzák meg, aminek fokozatmentesen állítható a sűrítési viszonya. A befecskendezett, előmelegített keverék hőmérséklete 148,9 °C. Sűrítési viszony: 4-11
- Összehasonlító mérés → 3 féle tüzelőanyag: Tesztmotor
2 minta + mérendő motorbenzin.
- Állandó légviszonyú keverék.
- Kopogásintenzitás mérése.



Az égésfolyamat blokkjának sémája





Diffúziós - és előkevert lángfront égési folyamata

Gyújtás

- Nagy hőmérsékletre való helyi felmelegítés, kis térfogatban.
- A kisülési zónában a hőmérséklet lényegesen nagyobb, mint az égési hőmérséklet.
- A kisülési zóna közelében a kémiai reakciók felgyorsulnak.
- Az ív megszűntével a hőmérséklet gyorsan csökken a környezet erős hőelvonása miatt.
- Ha a megindult reakciók hőfejlesztése nagyobb, mint a hőelvonás, az ív közelében képződő lángmagból lángfrontban terjed tovább az égés: ekkor történt meg a gyulladás.

Gyújtás - Gyújtógyertya

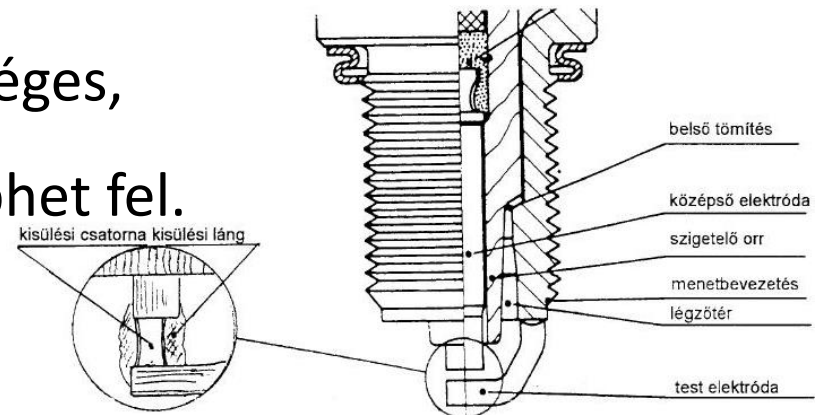
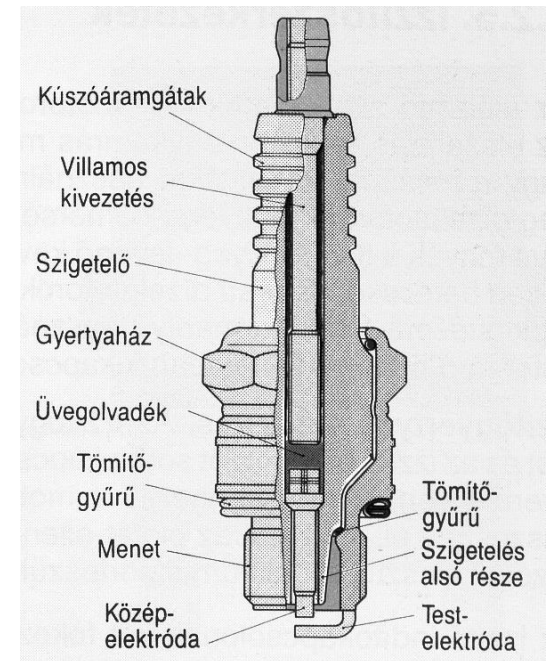
- A gyertya elektródái között a 15...30 kV-os nagy feszültség hatására fellépő ioncsatornában szikrakisülés keletkezik. Ez a nagy hőmérsékletű ív gyújtja meg a keveréket.
- A kisülési csatorna 8 000...10 000 °C-os
- A létrehozott energia 15...20 %-a jut a keverék felhevítéséhez, jelentős hányada villamos veszteség.



Gyújtás - Gyújtógyertya

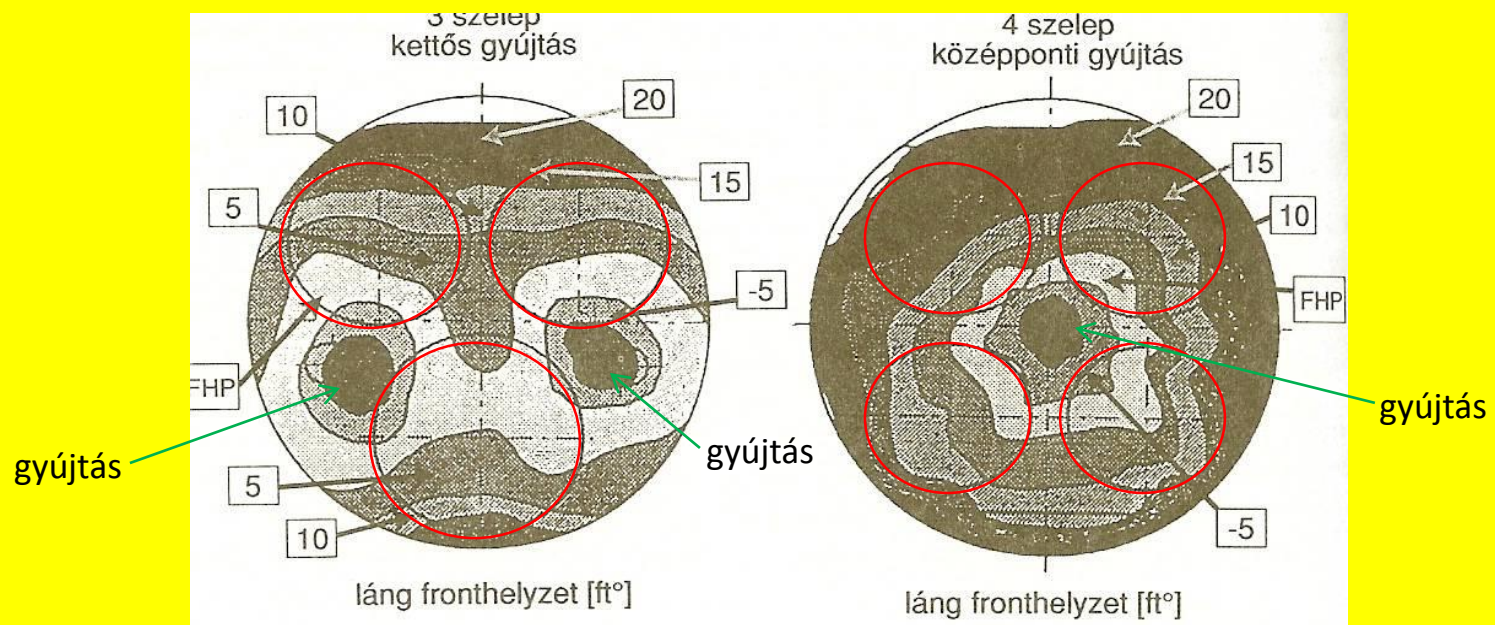
A gyertya elektródái közti rés befolyásolja a gyújtófeszültség-igényt:

- Túl kis rés: gyújtófeszültség-igény kisebb, de a hőveszteség nagyobb, romlik a hőátadás a keverék és az ív között.
- Túl nagy rés: gyújtófeszültség-igény nagy, emiatt teljesítmény-tartalék szükséges, mert nélküle gyújtáskimaradás léphet fel.



Gyújtás helyének befolyása az égésre

- Elhelyezéssel kapcsolatos követelmények:
 - Lángfront útja minél rövidebb legyen → gyertyaszám
 - Gyertya közelében gyulladóképes keverék legyen
- Elhelyezést befolyásoló tényező:
 - Szelepek száma



Gyulladás

- **A gyulladás feltétele:**

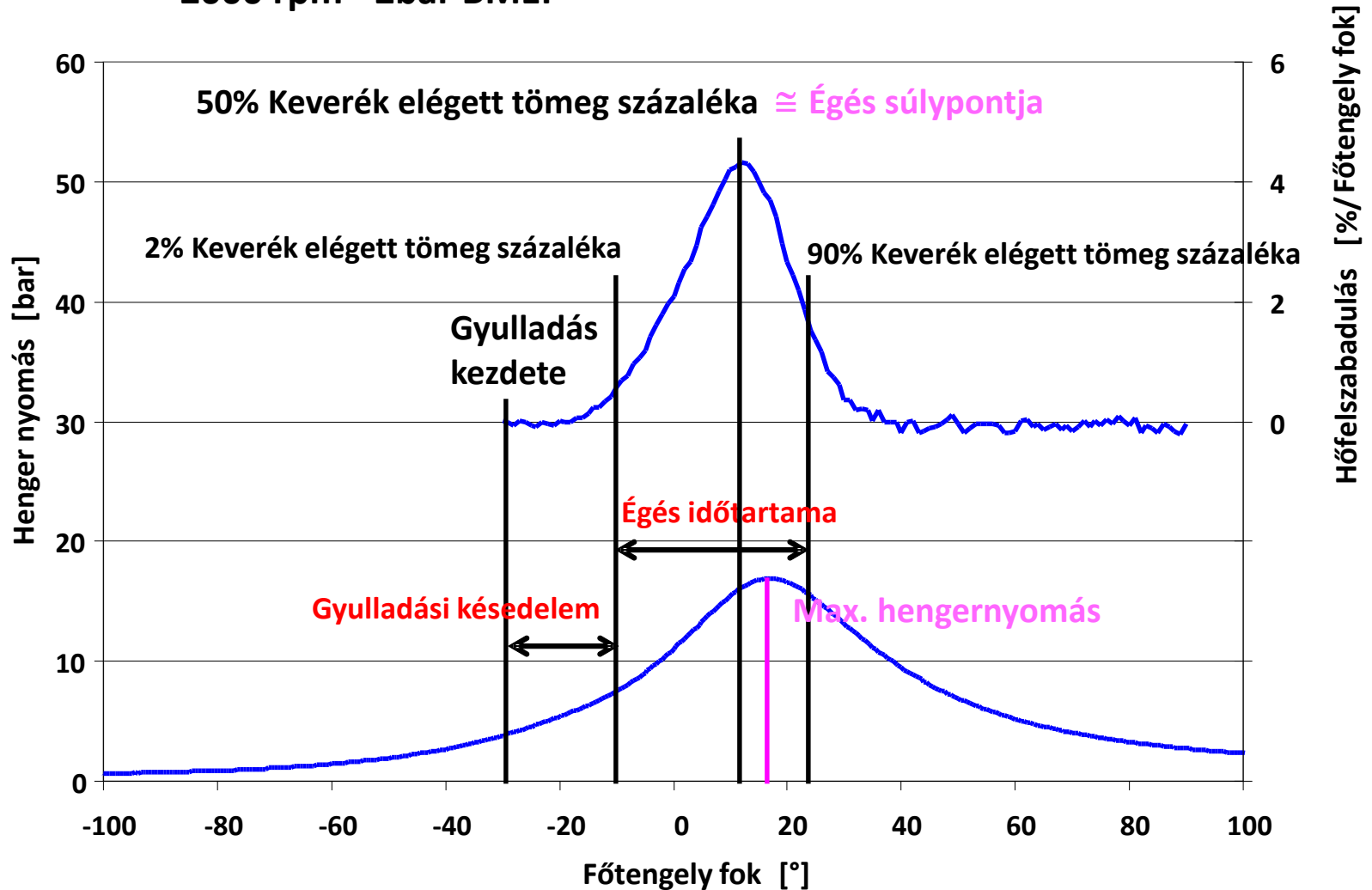
- A keverési aránynak a gyulladási határtartományon belül kell lennie,
- általában $0,7 < \lambda < 1,2$

A szükséges min. gyújtási energiát befolyásolja:

- sűrítési viszony
 - keverék hőmérséklete, összetétele és nyomása
 - A gyújtógyertya kedvező elhelyezése.
 - Üzemállapothoz legkedvezőbb időzítés
- **A gyulladás létrejötte:** külső energia bevezetésével, amit a gyújtógyertya elektródái közt átívelő szikra biztosít.
 - **Gyulladási késedelem:** a szikra átívelése és a lángfront kialakulása ill. továbbterjedésének kezdete közti idő.

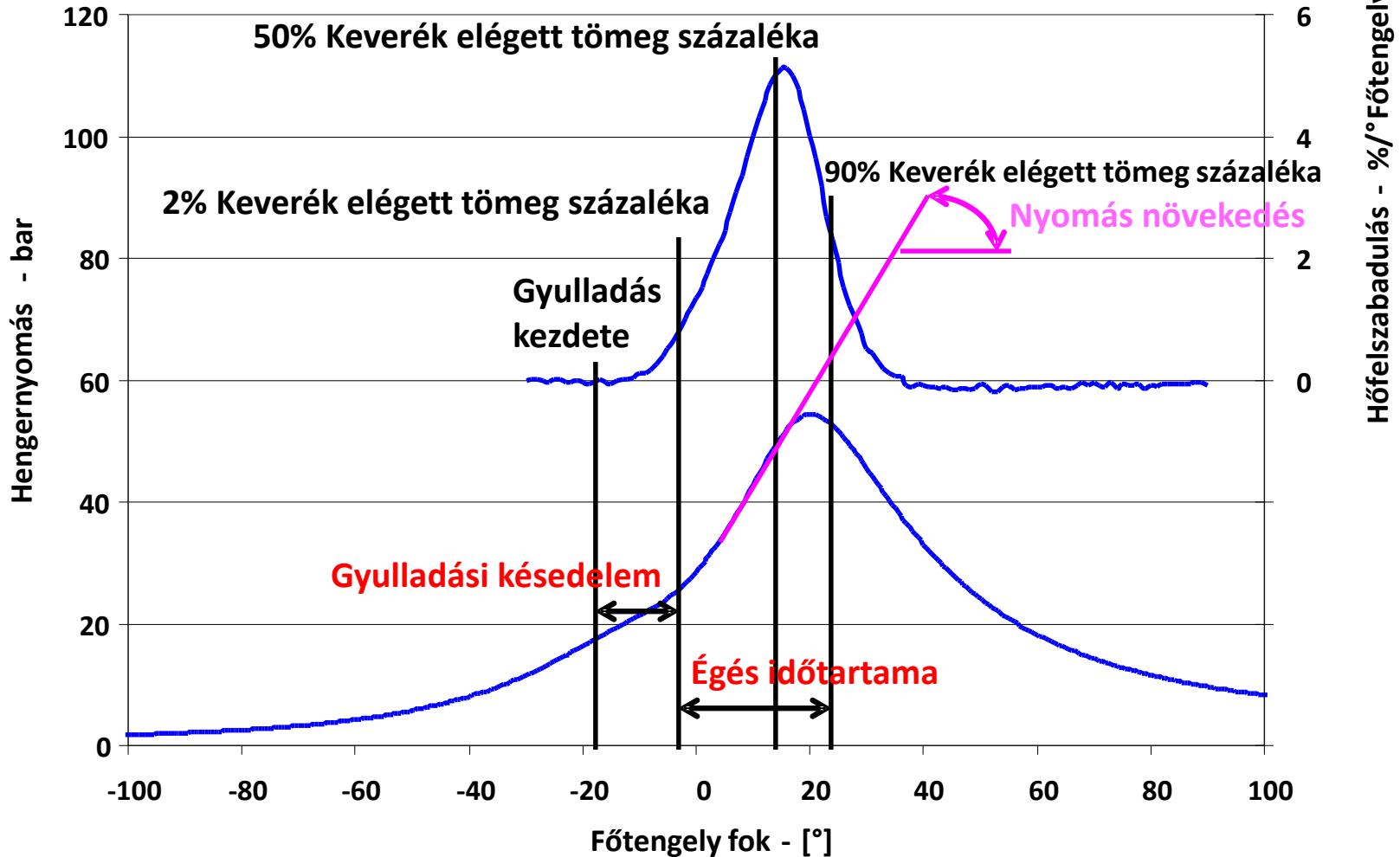
Gyulladási késedelem

2000 rpm - 2bar BMEP



Gyulladási késedelem

4000 rpm – teljes terhelés

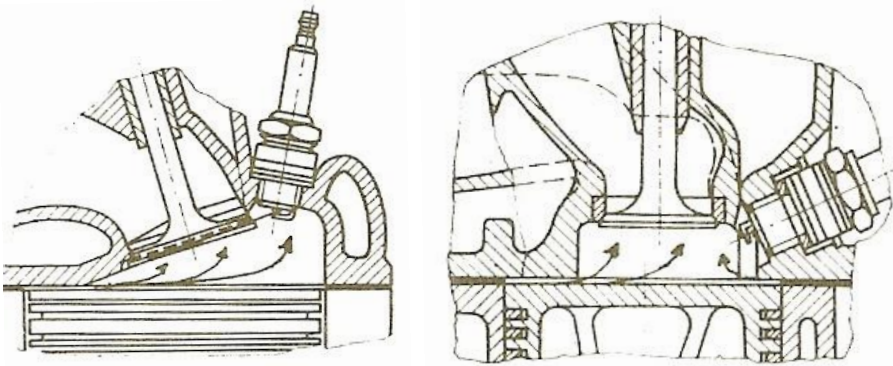


Örvénykeltési módszerek

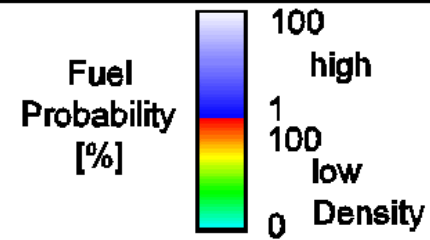
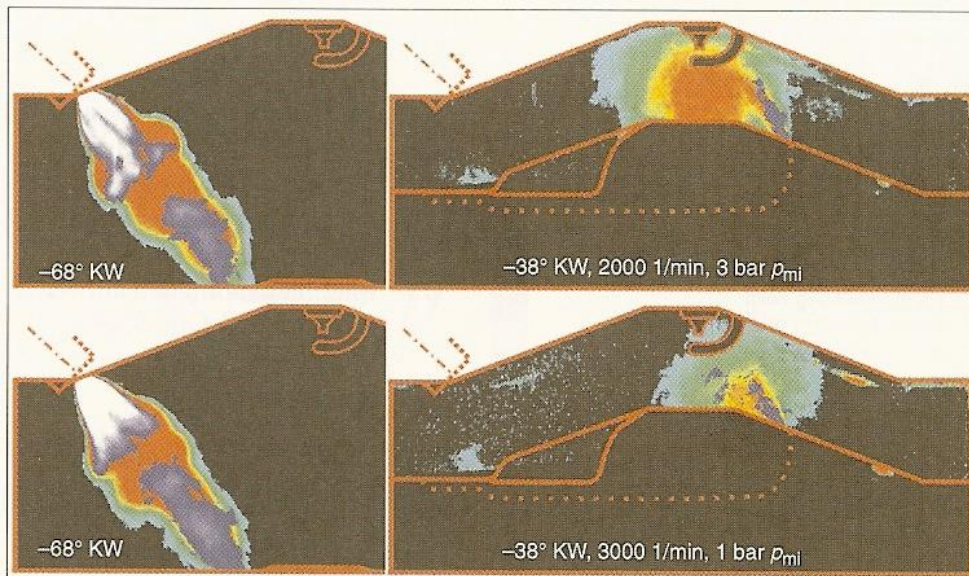
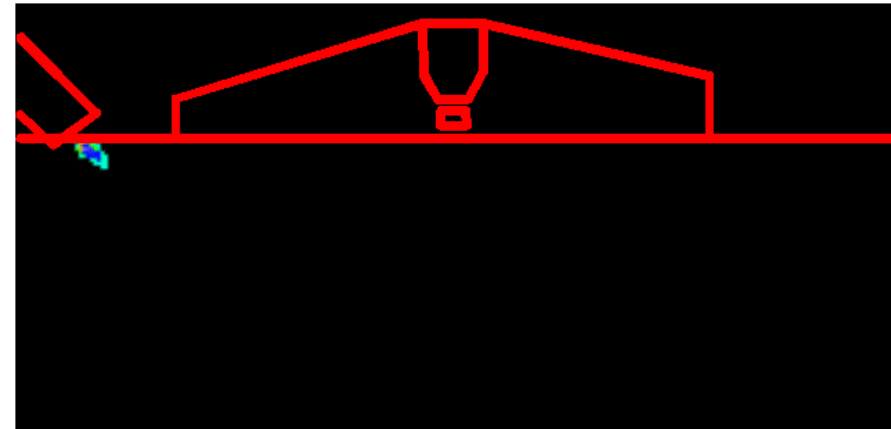
- **Perdületes áramlás (Swirl, Drall):** A szelepcsatorna spirális jellegű kiképzésével alakítható ki.
- **Bukó áramlás (Tumble):** A szelepcsatornák irányításával a henger középvonalára merőleges tengelyű áramlás.
- **Kiszorító áramlás (Squish, Quetsch):** Az égéstér és a dugattyú között alakul ki a FHP közelében

Kiszorító áramlás

Kialakításai:



Toyota Yaris 4 szelepes motorja



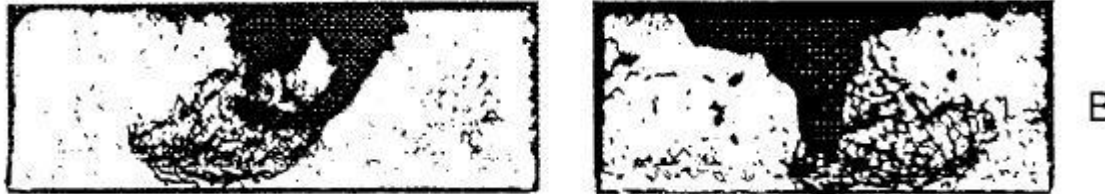
641° CA

Lángmag-képződés

- A turbulens kinetikai energia különös jelentőségű a szikra átívelését követő lángmag képződésében.



Kis turbulencia intenzitású keverék mozgás → kis térfogatú lángmag



Nagy turbulencia intenzitás → nagy térfogatú lángmag

- Ebben az esetben a kiszorító áramlás a lángmagban égő keveréket eltávolítja az elektródától, így csökken rajtuk a hőveszteség. Emellett, a lángmag jobban behatol az égéstérbe és meggyorsítja a lángfront kialakulását, így az égéstartam lerövidül.

Ciklus szórás

- Fő oka: a keverék sztochasztikus, inhomogén eloszlása.
- A különböző áramlások kialakítása → *járás egyenletesség és komfort.*
- Járás egyenletesség alapjáratnál és kis terhelésnél lényeges:

- Itt érezhető leginkább
- Komfortérzetre nagy hatással van

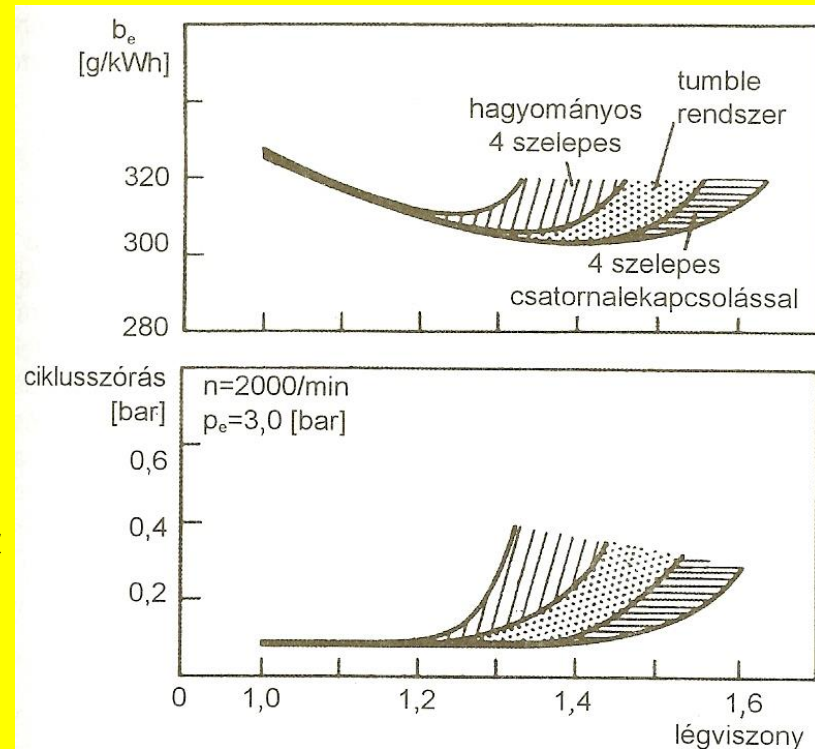
Minősítése: alapjáratnál és kis terhelési indikált középnyomásokra értelmezett ciklusszórás:

$$S_{p_i} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \underbrace{(p_i - p_{i \text{ köz}})^2}_{\text{szórásnégyzet}}} \quad [\text{bar}] \quad p_{i \text{ köz}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i$$

- Relatív ciklus szórás (ciklus ingadozás): $\frac{S_{p_i}}{p_{i \text{ köz}}} \cdot 100$ [%]

- Minél kisebb a szórás, annál egyenletesebb a motor járása.

- Fő oka a turbulencia ingadozása – amely az égési sebességet meghatározza → intenzív turbulencia létrehozása minden égési eljárásnál.

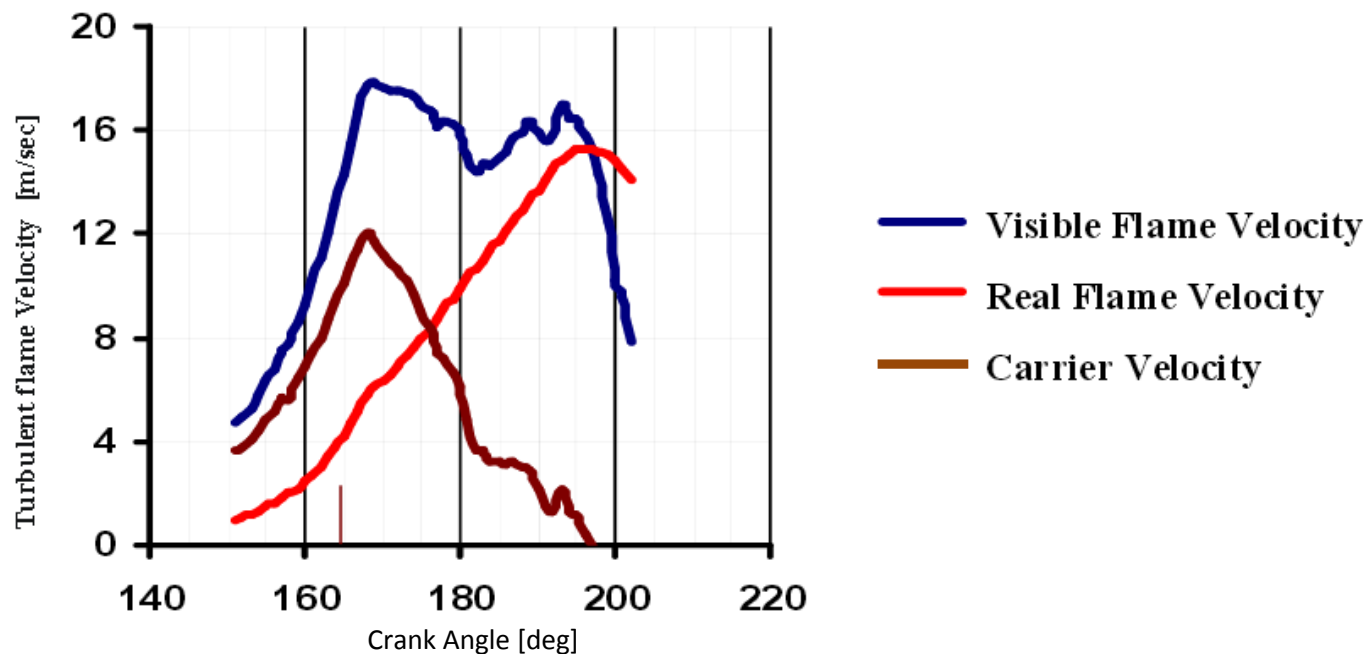


Égés

- A szikraképzés helyétől indul és lángfrontban halad a turbulencia intenzitásának megfelelő sebességgel.
 - Az égési sebesség függ:
 - a légviszony nagyságától
- Dús keverék \longrightarrow nagy égési seb. \longrightarrow kedvező üzemi tulajdonságok
- a fordulatszámától, egyenesen arányos
 - nyomástól, hőmérséklettől (kisebb jelentőségűek)

Turbulens lángfront-sebesség az égéstérben

Flame Velocity Components:

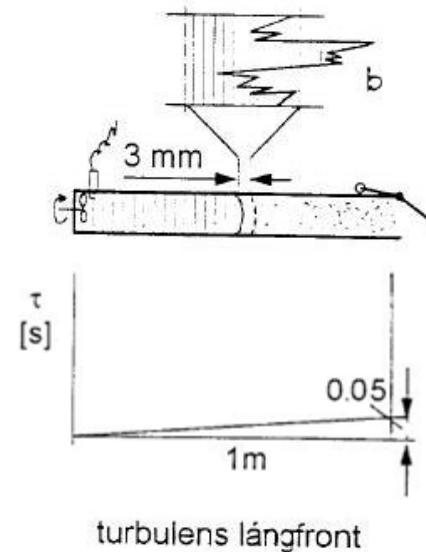
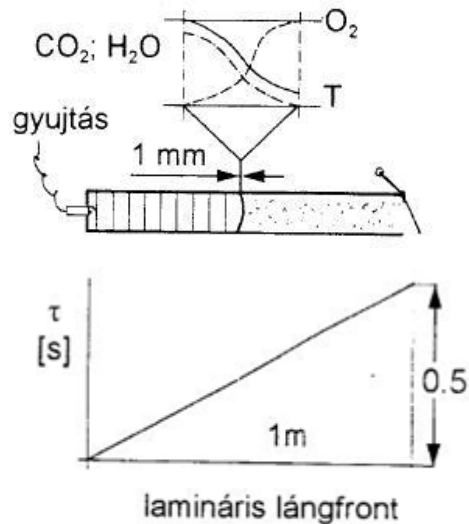


Bodor Péter Aladár : Ottó-motorok égési folyamatának modellezése, diplomamunka

Lángfront terjedés

- A gyulladóképes homogén keverékben a lángfront gyors terjedését a légmozgás biztosítja
- A beáramlás során a szeleptányéron és a szelepülésen leváló rendezetlen örvények turbulens keverék mozgást (turbulenciát) hoznak létre.
- Nagyobb fordulatszám \rightarrow nagyobb sebesség a szívószelepeken \rightarrow nagyobb turbulencia \rightarrow nagyobb a lángfront terjedési sebessége.
- Ez ad lehetőséget benzinmotornál a nagy fordulatszám tartományra.

Lángfront terjedés

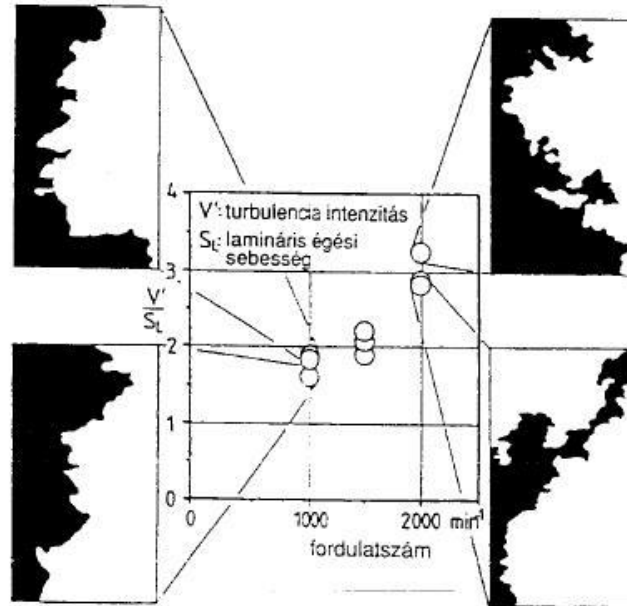


- Zárt cső
- Nyugalomban lévő gázkeverék
- Az égési front egyenletes sebességgel halad végig a csövön.
- A lángfront sebessége függ:
 - Keverék anyagi minőségétől
 - Kémiai reakciók sebességétől
- Lamináris égési sebesség: kb. 2-3 m/s

- Lángfront felülete felbomlik
- A lángfront sebessége többszörösére növekszik
- Turbulens lángfront
- Időegység alatt reakcióba lépő anyagok mennyisége arányosan növekszik
- Turbulens égési sebesség: nagyságrenddel nagyobb

Lángfront terjedés

- **Turbulens lángfront terjedési sebessége:** égési (reakció) sebesség és a transzport sebesség összegeként jön létre, és a munkafolyamatra meghatározó jelentőségű.



- Szikragyújtású motoroknál a fordulatszám növeléssel való teljesítmény növelésnek az égési feltételek nem szabnak szigorú határt.
- Híg keveréknél csökken a lángfront sebessége, mert a kisebb hőmérséklet miatt csökken a reakciósebesség és az égési sebesség. Ekkor a fordulatszám növelés már határt szabhat.

Égéstér kialakítása

- **Alakja**

- Kompakt égéstér → kis felület/térfogat viszony → HC emisszió csökkentése
- Felületek tagolatlanok, viszonylag nagy sugarú szög lekerekítések
- Rövid lángutak → égéstér gyors betöltése → HC emisszió csökkentése
→ NO_x emisszió növelése
- Pontos geometriai egyenlőség a hengerek között → azonos kompresszió viszonyok

- **Geometriai arányok**

Legfontosabb a löket/furat viszony: s/D

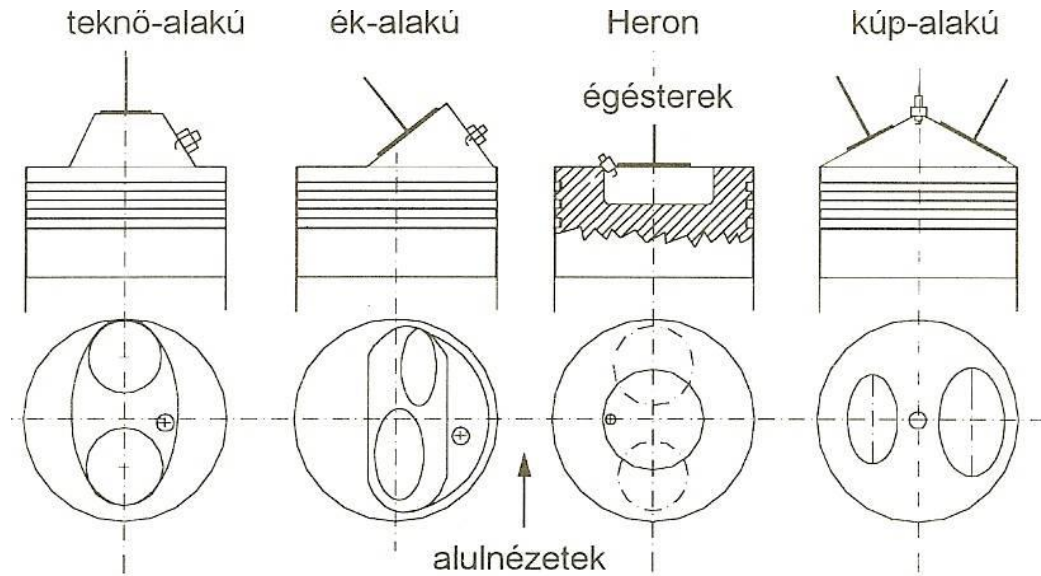
- Nagy fajlagos teljesítménynél: $s/D < 1$
- Mérsékelt fogyasztásnál és emissziónál: $s/D > 1$

Hosszabb löketű motoroknál kedvezőbb:

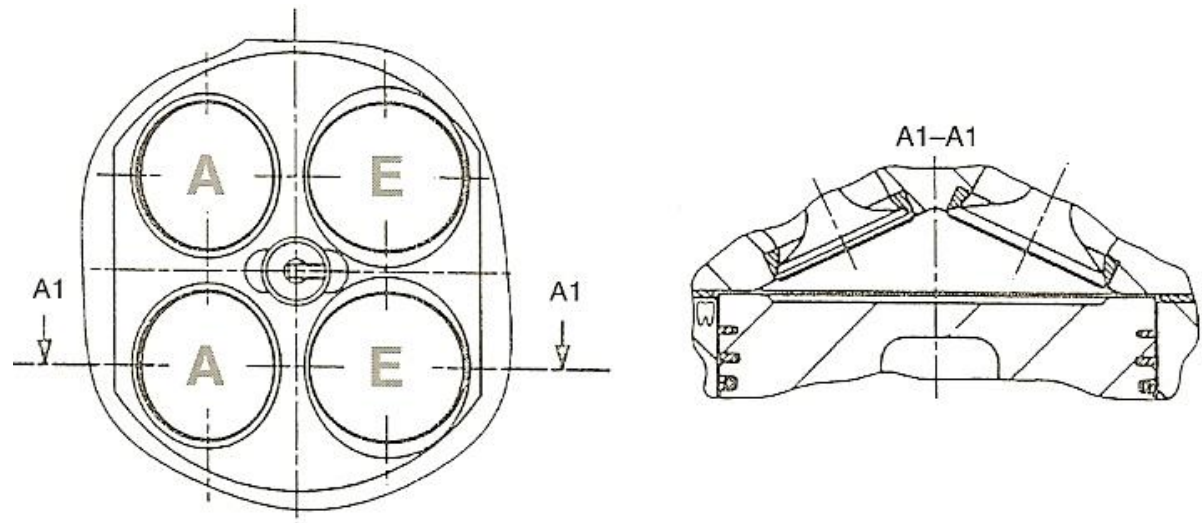
- belső hatásfok (indikált) + CO₂ emisszió
- ciklus-szórás

Égéstér kialakítása

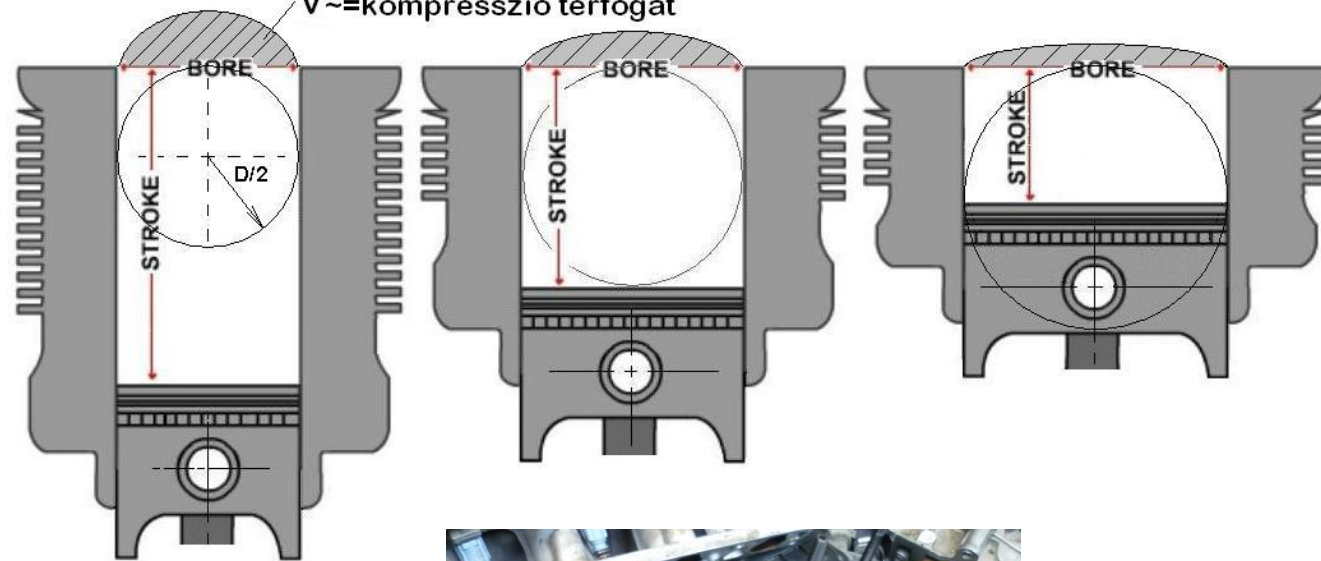
2 szelepes motornál
(homogén keverékképzés)



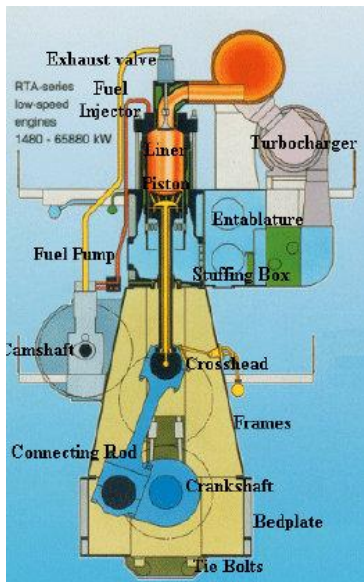
4 szelepes motornál
(homogén keverékképzés)



V~≐kompresszió térfogat



Sportcélú járművek nagy teljesítményekhez és - fordulatszámokhoz



Az autók erőforrásai általában négyzetes arány körüliek

Az emisszió és hatásfok szempontjából lényeges munkáütem-kezdeti felület/térfogat arányok különböző motorkonstrukciónál (≐komp. felület/komp. térfogat)

Lassújárású hajó- és mozdony-motorok, stabilmotorok

Rendellenes égés

Kopogás

A rendellenes égési folyamatok közül a legfontosabb, mert ez határolja adott lökettérfogatú és fordulatszámú motor legnagyobb teljesítményét és a motor hatásfokának nagyságát.

A valódi gyújtás után a magas hőmérséklet és nyomás miatti öngyulladásból egy másodlagos gyújtás alakul ki (általában a henger szélén).

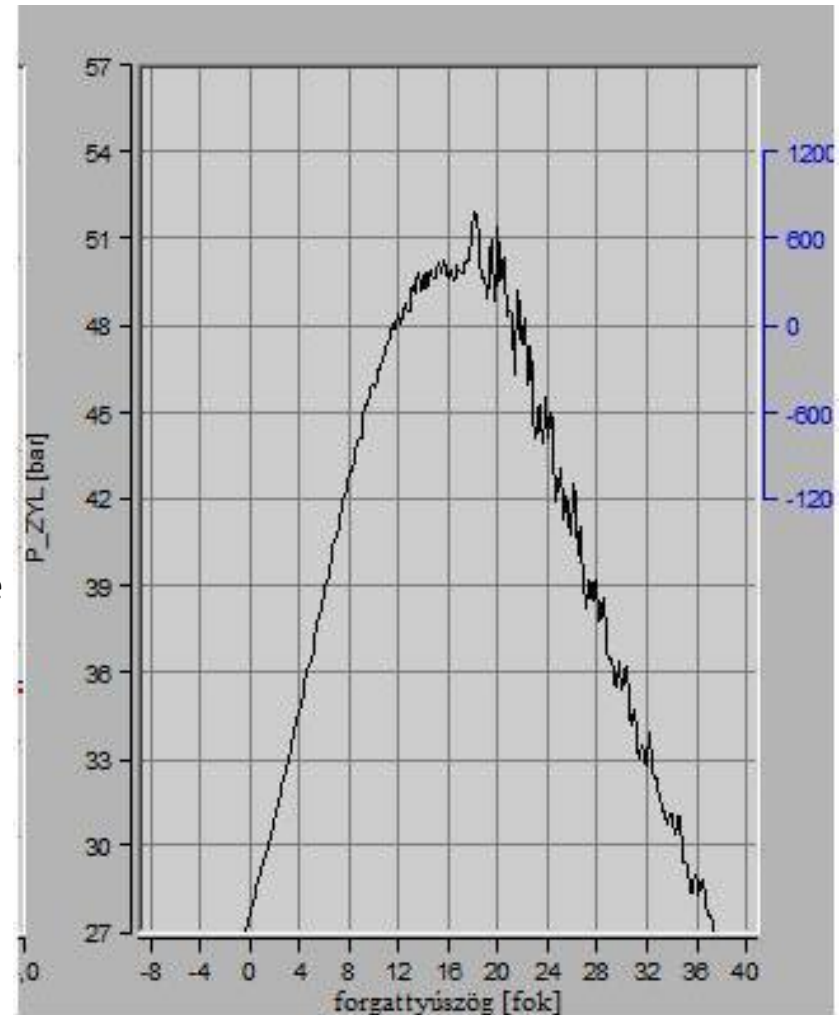
Másodlagos gyújtásnál a lángfront sebesség nagyságrendekkel nagyobb, robbanásszerű.

A hirtelen hőbevitel \rightarrow inhomogenitás a nyomásban \rightarrow nyomáskülönbség kiegyenlítődik \rightarrow a nyomáshullám hangsebességgel terjed \rightarrow a henger falának elérésekor létrejövő fémes hang. (Mint amikor a hangszóró membránja által keltett nyomáshullám visszaverődik)

Elsősorban a benzines motorokra jellemző, Dieselnél az eltérő keverékképzés miatt nem alakul ki.

Rendellenes égés

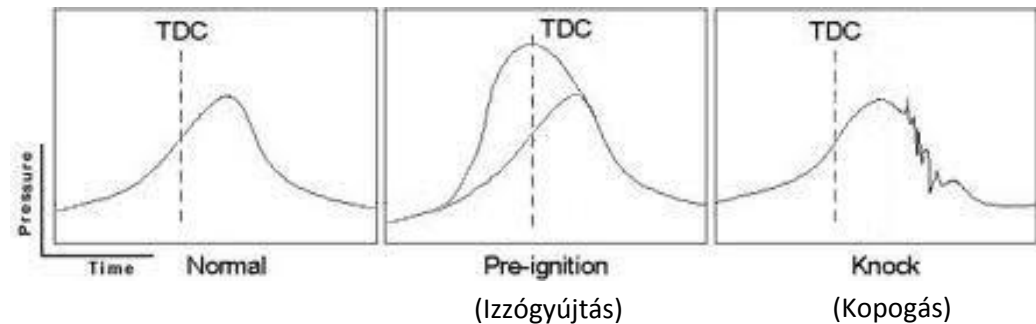
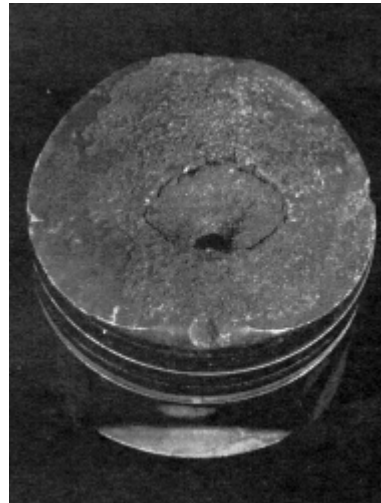
- **Kopogás okai:**
 - túl nagy sűrítési arány
 - túlzott mértékű feltöltés
 - a töltőlevegő túl nagy hőmérséklete
 - nem megfelelő kompresszió-tűrésű tüzelőanyag (alacsony oktánszámú benzin)
 - túl nagy előgyújtási szög
- **Kopogás következményei:**
 - megnő az égési sebesség, a nyomás és a hőmérséklet
 - megnő a hőátadás, motor (lokális) túlmelegedése
 - izzógyújtás
 - megnő a kompressziógyűrű terhelése (rezgés)
- **Kopogás megelőzése:**
 - kompresszió viszony csökkentése
 - nagyobb oktánszámú tüzelőanyag
 - gyertya és az égéstér legtávolabbi távolságának csökkentése
 - a keverék turbulenciájának növelése
 - előgyújtás csökkentése



Rendellenes égés

Izzógyújtás:

- A benzin-levegő keverék kontrollálatlanul, a sűrítési ütemben, még a gyújtógyertya szikrája előtt meggyullad és robbanásszerűen elég, igen nagy nyomásfejlődés közben, ami rövid idő alatt tönkremenetelhez vezethet (ld. képek).
- Bekövetkezhet a hengerben lerakódott korom izzása miatt vagy nagy igénybevételeknél, nagy fajlagos teljesítménynél az erősen felmelegedett motorban a sűrítési ütemben kialakuló hőmérséklet okán.



Diesel-motor

Gázolaj

- Természetes kőolajból desztillálás útján kapott folyadék, melynek kéntartalmát hidrogénezéssel csökkentik. Szintén sokféle szénhidrogén elegye.

A kéntartalomtól nagymértékben függ a motor élettartama: korróziót okoz és hozzájárul a lerakódások megszilárdulásához. Főleg hideg motor esetén jelentős a kialakulásuk. A nagy kéntartalom ezen kívül elősegíti a koromképződést is.

- **Sűrűsége:** $0.800 - 0.860 \text{ g/cm}^3$
- **Viszkozitása:** $2 - 8 \text{ mm}^2/\text{s}$
- **Kéntartalom:** $0.01 - 0.05 \%$
- **Lobbanáspont:** $62 \text{ }^\circ\text{C}$
- **Öngyulladás:** $210 \text{ }^\circ\text{C}$

Gázolaj

Cetánszám: az öngyulladás hajlam mutatója, értéke a gázolaj kémiai összetételétől függ.

- Adott gázolaj cetánszámát etalon tüzelőanyaggal hajtott szabványmotoron történő összehasonlítással határozzák meg.

Számszerűleg megadja, hogy a gázolaj öngyulladás hajlama hány térfogat-százaléknyi cetánt tartalmazó etalon keverék öngyulladás jellemzőjével egyezik meg szabványos körülmények között.

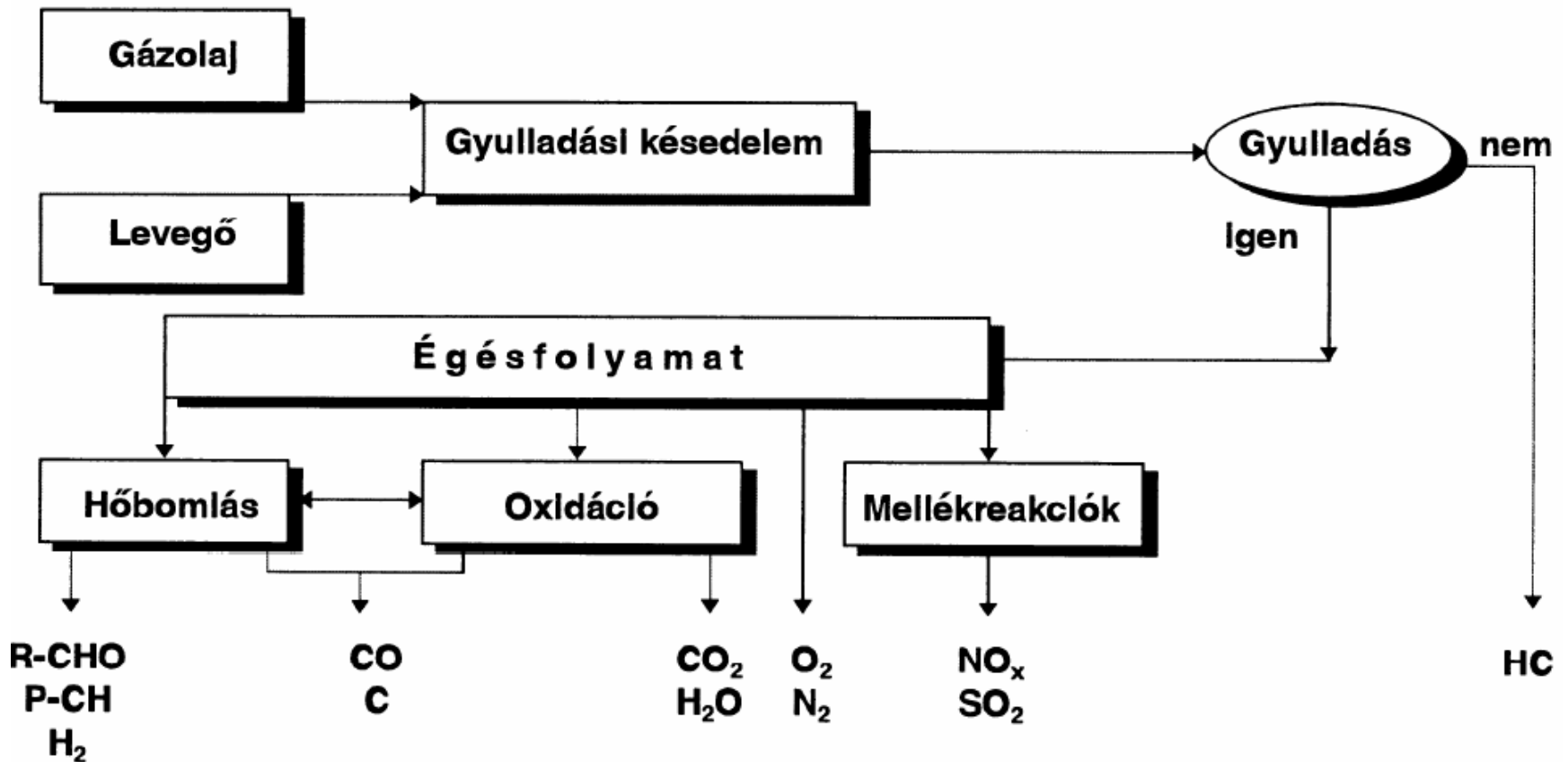
- Az etalon tüzelőanyag két ellentétes öngyulladás tulajdonságú tiszta szénhidrogén elegyből készül:
 - alacsony kémiai stabilitású (nagy öngyulladás hajlamú): cetán ($C_{16}H_{34}$), egyenes láncai miatt kis hőmérsékleten, oxigén jelenlétében könnyen felbomlik.
 - nagy kémiai stabilitású (kis öngyulladás hajlamú): alfa-metil-naftalin ($C_{10}H_7CH_3$), tömörebb molekulájú, atomjai kettős kötésű zárt láncot képeznek.
- Alacsony cetánszámú tüzelőanyag: nő az öngyulladás idő \rightarrow a motornak kemény lesz a járása.
- Normál cetánszám: 45 - 60

Gázolaj

Cetánszám mérése

- Alapvető konstans hőmérsékleti paraméterek beállítása:
 - Belépő levegő hőmérséklete: 66 °C
 - Hűtővíz hőmérséklet: 100 °C
 - Befecskendező fej hőmérséklet: 38 °C
- Ismert tüzelőanyag mérése melynél a gyulladási késedelmet manuálisan, fojtószelep segítségével (BASF-motor) vagy a kompresszióviszony manuális állításával (CFR-motor) állítjuk be.
- A mérés végrehajtása a vizsgálandó tüzelőanyag-mintával.
- Adatok leolvasása.
- Ismételt mérések a megadott szabványos metodika alapján.
- Kiértékelés.

Az égésfolyamat blokkjának sémája



Befecskendezés

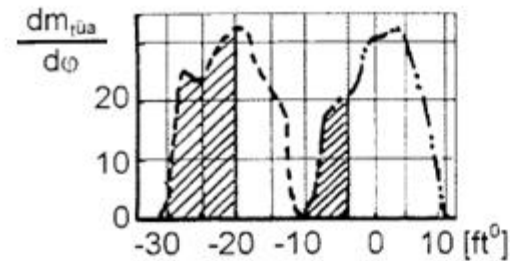
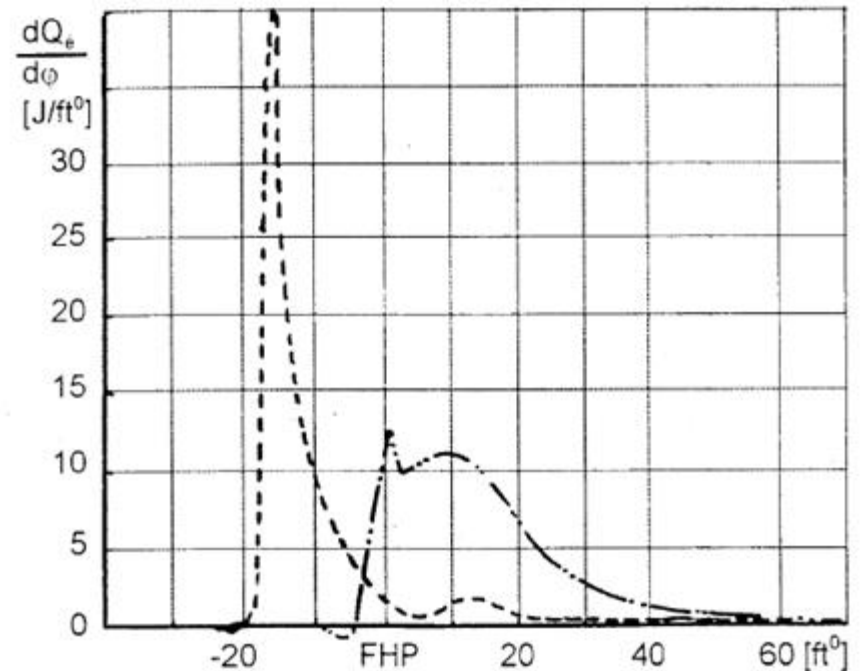
- Befecskendezett tüzelőanyaghoz vezetett levegő → perdületes áramlás
gyorsabb keveredés → égést befecskendezéssel irányítják.

- **A túl korai (31 ft° FHP_e) befecskendezés**

- majdnem négyszer nagyobb égési maximum
- súlypontja FHP előtt van
- középnyomás kedvezőbb
- nyomásváltozás sebessége és az égési csúcsnyomás növekszik → mechanikai és hőterhelés növekszik és NO_x képződik
- gyulladási késedelem nagyobb

- **A késői (10 ft° FHP_e) befecskendezés**

- elhúzódo égés
- súlypontja FHP után van
- csúcsnyomás és a nyomásnövekedési sebesség kisebb
- égés nagy része az expanzióra jut (hatásfok)
- kisebb gyulladási késedelem
- füst képződés



Gyulladás

- A befecskendezett tüzelőanyag cseppek párolognak, melynek mértéke a cseppek nagyságától és a hőmérséklettől függ.
- **Gyulladási késedelem:** a befecskendezés kezdete utáni gyulladási hőmérséklet elérése, valamint az égés kezdete között eltelt idő.

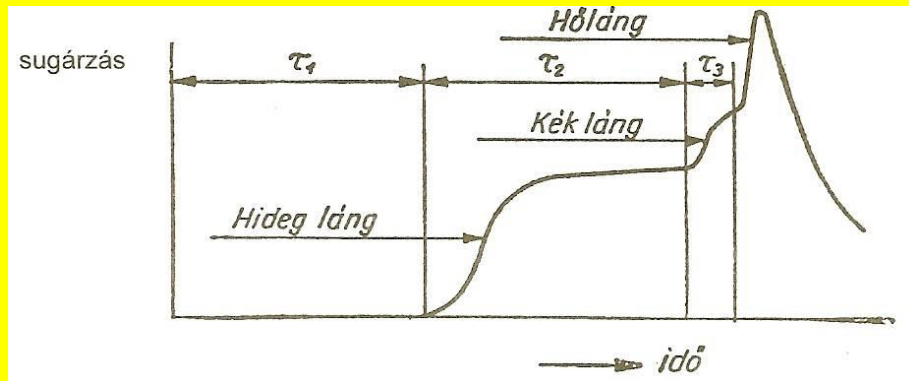
Közelítése:
$$\Delta t = A \frac{\lambda}{p^2} \exp \left[\frac{-E}{RT} \right]$$

- **Befolyásolja:**

- a hengertöltés nyomása és hőmérséklete
- tüzelőanyag kémiai összetétele (cetánszám)
- befecskendezett tüzelőanyag cseppek nagysága:
kisebb tüzelőanyag csepp → gyorsabban felmelegszik → gyorsabban elpárolog
- a cseppek és a levegő közti relatív sebesség nagysága

Gyulladás

- A keverék nem homogén → az égés különbözik a benzinmotorokban lezajló égéstől.
- Tüzelőanyag párolog → diffúzió a levegő rétegeibe → koncentráció és hőmérséklet megfelelő → öngyulladás
- Öngyulladás folyamata



- Sűrítési arány: $\varepsilon = 12...23$
Sűrítési ütem végén az összesűrített levegő hőmérséklete: 500...900 °C
Égéstér nyomása: 50 bar
Befecskendezési nyomás: 1000 bar
Befecskendezés ideje: 833 μ s

Égés

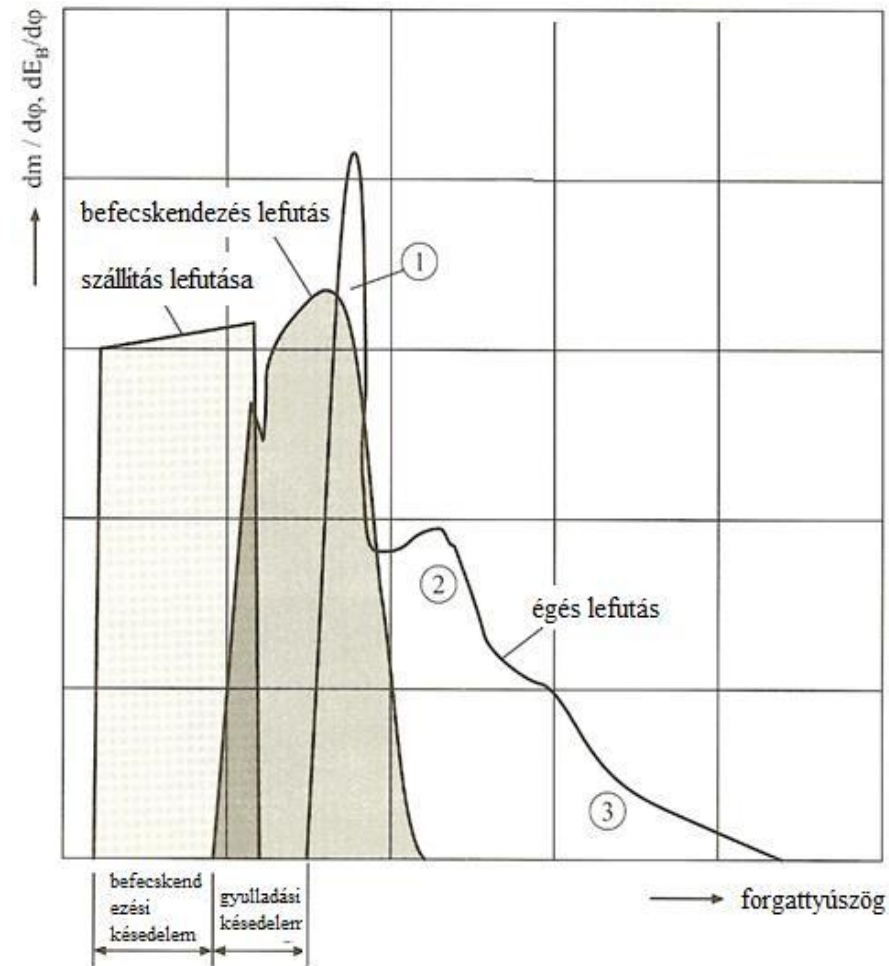
Az égés fázisai:

1. **Kinetikai fázis:** előkevert lángfront.

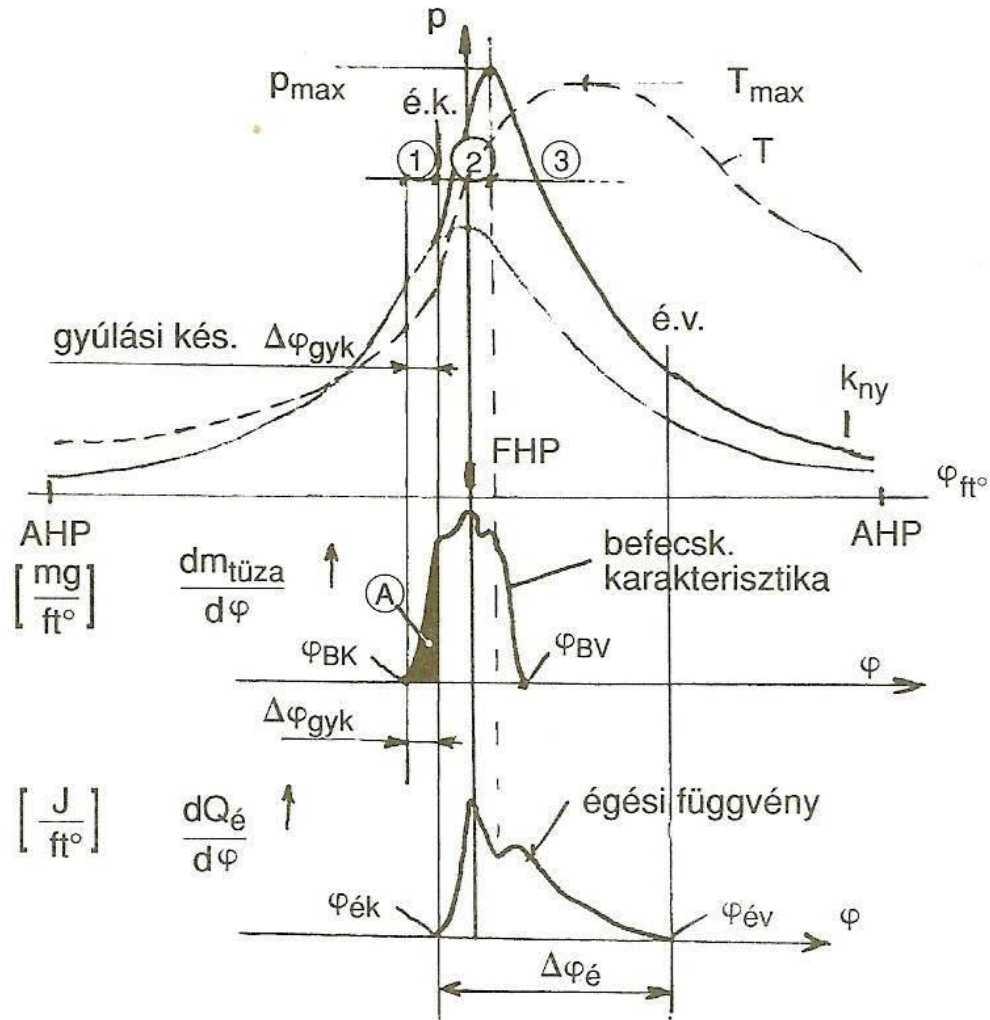
2. **Diffúziós fázis:** fő égés, diffúziós égés, keveredés által korlátozott.

Ebben a két fázisban nem szabadul fel a teljes hőmennyiség.

3. **Utóégesi fázis:** utóézés, diffúziós égés, reakciókinetika által korlátozott, a hőenergia 10-20%-a szabadul fel.

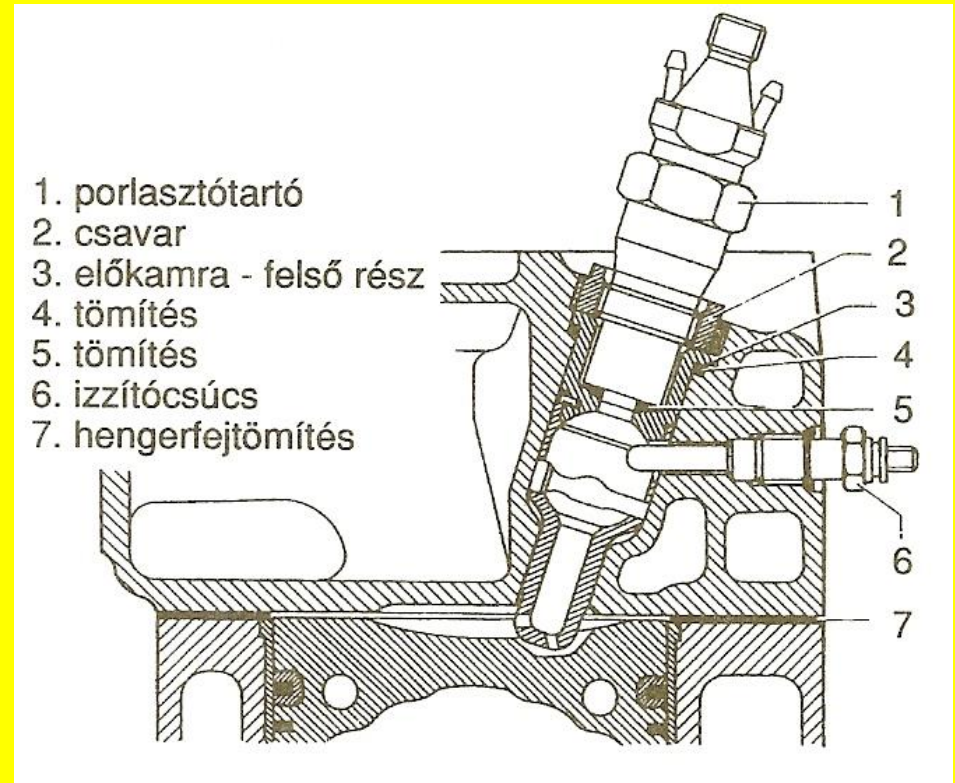


Égés



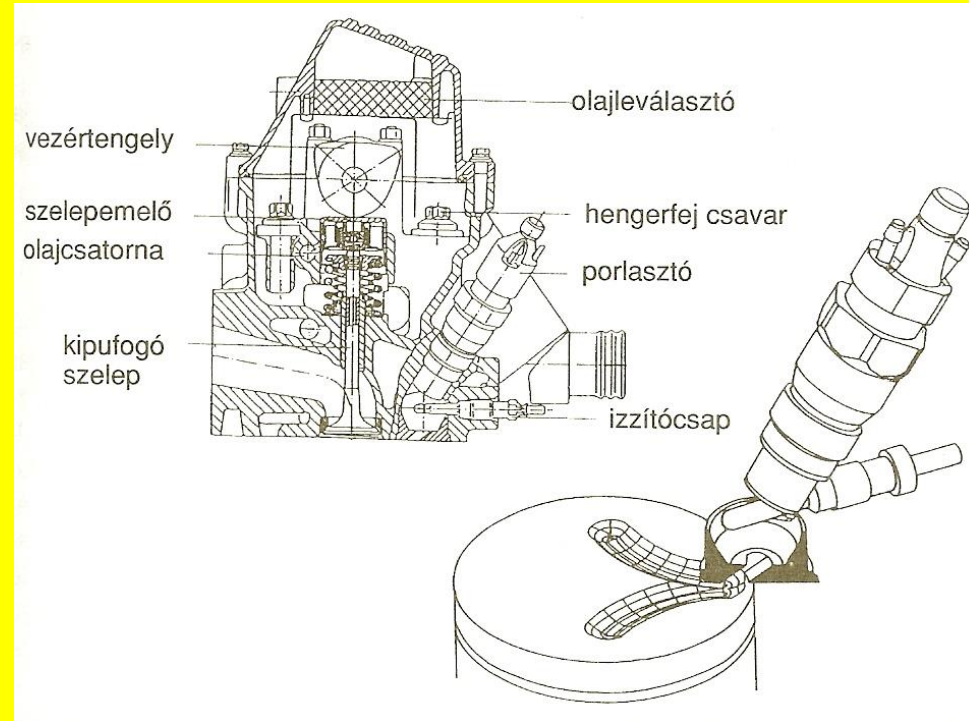
Előkamrás égésrendszer

- A kamrában indul meg az égés
 - Csak részégés
- A kamra tartalma nagy sebességgel áramlik a fő égéstérbe
- Sebesség függ:
 - Kamratérfogat és a teljes kompressziótérfogat viszonyától
 - Előbefecskendezéstől
 - Átömlő keresztmetszet nagyságától
- Lág, majdnem tökéletes égés
- Hengerben a csúcsnyomás kisebb, mint a kamrában
- Kamra és henger közti oda-vissza áramlások veszteségekkel járnak
- Rosszabb a felület/térfogat arány



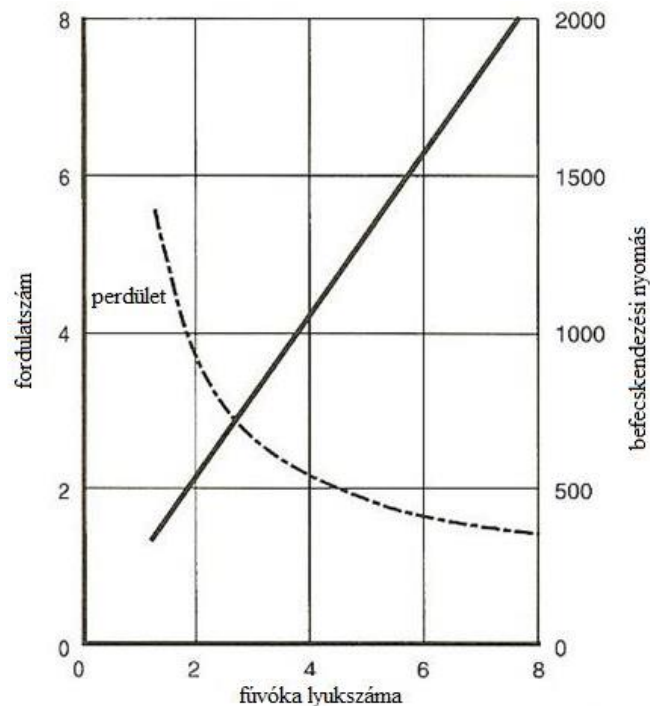
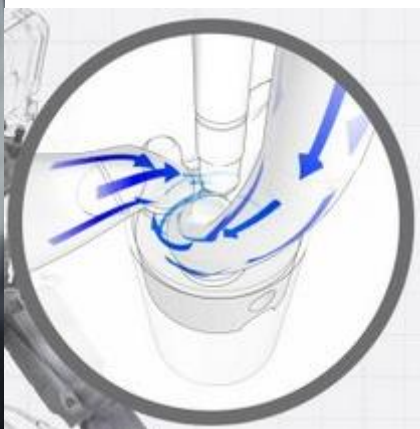
Örvénykamrás égésrendszer

- Cél: nagy fordulatszám-tartomány megvalósítás
- A kamra félgömb alakú, melyhez kúp alakú érintőleges áramlási csatorna csatlakozik
- Dugattyútetőn áramlásirányító csatornák → a keverék hatékonyabb elosztására
- Működésében hasonló az előkamráshoz
- **Előnyei:**
 - Jó keverékképző hatás széles fordulatszám-tartományban
 - Izzítócsapok → könnyű hidegindítás, gyors melegjáratás
 - Igénytelen befecskendezőrendszer
 - Viszonylag csendes égés
 - Kis csúcsnyomás → csekélyebb hajtóműterhelés
- **Hátrányai:**
 - Áramlási- és hőveszteségek miatt rosszabb hatásfok ill. fogyasztás (felület/térfogat arány)
 - Dugattyútető repedése a forró égési gázok miatt



Közvetlen befecskendezésű égésrendszer

- Többsugaras befecskendezésű rendszerek (kivéve hártvás keverékképzés)
- A keverékmozgást létrehozó levegőmozgás mindig perdületes
- Fontos a perdület erőssége, a c_u/c_a viszony és a hozzá illeszkedő tüzelőanyag:
 - sugarak száma és irányítása
 - behatolási mélysége
 - átlagos cseppnagysága
- A perdület a sűrítési ütemben keveset gyengül, FHP közelében a dugattyúkamrába szorul.
- A szelepek száma befolyásolja az égéstér kialakítását.



Közvetlen befecskendezésű égésrendszer



-20.0 deg CA
Split_Injection

Károsanyagok keletkezése

Károsanyagok keletkezése

Az égésfolyamat nem ideális termodinamikai körülmények között zajlik le:

a kémiai reakciókhoz kevés idő áll rendelkezésre

hőmérséklet nem egyenletes a hengerben

nem tökéletes az égés (másodlagos reakciók)

Károsanyagok keletkezése

- **Nitrogén-oxidok keletkezése (NO_x):**

- Levegő nitrogén és oxigén tartalmából
- Nagy hőmérsékleten
- A lángban és a láng utáni zónákban
- Az oxigén molekula szétesik atomjaira és az oxigén atomok reakcióba lépnek a nitrogén molekulával.

- **Korom keletkezése:**

- Diesel-motorban:

- Nagyságrendekkel nagyobb koromkibocsátás
- Kis hőmérsékleten aromás és erősen telítetlen alifás nagy molekulájú komponensekből
- Közepes hőmérsékleten gázolajból: fontos a porlasztás minősége → a koromképződés a cseppek méretével nő.

- Otto-motorban:

- Oktánszám növelés miatti adalék ólomvegyületekből származó szulfátok (csak ólmozott benzinek esetében)
- Extrém dús keverék esetén (lokálisan vagy globálisan)

Károsanyagok keletkezése (CO)

- Közbenső lépés a szénhidrogének oxidációs folyamatában
- A CO a képződésénél lassabb reakció során oxidálódik CO₂-vé
- **Diesel-motorban:**
 - Heterogén hőmérséklet eloszlás miatt
 - Légfelesleg miatt alacsony CO emisszió
- **Otto-motorban:**
 - Többször dús keverékkel üzemelnek, ezért jelentős a CO kibocsátás

Károsanyagok keletkezése (HC)

- Szénhidrogén-emisszió: fő égési folyamat + egyéb források.
- **Diesel-motorban:**
 - Túlságosan dús vagy szegény keverék az öngyulladásához ill. láng terjedéshez
 - Koromszemcsék felületére abszorbeálódnak
- **Otto-motorban:**
 - Keverék elszegényítése → gyújtás kimaradás
 - Lángkialvás
 - Tökéletlen égés inhomogenitás miatt
 - Réseket kitöltő töltet kilépése az elsődleges égés után
- HC emisszió keletkezésének helye az égéstérben

