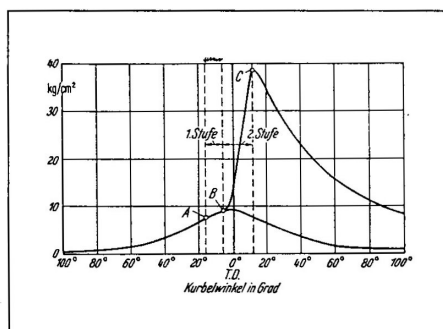


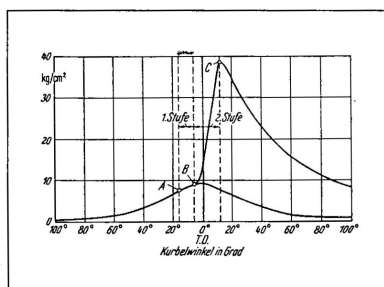
Palaminen ottomoottorissa



- A Sytytyshetki
- B Havaittavissa oleva paineen nousun alku

Syttymisviive A-B johtuu polttoaineen höyrystymisestä, sekä palamisen alkuun liittyvistä kemiallisista reaktioista. Sen kesto on ottomoottorissa 1-2 ms, eli 15-30 °kk (2500 rpm)

Huom! Palamisen alun reaktiot suuri jäähdyttävä tekijä, joka näkyy jopa painekuvaajassa.



Väli B-C Palaminen

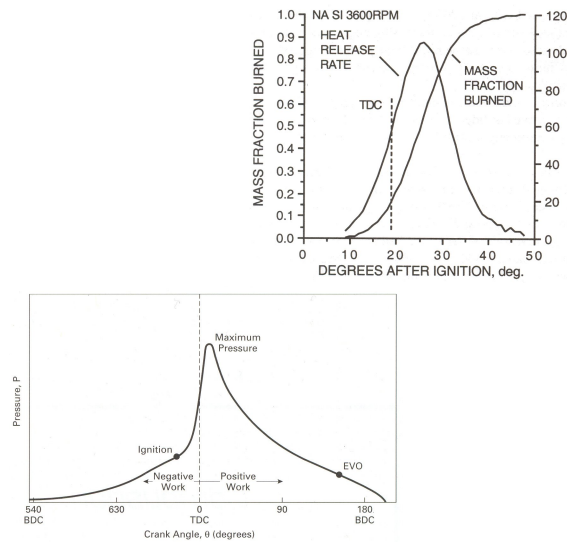
- Paineennousuvaiheen lakipiste (maksimipaine) selvästi jälkeen YKK:n (3...20 °kk)
- Nousukuvaajan jyrkkyys ei saa olla liian suuri (esim. ottomoottori 2...2,5 bar/ °kk)
- Nousukuvaaja ei myöskään saa olla liian loiva. Myös silloin nakutusvaara

Pisteestä C eteenpäin on jälkipalaminen, jolloin palotilassa on vain vähän happea. jälkipalamisen olisi päästösyistä oltava mahdollisimman vähäistä

Palorintaman eteneminen

Syttymisen jälkeen palaminen alkaa aluksi erittäin pienellä nopeudella, sillä lämpöhäviöt syttymiskohdan ympärillä olevaan seokseen ovat suuret.

Ensimmäistä vaihetta kutsutaan palorintaman kehittymiseksi ja sen aikana palaa noin 5-10 % polttoaineen määrästä.

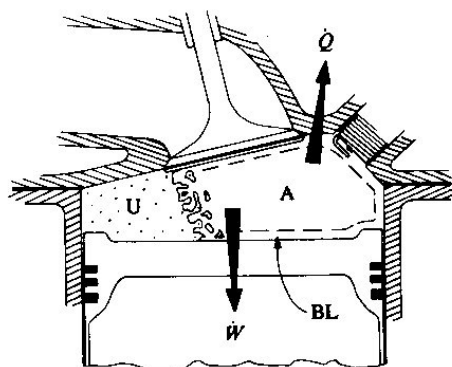


Palorintaman eteneminen

Palorintaman kehittymisen jälkeen palaminen etenee kohtuullisella nopeudella, mutta kuitenkin alkua huomattavasti nopeammin, yli palotilan.

Tänä aikana polttoaineesta palaa 80-90 % ja paine nousee selvästi. Tällöin moottorista saadaan runsaasti työtä ulos. Palaminen tapahtuu vaihtelevalla nopeudella riippuen olosuhteista palotilassa

Palonopeudesta ja siihen vaikuttavista asioista seuraavassa:

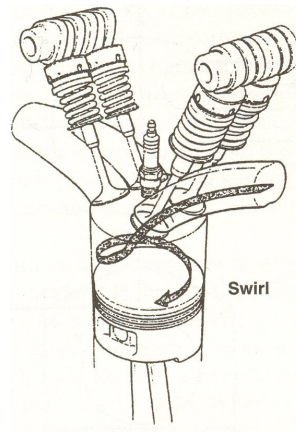


Turbulenssi ja palamisnopeus

Sylinterissä oleva ilmamassa ei pysy liikkumattomana, vaan siinä on paljon erilaisia liiketiloja, joita kutsutaan yhteisellä nimityksellä ”turbulenssi”

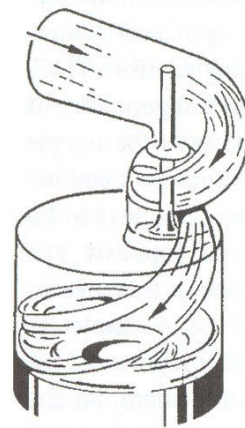
Liiketilat jaotellaan yleensä kolmeen osaan
Swirl, Tumble ja Squish.

Käsitellään ensi swirl



Swirl

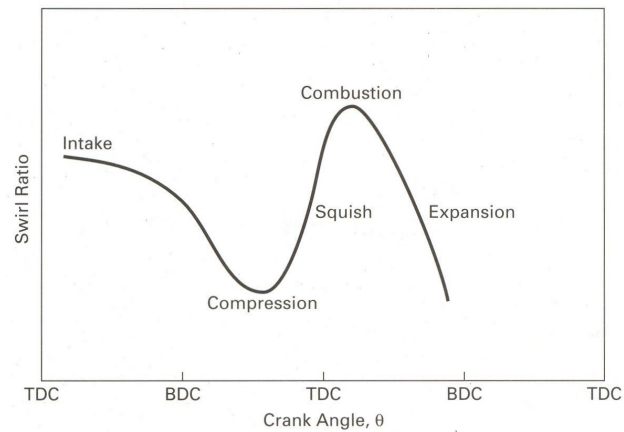
Swirl on vaakapyörre, joka voi muodostua myös itsestään, mutta joka usein aikaansaadaan tarkoituksellisesti. Swirl voidaan aikaansaada erilaisilla imukanavan muodoilla, tai esimerkiksi toisen imuventtiilin sulkemisella



Swirl

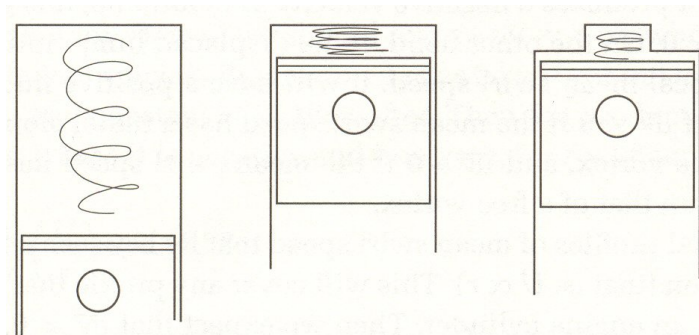
Swirl'in voimakkuus ei ole vakio, vaan se vaihtelee eri tahdeilla

Swirl voimistuu huomattavasti puristustahdin aikana. Voimistuminen johtuu osittain pyörteen halkaisijan pienenemisestä.



Swirl

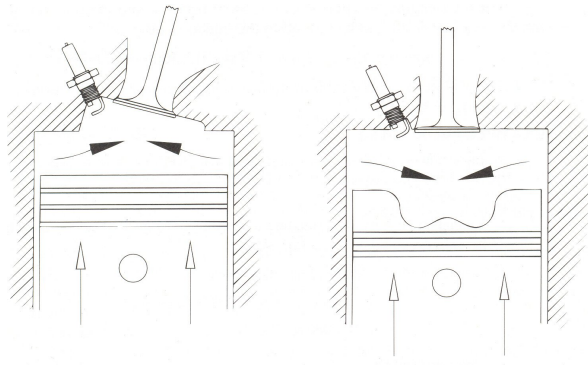
Usein palotila on kapeampi kuin sylinteri, joka pakottaa pyörteen kapenemiseen (Kiira Korpi-ilmiö)



Squish → Swirl

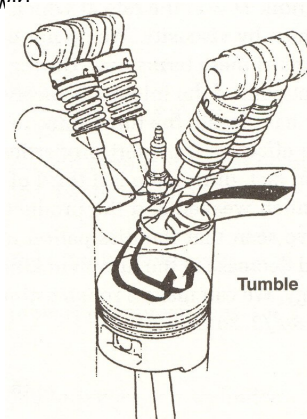
Squish on liike, joka aiheutuu seoksen puristumisesta sylinterin laidoilta keskelle männän lähestyessä yläkuolokohtaa.

Squish aiheuttaa myös swirl:in halkaisijan pienenemistä ja siten swirl:in voimistumista



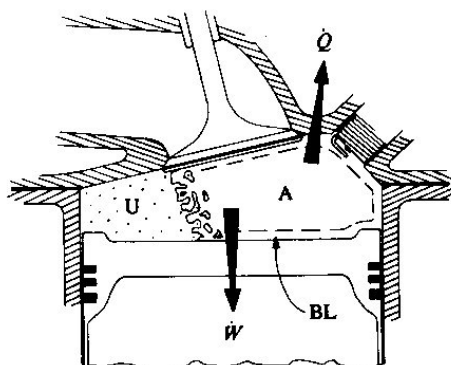
Tumble

Moottorissa voi olla myös pystypyörrettä, mutta sitä käytetään lähinnä laihaseoksella toimivien ottomoottoreiden yhteydessä. Normaalisti tumble aiheuttaa enemmän kitkaa kuin swirl.



Miksi turbulenssi on tärkeää?

Laminaarisessa virtauksessa liekin etenemisnopeus olisi hyvin hidas. Turbulenssilla aikaansaadaan noin 10 kertaa suurempi nopeus, sillä liekkiintaman etuosan pinta-ala on suuri.



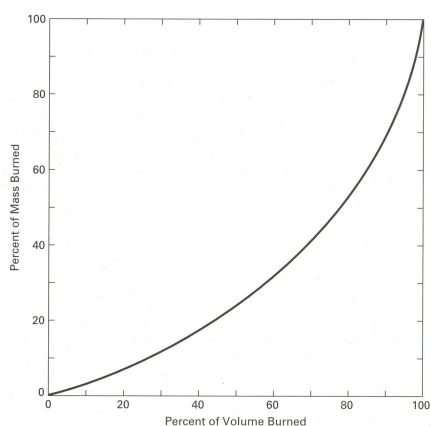
Liian hidas palorintaman eteneminen aiheuttaa nakutusta

Kun seos palaa, kasvaa jo palaneen osan (jäännöskaasut) lämpötila korkeammaksi kuin vielä palamattoman seoksen, vaikka paine on sama.

Näin palanut osa vaatii suuremman tilavuuden ja palamaton joutuu tyytymään pienempään. Kuvan mukaan 30 % massaosuus polttoaineesta ollessa palaneena, on kulutettu jo 60 % palotilan tilavuudesta.

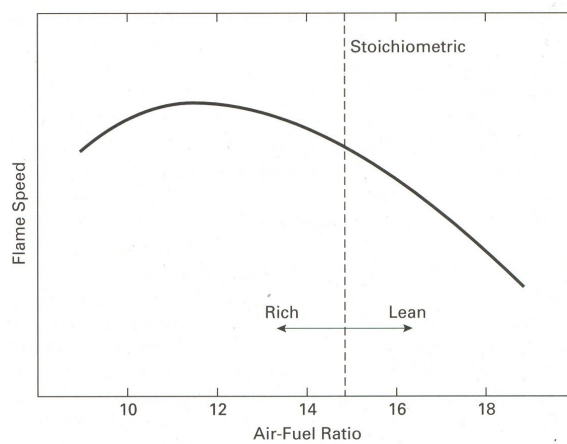
Näin vielä palamattoman seoksen lämpötila nousee hyvin voimakkaasti ja seos saattaa ylittää itsesyttymislämpötilan ja syntyy nakutusta.

Siksi riittävä palamisnopeus on tärkeää.



Mikä muu vaikuttaa palorintaman etenemisnopeuteen?

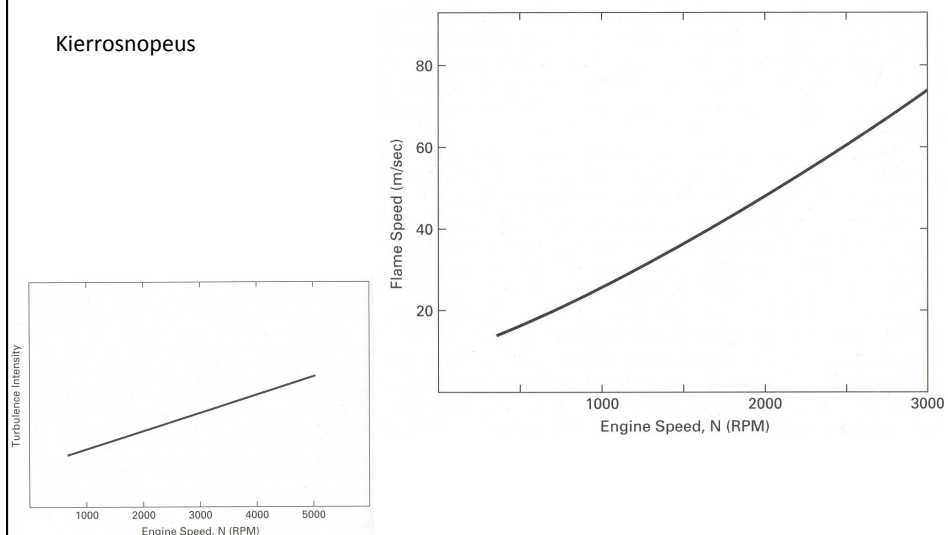
Seossuhde



→ mäntien sulaminen

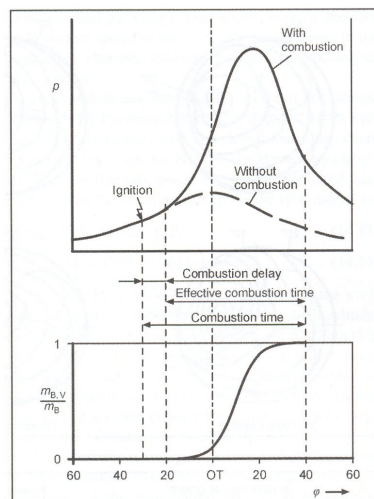
Mikä muu vaikuttaa palorintaman etenemisnopeuteen?

Kierrosnopeus



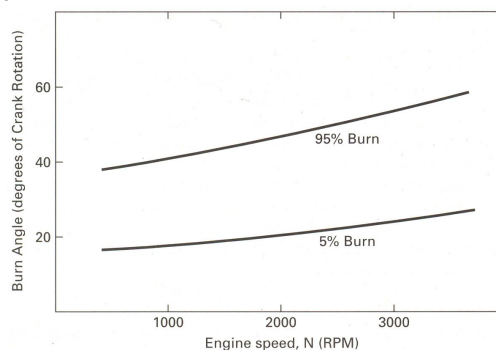
Teorian mukaan ihannetapauksessa polttoaineen massasta pitäisi kolmannes olla palanut YKK mennessä, ja lähes kaikki massa pitäisi olla palanut noin 15 astetta jälkeen YKK:n.

Silloin maksimipaine olisi 5°-10° JYKK ja moottorista saataisiin ulos eniten työtä.



Tyypillinen palamiskulma (burn angle) ottomoottorille on noin 25°. Jos palamisen halutaan olevan täydellistä 15° JYKK, täytyy sytytyksen tapahtua noin 20° EYKK (palorintaman kehittyminen vie aikaa noin 10°)

On huomioitava, että palamiskulma pysyy lähes vakiona kierrosluvun kasvaessa, sillä turbulenssin lisääntyminen nostaa palamisnopeutta.



Esimerkkilasku

Ottomoottorissa sytytysketki on 18° EYKK ja moottori pyörii käyntinopeudella 1800 rpm. Palamisrintaman kehittyminen kestää 8° ja palaminen halutaan loppuun 12° JYKK. Sylinterin halkaisija on 8,4 cm ja sytytystulppa on sijoitettu 8mm keskipisteestä **SIVUUN**. Palorintaman oletetaan leviävän ympyränmuotoisena tulpalta joka suuntaan.

Laske palorintaman etenemisnopeus

Palamiseen käytettävissä oleva kammengkulma-aika on 22°

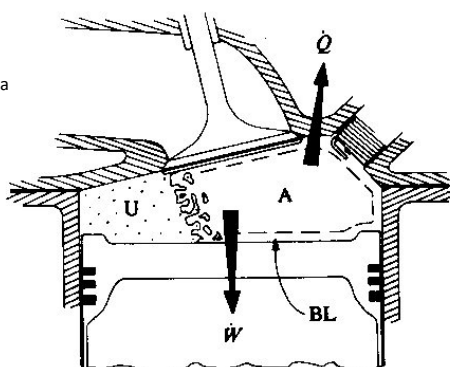
Vastaava sekunteina:
$$t = \frac{22^\circ}{\frac{360^\circ}{\text{kierros}} \cdot \frac{1800 \text{ kierrosta}}{60 \text{ sekuntia}}} = 0,00204s$$

Vaadittava kulkumatka:
$$D_{\max} = \frac{\text{syl halk}}{2} + \text{sivussiirto} = \frac{0,084}{2} + 0,008 = 0,050m$$

Vaadittava palorintaman nopeus:
$$v = \frac{D_{\max}}{t} = \frac{0,050m}{0,00204s} = 24,5 \frac{m}{s}$$

Palorintaman eteneminen

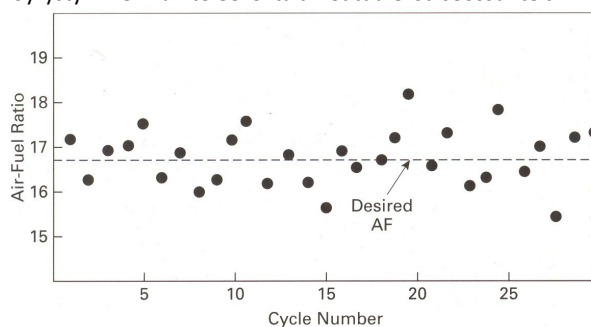
Jossain vaiheessa palamista turbulenssi vaimenee ja lämpöhäviöt ylittävät palamisesta syntyvän lämpömäärän, joten liekkirintama sammuu. Mikäli tämä tapahtuu huomattavasti ennen palotilan seinämiä, syntyy hiilivetypäästöjä. Näin tapahtuu erityisesti kylmäkäynnistyksen jälkeen, kun palotilan seinämät ovat kylmät



Vaihtelut palotapahtumassa

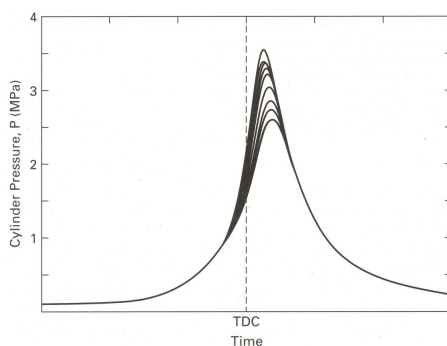
Moottorissa ei kaksi peräkkäistä työtahtia ole yleensä samanlaisia, vaan niissä esiintyy erilaista vaihtelua. Myös työtahdit eri sylinterien välillä ovat erilaisia.

Imusarja ja pakosarja eivät ole aivan samanlaisia kaikkien sylinterien osalta, joten volymetrinen hyötysuhde vaihtelee. Imukanavien lämpötiloissa on eroja, joten polttoaineen höyrystyminen vaihtelee. Siitä aiheutuu eroa seossuhteisiin.



Vaihtelut palotapahtumassa

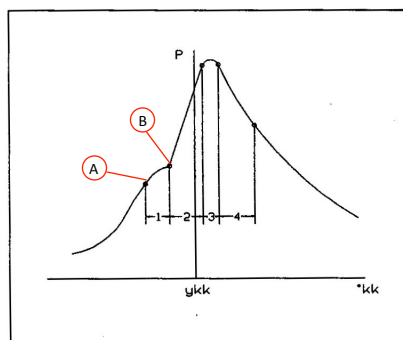
Kaikkein suurin ero tulee kuitenkin turbulenssieroista peräkkäisten työkiertojen välillä. Nopeinten palanut työkierto saattaa kestää vain puolet hitaimmasta työkierrosta. Siksi sytytyksen ajoituksessa on pidettävä tietty marginaali nakutusrajaan ja moottorista ei saada kaikkea hyötyä irti.



Joissain autoissa käyttöön otetut reaaliaikaisen feedbackin antavat sylinteripainetunnistimet pelastavat asian.

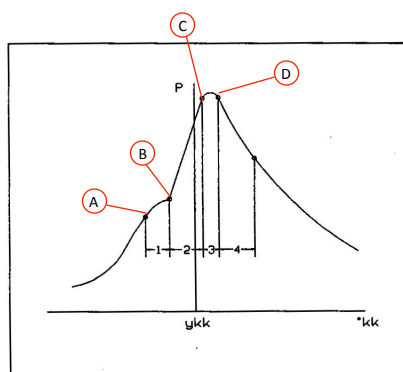
Palaminen dieselmoottorissa

- A Ruiskutuksen alkuhetki
- B Havaittavissa oleva paineen nousun alku



Syttymisviive A-B on dieselmoottorissa lyhyempi kuin ottomoottorissa.

Syttymisviiveen jälkeen seuraa esisekoittumispalaminen B-C (rapid combustion), jolloin kaikki syttymisviiveen aikana ruiskutettu polttoaine palaa nopeasti ja aiheuttaa korkean sylinteripaineen



Kolmas palamisvaihe on nimeltään diffuusiopalaminen C-D (controlled combustion), jolloin palaminen etenee ruiskutetun polttoaineen sekoittuessa happeen ja muodostaessa palamiskelpoisen seoksen

Viimeisenä vaiheena on myös dieselmoottorissa jälkipalaminen. Jälkipalamisen aikana seos on paikallisesti liian rikas ja silloin syntyy helposti hiukkasia

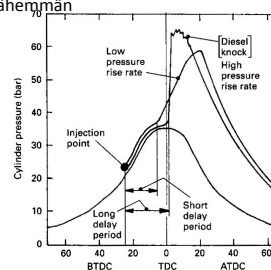
Huom! Syttymisviive kiusallinen tekijä, joka johtuu

- Polttoaineesta (ottomoottorissa seossuhteesta)
- Olosuhteista palotilassa (paine ja lämpötila)

Dieselöljy: Dieselin syttymisviiveen aikana kertyy runsaasti polttoainetta palotilaan. Syttymistä seuraa raju paineen nousu, kun polttoaine syttyy samanaikaisesti
→ Dieselin kylmänakutus

Syttymisjättämää ei voida myöskään pienentää kovin lyhyeksi ja tämä asettaakin rajoituksia dieselmoottorin maksimipyörintänopeudelle. Se voi olla esikammiokoneissa 5000...6000 rpm ja suoraruiskutteisissa yleensä hieman vähemmän

Bensiini: Syttymisviive aiheuttaa ennakonsäädön tarvetta



Syttymisen ehdot

1 Seossuhteen oltava syttymiskelpoinen

2 Ainakin yhdessä kohdassa palotilaa on saavutettava syttymislämpötila

	Kaasu % ilmassa	Syttymislämpötila [°C]
Bensiini	0,6...8	300
Etanoli	3,5...15	420
Metanoli	5,5...26	450
Dieselöljy	0,6...7,5	250

3 Jotta palaminen voisi jatkua, on palamisen seurauksena synnyttävä riittävästi lämpöä (lämpöhäviöt sylinterin seinämiin suuria)

Sytytystavat

"vierassytytys" Otto

- Sytytysenergia tuodaan ulkoa
- Minimi energiantarve optimiolo-
suhteissa hyvin pieni: 1...3 mJ
Varmuuden vuoksi tuotu energia
yleensä monisatakertainen
- Huom! Mitä laihempi seos, sitä
suurempi sytytysenergiatarve

"itsesytytys" Diesel

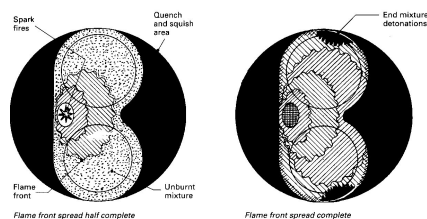
- Puristuspaine nostaa sylinterin
kaasulämpötilan niin korkeaksi,
että syttymislämpötila ylitetään
- Kylmäkäynnistys ongelma, erityi-
sesti esikammiokoneilla
Tarvitaan:
 - Korkea puristussuhde ...24
 - Hehkutulpat

Ottomoottorin nakutus

- Miten nakutus syntyy?

Olosuhteet palotilassa voivat olla sellaiset, että liekkirintaman edetessä seoksen palamaton osa joutuu palavassa seoksessa tapahtuvan paineen ja lämpötilan nousun vuoksi niin suuren säteily- ja painevaikutuksen kohteeksi, että vielä palamatonta seosta saavuttaa itsesyttymislämpötila. Tällöin seoksen palamaton osa syttyy kaikkialta palamisrintamaa odottamatta, jolloin syntyy nopea paineen ja lämpötilan nousu.

Nopeasta palamisesta on seurauksena kaasuseoksessa äänennopeudella etenevä paineaalto, joka kulkiessaan seinämästä seinämäänsä saa aikaan äänen, jota kutsutaan nakutukseksi.



Nakutuksen esiintymistaajuus

Äänen nopeus kaasussa on: $v_a = \sqrt{\frac{c_p}{c_v} \cdot R \cdot T}$

$$\frac{c_p}{c_v} = 1,35$$

Kun:

$$R = 0,290 \frac{kJ}{kg \cdot K}$$

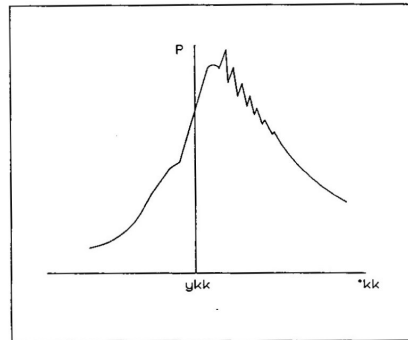
$$T = 2000K$$

Saadaan $v_a = \sqrt{1,35 \cdot 0,290 \cdot 1000 \cdot 2000} = 885 \frac{m}{s}$

Jos sylinterin halkaisija on 88,5 mm, on äänen taajuus:

$$f = \frac{v_a}{D} = \frac{885}{0,0885} = 1000 Hz = 10 kHz$$

ääni on siis taajuudeltaan sellainen, että se on ihmiskorvin kuultavissa



Nakutuksen vaarat:

- Kiertokangen laakerit koville
- Kansi (ja kannentiiviste) vaurioituvat
- Mäntä ylikuormittuu
 1. Mekaanisesti
 2. Termisesti



3 keskeistä asiaa nakutuksesta:

- Nakutuksen esiintyminen ja estäminen käytöntehtämisesti
- Moottoritekniset keinot nakutuksen estämiseksi
- Polttoaineen nakutuskestävyys

1. Käyttötilanne

2 nakutustilannetta, molemmissa täyskuorma (=kaasu pohjassa)

Kiihdytys matalilla kierroksilla

→ Vaihdetaan pienemmälle vaihteelle
(kilinä varoittaa)

$$P = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot M$$

Diagram showing the formula $P = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot M$ with red arrows pointing to each variable: P is labeled "Sama", n is labeled "Kasvaa", and M is labeled "Pienenee".

→ tehollinen keskipaine putoaa
ja nakutus häipyy

Huippunopeudella ajaminen

• Nakutus vaikea havaita, koska
ajotilanne meluista

→ korkeakantaisempi bensini

→ sytytys myöhäisemmälle

→ painehiippu putoaa
-teho putoaa
-P-aineen kulutus kasvaa

2. Moottoritekniikan keinot

- Puristussuhde (e) → Nakutusvaara kasvaa
- $e = 8 \dots 9 \dots 10 \dots 11 \dots 12 \dots 13 \dots 14$
→ Tavoite
- 95 E 98 E oktaaniluvun korotustarve
- Riippuvainen palotilaratkaisusta

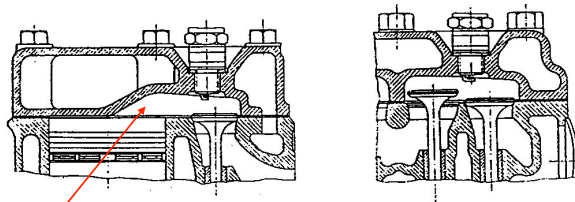
•Tulpan sijoitus

- lähelle kuuminta kohtaa (= pakoventtiilin viereen)
- mahdollisimman keskelle palotilaa

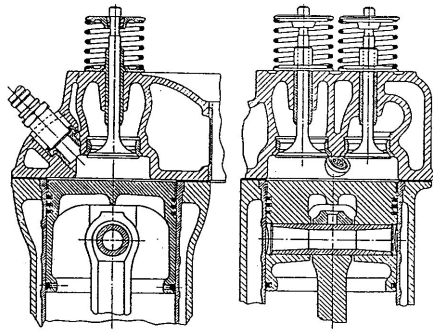
2. Moottoritekniikan keinot

Palotilan muoto

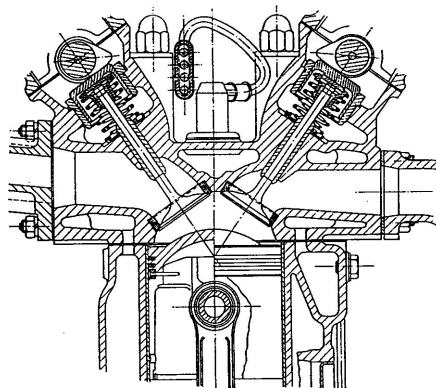
- niin "kompakti" kuin mahdollista
- muutamia perusratkaisuja



Sivuventtiilipalotilassa palorintaman matka etäisimpään nurkkaan pitkä



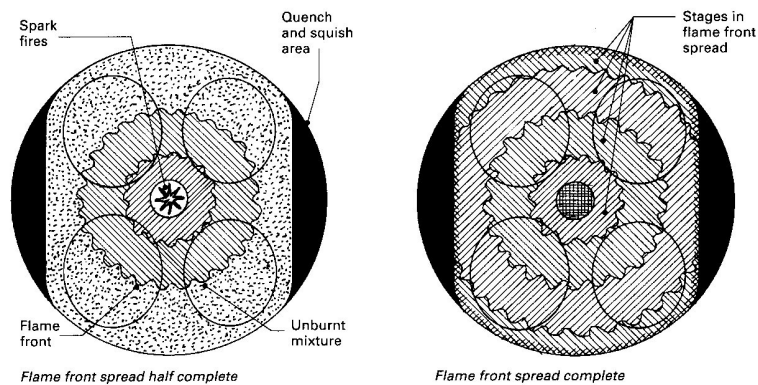
"Ammepalotilassa" liekin etenemismatka kohtuullisen lyhyt. Lisäksi voimakas "squish" nopeuttaa palorintaman etenemistä



Hemi -palotila ja siitä edelleen kehitetty pentroof -palotila erittäin hyviä vastustamaan nakutusta. Neliventtiilikansissa pentroofin eri variaatiot määrääviä

Palotilojen riskinä palamattoman polttoaineen joutuminen pakokanavaan overlapiin aikana.

Pentroof palotilassa matka sytytystulpalta palotilan etäisimpäänkin laitaan on kohtuullisen lyhyt, joten palamaton seos ei ehdi kuumenemaan liikaa ennen kuin palamisrintama saavuttaa sen.



2. Moottoritekniikan keinot

Pyörteisyys

Pyörteilevässä ilmassa palorintaman etenemisnopeus huomattavasti laminaarista ilmaa nopeampaa.

Ilman pyörteily saadaan aikaan kanavien, sekä männän muotoilulla.

Jäähdytys

Palotilan jäähdytys niin tehokkaaksi kuin mahdollista

Erityisesti tulpan ja pakoventtiilin ympäristö jäähdytettävä hyvin

Nakutuksenestojärjestelmä

3. Polttoaine

Oktaaniluku = nakutuskestävyyden mitta

RON

MON

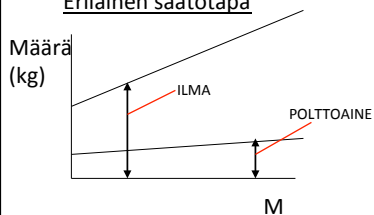
$$\text{Nakutusindeksi} = \frac{RON + MON}{2}$$

Nakutuskestävyys mitataan moottorikokeilla, joissa polttoaineen nakutuskestävyyttä verrataan ns. vertailupolttoaineen nakutuskestävyyteen. Vertailupolttoaine sisältää iso-oktaania, jonka oktaaniluku on 100, sekä normaaliheptaania, jonka oktaaniluku on 1.

Kun nakutuskestävyydeltään samanlainen vertailupolttoaine on löytynyt, määrittää sen iso-oktaanipitoisuus polttoaineen oktaaniluvun. Jos vertailupolttoaineessa on vaikkapa 97 % iso-oktaania, tulee mitattavan polttoaineen oktaaniluvuksi 97

Seossuhdeasioista:

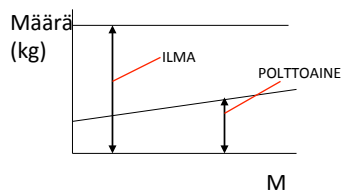
Ottomoottori ja dieselmoottori
Erlainen säätötapa



Ottomoottorissa
"määräsäätö"

Polttoaineen ja ilman seossuhde
~ vakio

Koneesta enemmän momenttia
seoksen massavirran lisäyksellä



Dieselissä
"laatusäätö"

Seossuhde voi vaihdella paljonkin

Momenttia lisää seossuhdetta rikastamalla

Huom! Turboahdetuissa moottoreissa myös
ilman määrä lisääntyy ahtopaineen noustessa

Seossuhderajat

$$\text{Seossuhde: } \lambda = \frac{L}{L_0} =$$

Todellisuudessa käytetty ilmamäärä
polttoainekilon polttamiseksi

Teoreettisesti tarvittava ilmamäärä polt-
toainekilon polttamiseksi

L_0 = 14,7 Bensiini
= 14,5 Dieselöljy
= 6,4 Metanoli
= 9,0 Etanoli

Jos

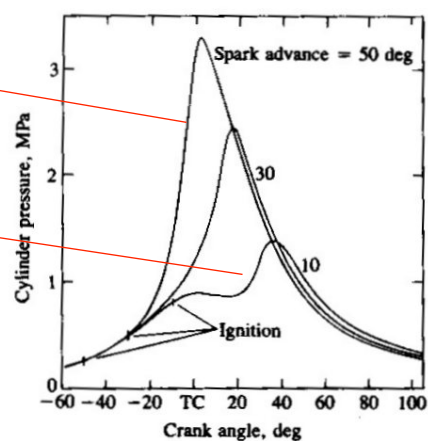
- ☒ $\lambda < 1$ seos "rikas"
☒ $\lambda > 1$ seos "laiha"

Oikea sytytysennakko

- Liian aikainen sytytys
- Hillitön painehiippu
 - rasisusta sekä männille, että laakerelle
 - Kammen vääntötilanne epäedullinen

- Liian myöhäinen sytytys
- Hyötysuhde huononee
 - Ei haluttua tehoa
- + Moottori rasittuu vähemmän

Nykytekniikalla päästään lähes
optimiarvoihin kaikissa tilanteissa



Yleiset säätöperiaatteet

1. Rikkaalla seoksella syttymisviive ajallisesti ~vakio
→ Ennakkoa lisättävä $f(n)$

Tavoiteltu ennakkomuoto on saavutettu kohtuullisesti
keskipakosäätimen avulla

2. Laiha seos syttyy ja myös palaa hitaammin kuin rikas
 - Moottori toimii laihimmalla seoksella osakuormilla (paljon jäännöskaasuja)
 - Imusarjan alipaine kuvastaa kuormitustilannetta

Alipainesäätimellä on perinteisesti hoidettu seossuhteen
huomioon ottava ennakonsäätö
→ Alipainetieto juuri kaasuläpän alapuolelta

Nykymoottoreissa hoidetaan säätö ohjainlaitteeseen tallennetun
ennakonsäätökartan mukaisesti huomioon ottaen sekä kierros-
luku, että moottorin kuormitustaso

Esimerkkilasku

Aikaisemmassa esimerkissä ollut moottori käy nyt 3000 rpm. Kierrosluvun noustessa myös turbulenssi nousee siten, että palamisnopeuden nousu on 85 % kierrosnopeuden noususta. Palamisrintaman kehittyminen vaatii edelleen saman 8° . Lasketaan sytytysketkettä on aikaistettava, jotta päästään samaan palamisen loppuhetkeen.

$$\text{Palamisnopeus : } v = \frac{0,85}{3000/1800} * 24,5 \frac{m}{s} = 34,7 \frac{m}{s}$$

$$\text{Aikaa palamiselle on : } t = \frac{D_{\max}}{v} = \frac{0,050m}{34,7 \frac{m}{s}} = 0,00144s$$

$$\text{kammenkulma palamisen aikana} = \frac{3000}{60} \cdot 360 \cdot 0,00144 = \underline{25,92^\circ}$$

Joten palorisintaman etenemisen täytyy alkaa $13,92^\circ$ EYKK ja kipinän tultava $21,92^\circ$ EYKK. Sytytysennakkoa siis lisättävä $3,92^\circ$

