

Epänormaali palaminen kaasumoottorissa

Sylinteripainekäyrän analyysi

Materiaalitekniikka

diplomityö

Pertti Suominen

Ohjaaja

Professori Pekka Peljo

Tarkastaja

Professori Oskar Karlström

25.08.2022

Turku

Turun yliopiston laatu järjestelmän mukaisesti tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu

Turnitin OriginalityCheck -järjestelmällä.



Diplomityö

Oppiaine:	Materiaalitekniikka
Tekijä:	Pertti Suominen
Otsikko:	Epänormaali palaminen kaasumoottorissa. Sylinteripainekäyrän analyysi
Ohjaaja:	Professori Pekka Peljo
Tarkastaja:	Professori Oskar Karlström
Sivumäärä:	68 sivua
Päivämäärä:	25.08.2022

Tämän työn aiheena on tutkia ottoprosessilla toimivan kaasumoottorin palamistapahtuman laadun vaikutusta sylinterin painekuvaajaan. Epänormaalien palamisen tilat usein jaetaan nakutukseen ja pintasytymiseen. Tässä tutkielmassa keskitytään nakutukseen. Nakutus tapahtuu joissakin moottorin käyttötilanteissa ja ilmiö tunnetaan metallisen kilahtavasta äänestään.

Työ johdattaa polttomoottorista kiinnostuneen lukijan nakutustutkimuksen toimintaympäristöön ja ongelmakenttään. Matka kulkee historiasta nykypäivään. Polttomoottorin nakutusta on tutkittu enemmän kuin sata vuotta. Nakutus on ilmiö, jonka mittaamisen taso on keskustelunalaista ja epäselvä. Työssä tarkastellaan nelitahtista ottomoottoria kaasumuotoisella polttoaineella. Ottomoottorin alkuvuosina nakutustutkimuksen tavoitteena oli vakavan moottorivaurion välttäminen. Nykyisin nakutus on havaittava jo heikosta signaalista, koska vaatimuksena on pitää moottorin päästöt alle normien kaikissa tilanteissa.

Nakuttavan ja tasaisen ajon sylinteripainekuvaajia vertaillaan kolmella kierrosluvulla 550, 650 ja 750 RPM ja useilla kuormitustasoilla. Tavoitteena on tehdä havaintoja normaalin ja epänormaalien, nakuttavan palamisen välillä. Vertailu tehdään sekä visuaalisesti että algoritmien osoittamien analyyttisten pisteiden avulla. Määrällisten tutkimusmenetelmien ohella käytetään laadullisia menetelmiä, kuten asiantuntijoiden kertomukset varikoilta ja konehuoneista. Tämä tuo asiaan näkökulmaa moottorikehityksen nykytilasta.

Tuloksina esitetään algoritmit analyyttisten pisteiden laskemiseksi. Näitä pisteitä käytetään sekä ryhmän sisäiseen että ryhmien väliseen vertailuun. Ryhmät muodostuvat samalla kierrosluvulla ja kuormitustasolla rekisteröidyistä tapahtumista. Työssä esitellään palamisen alkupisteen havaitseva (Start Of Combustion, SOC) algoritmi, tätä tarkoitusta varten sovellettu. Perinteisesti käytetty nakutusindeksi (Maximum of Pressure Oscillations, MAPO) on myös mukana. Nakutusilmiön mittaamisen mahdollisuuksia ja mittaustasoa pohditaan.

Kiitokset

Tämän työn syntyyn ovat vaikuttaneet lukuisat ihmiset. Ensin haluan kiittää työn ohjaajaa Professori Pekka Peljoa. Hänen viileän asiallinen näkökulmansa on tuonut tähän esitykseen luettavuutta ja laatua. Kiitos lopputarkastuksen tekemisestä Professori Oskar Karlströmille. Wärtsilä Finland Oyj:lle erityinen kiitos luvasta käyttää dataa. Työ- ja harrastekaverini tutkimusprojekteista, varikoilta ja konehuoneista kiitos, te olette opastuksellanne vahvasti vaikuttaneet käsityksiini moottorissa tapahtuviin ilmiöihin. En mainitse nimiä, teitä on monta ja joku voisi unohtua. Myös Turun yliopiston opetus- ja muu henkilökunta ansaitsevat kiitokset. Vaikeissa korona olosuhteissa on kaikki kuitenkin onnistunut. Kiitokset menee myös kurssikavereilleni, Turun yliopiston uuteen materiaalitekniikan diplomi-insinööriohjelmaan ensimmäisiksi valituille kahdeksalle innokkaalle oppijalle, nykyisille huippuosajille, Erikille, Erkalle, Kimmolle, Nooralle, Samulille, Severille, Viiville ja Villelle. Täältä tullaan kohti uusia seikkailuja, kohti työelämää. Viimeisenä, mutta ei vähäisimpänä kiitän vapaiden ohjelmistojen kehittäjiä. Tämä työ on tehty käyttäen avoimen lähdekoodin ohjelmistoja GNU, Linux, GNU Octave, LibreOffice ja Zotero.

Sisällysluettelo

1 Johdanto.....	5
2 Ottomoottorin kaasumuotoiset polttoaineet.....	8
2.1 Kaasumoottorin hyötysuhde.....	10
2.2 Wobbe indeksi ja metaaniluku.....	11
3 Epänormaali palaminen kaasumoottorissa.....	14
3.1 Nakutustutkimuksia.....	16
3.2 Nakutusmallit.....	22
4 Tavoitteet ja aineisto.....	24
4.1 Mittaukset.....	24
4.2 Kertomuksellinen aineisto.....	29
5 Algoritmit ja havainnot.....	32
5.1 Paine kuvaajat 550 RPM.....	34
5.2 Paine kuvaajat 650 RPM.....	42
5.3 Paine kuvaajat 750 RPM.....	53
6 Tulokset.....	64
6.1 Keskustelu.....	65
Lähdeluettelo.....	67

1 Johdanto

Nelitahtinen ottomoottori ja -prosessi ovat kehitetyt 1870-luvulla. Nämä ovat nimetyt Nicolaus August Otton mukaan. Kyseessä on sisäisen palamisen moottori, jonka muuttuvatilavuuksisen prosessitilan muodostavat sylinteri ja sylinterin sisässä liukuva mäntä. Hyvin yleinen ratkaisu on kytkeä mäntä männäntäpin muodostaman akselin välityksellä kiertokangen yläpäähän. Saman kiertokangen alapäähän on laakeroitu kampiakselin polvi. Tällä järjestelyllä syklinen prosessi on kytketty kiertoliikkeeseen, joka on luonnostaan syklinen. Nelitahtinen viittaa kierto-prosessiin, jossa prosessin vaiheet imu, puristus, työ ja poisto toteutetaan kampiakselin kahden kierroksen 720° aikana. Syklisen prosessin edellyttämä kaasujen vaihto toteutetaan tyypillisesti pakko-ohjatuilla lautasen mallisilla istukkaventtiileillä. Tässä tutkielmassa käsitellään ainoastaan nelitahtisesta ottomoottoria, josta käytetään myös nimitystä kaasumoottori kaasumuotoisen polttoaineen mukaan.

Edellä kuvattuun moottorin perusrakenteeseen lisätään hyvin usein turboahdin. Se kasvattaa kompleksisuutta, mutta parantaa moottorin tehoa ja polttoainetaloutta. Ahtimen perusrakenne on yksinkertainen. Samalle akselille on asennettu kaksi siipipyörää turbiini ja kompressori. Pakokaasukanavaan asennettua turbiinia pyörittää pakokaasujen liike-energia. Akselin välityksellä myös imukanavaan asennettu kompressori pyörii. Kompressorin pyörimisen aiheuttama paineen nousu, suurentaa moottorin haukkaaman ilman määrää. Ilmamäärän kasvaessa polttoaineen määrää ja moottorista saatavaa tehoa voidaan kasvattaa.

Nicolaus Otton kehittämä moottori, rasvainen, meluisa ja pahan hajuista käryä tuottava laite oli historiansa alkuaikoinaan arvostettu, koska se teki työtä. Se tuotti myös ympäristölle haitallisia aineita, päästöjä. Päästöistä ei tuohon aikaan huolta kannettu. Kun moottorin tehoa ja hyötysuhdetta pyrittiin parantamaan puristussuhdetta nostamalla, yhä useammin todettiin palamistapahtuma, joka poikkesi normaalipalamisesta merkittävästi. Tätä poikkeavaa palamista alettiin sanoa nakutukseksi, koska tapahtuma synnytti metallisen kilahtavan äänen. Pian huomattiin nakuttavan käynnin olevan hyvin haitallista moottorin rakenteille. Voimakas eroosio, metallihiukkasten irtoaminen prosessitilan seinämistä oli tosiasia. Historiallinen lähtökohta nakutustutkimukselle on kohtalokkaan moottorivaurion välttäminen. Nykyisin tavoitteena on päästöjen määrän vähentäminen ja tästä johtuen nakutus on tunnistettava jo hyvin heikkona signaalina.

Laajamittainen fossiilisten polttoaineiden käyttö on johtanut tilanteeseen, jossa maapallon ilmasto lämpenee. Historiallisesta perspektiivistä tarkastellen lämpeneminen tapahtuu nopeasti. Poliittisella aktiivisuudella ja sopimuksilla päästörajoituksista pyritään hidastamaan muutoksen nopeutta. Kaasumoottoreiden rakentajilla ja käyttäjille asetetaan uusia, yhä tiukkenevia päästörajoituksia- ja maksuja. Kaasumuotoinen polttoaine on edullinen hiilidioksidipäästöjen vähentämisen suhteen, koska polttokaasu sisältää tyypillisesti enemmän vetyä ja vähemmän hiiltä, kuin polttoneste. Palamisen huippupaine on pidettävä riittävän matalana, jotta vältytään typpioksideilta (NOx). Polttoaineen laatu määrää rikkioksidien (SOx) määrän. Nakutus on kontrolloitava jo hyvin heikosta signaalista, jotta päästöt pysyvät pieninä. Nakutus on moottorin prosessitilassa tapahtuva, nopeasti ja kiihtyvästi energiaa vapauttavan reaktion herättämä akustinen resonanssi. Se on haitallinen, koska se sekoittaa liekkirintamana etenevän palamisprosessin palanutta ja palamatonta seosta, aiheuttaen kohonneita hiilivety (HC) -päästöjä.

Kaasumoottoreita tarvitaan nyt ja tulevaisuudessa. Vaikka julkisuudessa joskus esitetään, että kaikki sähköistyy, niin tuskin näin yksipuoliseksi energiasektori tulee muuttumaan. Valtakunnanverkossa pitää kulutuksen ja tuotannon olla tasapainossa jokaisena ajan hetkenä. Tarvitaan säätövoimaa ja -voimalaitoksia, johon kaasumoottori on hyvä vaihtoehto. Moottorikelpoista biokaasua voidaan valmistaa yksinkertaisella mätänemisprosessilla jätteistä. Liikennekäytössä erityisesti kuorma-autossa kaasumoottori on kilpailukykyinen vaihtoehto. Esimerkiksi öljynjalostuksessa syntyy aina prosessin sivutuotteena kaasuja, joita ei voida käyttää hyödyksi. Nämä kaasut poltetaan soihtuna ilmassa. Kaasumoottorissa tällaiset sivutuotteet voidaan muuttaa energiaksi.

Tämä tutkielma koostuu kolmenlaisista aineksista: kirjallisuustutkimuksesta, nakutuksen käytännön ammattilaisten, konemestarien ja virittäjien kertomuksista ja kirjoittajan omista yhden havaintopisteen sylinteripaineen mittauksista ja havainnoista. Ammattilaisten kertomusten osalta kyseessä ovat kirjoittajan muistelmat erilaisista ammatillisista tilanteista vuosien varrelta.

Työn tavoitteena on kaasumoottorin sylinteripainekäyrien tarkastelu ja vertaaminen tasaisen ja nakuttavan palamisen tapauksissa. Vertailu tehdään kolmella kierrosluvulla 550, 650 ja 750 kierrosta minuutissa (Revolution Per Minute, RPM) ja useilla kuormitustasolla. Työn kestäessä kehitetään palamisen alkuhetken (Start Of Combustion, SOC) havaitseva

algoritmi. Nakutuksen voimakkuuden mittana kirjallisuudessa yleisesti käytetty indeksi MAPO (Maximum of Pressure Oscillations) toteutetaan kahtena lukuarvona, positiivisena ja negatiivisena maksimina. Paineen nousukäyrän ja laskukäyrän kaarevuuden vaihtopisteet rekisteröidään. Näiden viiden pisteen amplitudi ja ajanhetki rekisteröidään. Nämä analyttiset pisteet ovat ratkaisevassa asemassa, kun palamistapahtuma luokitellaan normaaliksi tai epänormaaliksi. Toisin sanoen pisteet edustavat palamistapahtuman piirteitä.

2 Ottomoottorin kaasumuotoiset polttoaineet

Polttoaineen reagoidessa hapen kanssa vapautuu energiaa. Happilähteenä käytetään normaalisti ilmakehän ilmaa. Poltettava kaasu ja ilma sekoitetaan ja syötetään moottorin sylinteriin. Ilma/polttoaine -suhde on kaikissa tilanteissa oltava määrättyllä alueella, jotta seos syttyisi ja palaisi tasaisesti. Pois alueelta oleva suhde aiheuttaa epänormaalia palamista, palamattomia työtahteja, mekaanisia vaurioita ja roimasti normit ylittäviä päästöjä.

Seos, jossa kaikkia palavia aineita kohti on kemiallisesti juuri oikea määrä ilman sisältämää happea, sanotaan stoikiometriseksi. Tämä suhde on kullekin polttoaineelle ominainen. Joidenkin polttoaineiden stoikiometriset ilma/polttoaine -suhteet on esitetty taulukossa 1.

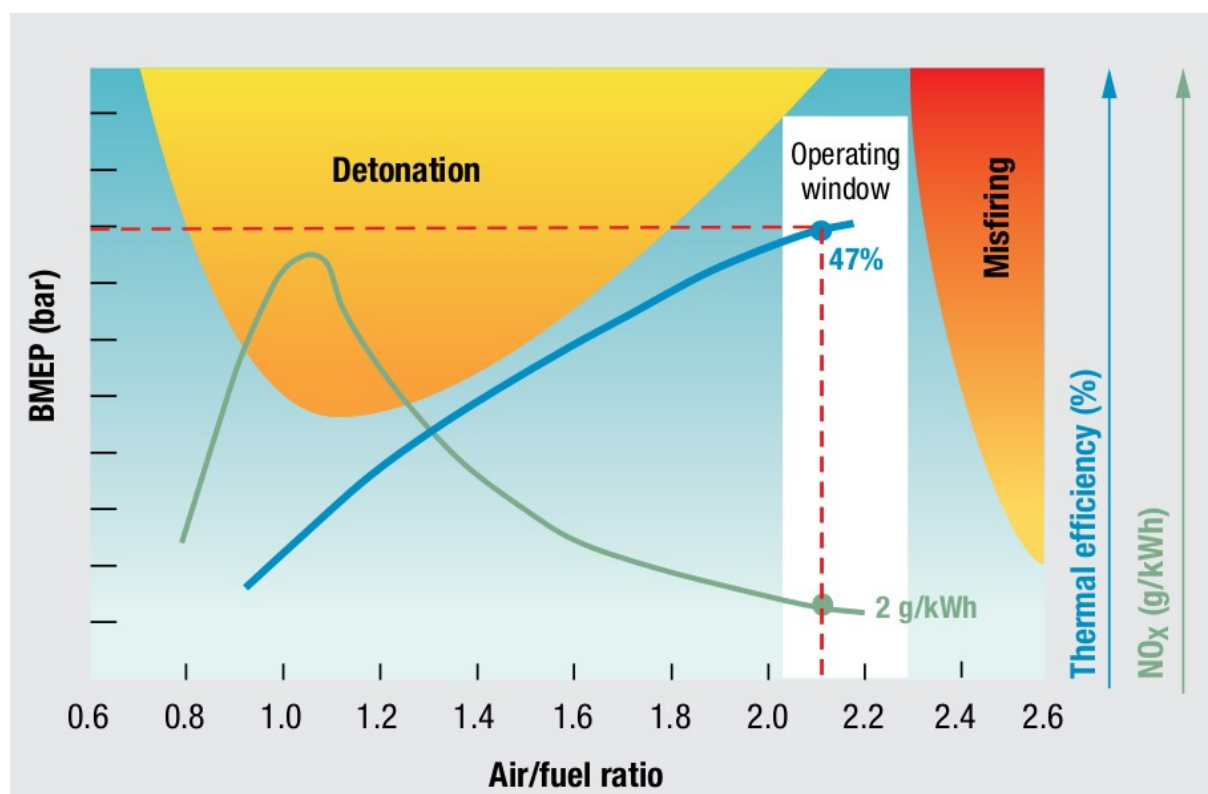
Taulukko 1: Eräiden ilma/polttoaine -seosten stoikiometrisiä suhteita. ”Standardi” ilman suhteellinen kosteus on 50 % lämpötilassa 20 °C. Lähde (Oakey, 2015).

Polttoaine	Kaava	Stoikiometrinen ilman tarve, m ³ /m ³
Metaani	CH ₄	9,68
Etaani	C ₂ H ₆	17,06
Propani	C ₃ H ₈	24,66
Butaani	C ₄ H ₁₀	32,67
Vety	H ₂	2,38
Hiilimonoksidi	CO	2,39

Toisin sanoen stoikiometrisellä tarkoitetaan ilmakertoimen arvoa $\lambda=1$. Jos moottori suunnitellaan ilmakertoimelle 1 se johtaa korkeaan palamisen huippulämpötilaan ja tätä kautta suuriin typpioksidin (NO_x) -päästöihin ja myös suuriin hiilimonoksidi (CO) - sekä hiilivety (HC) -päästöihin, johtuen epätäydellisestä palamisesta. Tällöin jälkikäsitteilylaitteiston on huolehdittava päästönormien saavuttamisesta. Nykyaikainen ottomoottori usein suunnitellaan polttamaan laihaa seosta (lean-burn), jonka ilmakerroin, λ , on luokkaa 1,6–2,1. Näin suurilla ilmakertoimen arvoilla sytytysvarmuus jää huonoksi ja se korjataan hyväksyttävälle tasolle sijoittamalla tulppa esikammioon (pre-chamber), jossa seos on rikkaampi tai kerrostetulla (stratified) syötöllä, jossa tulpan läheisyyteen järjestetään rikkaampi seos. Laihan seoksen etuna on palamisen huippulämpötilan suhteellisen alhainen taso ja tätä kautta typpioksidipäästöjen alhainen taso ja moottorin lämpökuormituksen aleneminen sekä myös seoksen puristuskestävyyden merkittävä parannus. Puristuskestävyydellä tarkoitetaan nakutustaipumuksen pienentymistä seosta puristettaessa. Laiha seos yhdessä turboahtimen kanssa mahdollistaa moottorille suuren rakenteellisen tehon. Ei ole harvinaista, että

turboahdettu kaasumoottori kehittää tehon, joka on viisi kertaa suurempi, kuin ilman ahdinta saavutettava teho.

Erään moottorivalmistajan esitys (*Wärtsilä 50 DF Engine Technology, 2009*) ilmakertoimen (Air/fuel ratio) ja tehollisen keskipaineen (BMEP) vaikutukset moottorin hyötysuhteeseen ja typpioksidien määrään on esitetty kuvassa 1. Huomion arvoista on seossuhteen kapea arvoalue (Operating window). Tehollinen keskipaine (Brake Mean Effective Pressure, BMEP) kertoo sen, millä painetasolla ottoprosessi keskiarvoisesti toimii.



Kuva 1: Sylinterin tehollinen keskipaine (BMEP), terminen hyötysuhde (Thermal Efficiency) ja typpioksidipäästöt (NO_x) ilmakertoimen (Air/fuel ratio) funktiona. Huomion arvoista on seossuhteen kapea arvoalue (Operating window) epänormaalin palamisen (Detonation) ja sytytyshäiriön (Misfiring) välttämiseksi. Lähde Wärtsilä Oyj.

Teholliselle keskipaineelle on useita samankaltaisia, mutta eri asiaa tarkoittavia määrittelyjä. Sekaannusten välttämiseksi on nämä samankaltaiset käsitteet erotettava toisistaan. Jarru tehollinen keskipaine (Brake Mean Effective Pressure, BMEP) mitataan kuormittamalla moottoria testijarrua vasten. Indikoitu tehollinen keskipaine brutto (Gross Indicated Mean Effective Pressure, IMEP_g) mitataan puristus- ja työtahdin sylinteripaineista.

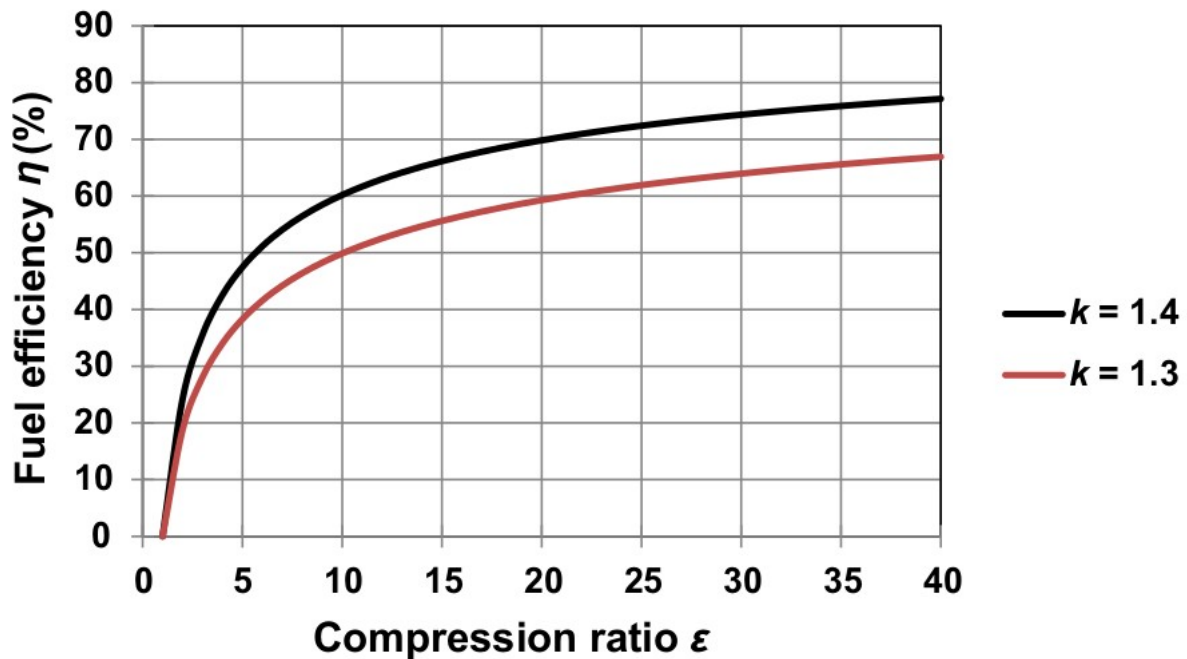
Indikoitu tehollinen keskipaine netto (Net Indicated Mean Effective Pressure, IMEP_n) mitataan kaikkien neljän tahdin sylinteripaineista. Pumpkauksen tehollinen keskipaine (Pumping Mean Effective Pressure, PMEP) mitataan imu- ja poistotahdin sylinteripaineista. $PMEP = IMEP_g - IMEP_n$.

2.1 Kaasumoottorin hyötysuhde

Kaasumoottorin suunnittelussa tavoitteena on mahdollisimman korkea hyötysuhde, koska näin saavutetaan pienet hiilidioksidipäästöt ja hyvä käyttötalous. Hyötysuhde η on riippuvainen puristussuhteesta ϵ , siis suurimman ja pienimmän sylinteritilavuuden suhteesta. Yksinkertaistettuna hyötysuhde on esitetty lähteessä Fuel Flexible Energy Generation: Solid, Liquid and Gaseous Fuels, (Oakey, 2015) seuraavasti:

$$\eta = (1 - (1/\epsilon)^{(k-1)}) * 100 \%$$

jossa k on väliainetta kuvaava tekijä, joka palamiskaasuille on luokkaa 1,32. Kuvassa 2 on asia esitetty graafisesti.



Kuva 2: Hyötysuhde (Fuel efficiency) η puristussuhteen (Compression ratio) ϵ funktiona erilaisilla palamiskaasujen k arvoilla. Kaasumoottorissa arvoksi k valitaan esimerkiksi 1,32. Lähde Oakley, 2015.

Kaasumoottorin rakenteellisen hyötysuhteen parantamista puristussuhdetta nostamalla rajoittavat palamistilan pienentämisen vaikeudet ja nakutustaipumuksen kasvaminen puristussuhteen noustessa.

2.2 Wobbe indeksi ja metaaniluku

Erilaisten kaasumuotoisten polttoaineiden vertailemiseksi on kehitetty Wobbe indeksi (WI), joka on määritelty seuraavasti:

$$WI = H / \sqrt{(\sigma_{\text{gas}} / \sigma_{\text{air}})}$$

Wobbe indeksi WI on lämpöarvo H jaettuna kaasun ja ilman tiheyksien suhteen neliöjuurella standardi olosuhteissa (NTP). Jos kaasun tilavuusvirta ja Wobbe indeksi pysyvät vakioina samassa lämpötilassa ja paineessa, pysyy myös kaasun poltossa vapautuva lämpövirta vakiona. Jos kaasun koostumuksen muuttumisen myötä Wobbe indeksi muuttuu, on tilavuusvirtaa muutettava vastaavasti, jotta lämpövirta pysyisi vakiona. Wobbe indeksi voidaan laskea joko ylemmästä tai alemmasta lämpöarvosta. Taulukossa 2 on lähteestä Fuel

Flexible Energy Generation: Solid, Liquid and Gaseous Fuels, (Oakey, 2015), eräiden kaasumuotoisten polttoaineiden Wobbe indeksit laskettuina ylemmästä lämpöarvosta. Wobbe indeksi on hyödyllinen mitta arvioitaessa polttoaineen vaihtokelpoisuutta, mutta se ei anna takuuta vaihdettavuudesta. Kaasumuotoisille polttoaineille on usein ominaista jatkuva ja ajoittain nopeakin koostumuksen vaihtelu. Kun Wobbe indeksille asetetaan sallittu vaihteluväli, esimerkiksi +3 %, se toimii laatumittarina.

Taulukko 2: Eräiden polttoaineiden Wobbe indeksit. Lähde Oakey, 2015.

Polttoaine	Kaava	Wobbe indeksi MJ/m ³
Metaani	CH ₄	50,69
Etaani	C ₂ H ₆	65,12
Propaani	C ₃ H ₈	76,9
Butaani	C ₄ H ₁₀	87,83
Vety	H ₂	48,83
Hiilimonoksidi	CO	12,18
Biokaasu (60% metaani, 40% CO ₂)		23,36

Metaaniluku (Methane number, MN) on toinen tärkeä mitta kaasumuotoisen polttoaineen ominaisuuksille. Taulukossa 3 on joidenkin aineiden metaaniluvut lähteestä Fuel Flexible Energy Generation: Solid, Liquid and Gaseous Fuels, (Oakey, 2015). Puristuskestävyys, josta käytetään myös nimitystä nakutuskestävyys, on ominaisuus, jota metaaniluku kuvaa. Metaani on vertailuaine, jolle on valittu indeksi 100. Seokset, joissa on metaania ja hiilidioksidia ovat metaaniluvultaan yli 100. Hiilidioksidin ominaislämpökapasiteetti on korkea ja näin aine toimii nakutuksen estoaineena. Hiilidioksidi sitoo lämpöä pelkistyessään ja vapauttaa hapettuessaan.

Taulukko 3: Eräiden polttoaineiden metaaniluvut. Lähde Oakey, 2015.

Polttoaine	Kaava	Metaaniluku
Metaani	CH ₄	100
Etaani	C ₂ H ₆	44
Propaani	C ₃ H ₈	32
Butaani	C ₄ H ₁₀	8
Vety	H ₂	0
Hiilimonoksidi	CO	75
Biokaasu (60% metaani, 40% CO ₂)		140

Kaasumuotoinen polttoaine on tyypillisesti seos, käsittäen lukuisia komponentteja. Seoksen metaaniluvun laskemiseen ei ole yleistä standardia olemassa. Metaanilukujen arvioimiseksi on olemassa useita, keskenään vertailukelvottomia moottorivalmistajakohtaisia

tapoja. Esimerkkinä tästä on kuvassa 3 erään moottorivalmistajan nettilaskurin syötesivu. (“Wärtsilä methane number calculator,” 2022).

Methane CH_4	<input type="text" value="100"/> mol%	Neo-pentane (2,2-Dimethylpropane) $neo-C_5H_{12}$	<input type="text" value="0"/> mol%
Ethane C_2H_6	<input type="text" value="0"/> mol%	Mix-hexane $Mix C_6H_{14}$	<input type="text" value="0"/> mol%
Propane C_3H_8	<input type="text" value="0"/> mol%	Mix-heptane $Mix C_7H_{16}$	<input type="text" value="0"/> mol%
Iso-butane (2-Methylpropane) $i-C_4H_{10}$	<input type="text" value="0"/> mol%	N-Octane $n-C_8H_{18}$	<input type="text" value="0"/> mol%
N-butane $n-C_4H_{10}$	<input type="text" value="0"/> mol%	Carbondioxide CO_2	<input type="text" value="0"/> mol%
Iso-pentane (2-Methylbutane) $i-C_5H_{12}$	<input type="text" value="0"/> mol%	Carbonmonoxide CO	<input type="text" value="0"/> mol%
N-pentane $n-C_5H_{12}$	<input type="text" value="0"/> mol%	Hydrogen H_2	<input type="text" value="0"/> mol%
Ethylene C_2H_4	<input type="text" value="0"/> mol%	Nitrogen N_2	<input type="text" value="0"/> mol%
Propylene C_3H_6	<input type="text" value="0"/> mol%	Hydrogen sulfide H_2S	<input type="text" value="0"/> mol%
		Total	100mol%
<input type="button" value="CALCULATE >"/>			
Wärtsilä Methane number (WMN)			<input type="text" value="0"/>
Propane Knock Index (PKI)			<input type="text" value="0.0"/>

Kuva 3: Nettilaskurin syötesivu moottorivalmistajakohtaisen metaaniluvun laskemiseksi.
Lähde Wärtsilä Oyj.

Metaaniluvultaan yli kahdeksankymmentä olevat polttoaineet soveltuvat hyvin ja yli kuusikymmentä ovat sovellettavissa ottomoottorikäyttöön. Polttoaineen soveltuvuus kaasumoottorikäyttöön on aina riippuvainen useista tekijöistä ja on jokaisessa tapauksessa tarkistettava erikseen.

3 Epänormaali palaminen kaasumoottorissa

Tässä tutkielmassa kaasumoottori on ottoprosessilla toimiva sisäisen palamisen moottori (Internal Combustion Engine, ICE), jonka prosessitila muodostuu sylinteristä ja sylinterin sisässä liukuvasta männästä. Muitakin rakenneratkaisuja on moottoriteknologian pitkässä kehityskaaressa esitetty, mutta niitä ei käsitellä tässä. Prosessitila on panostyyppinen kemiallinen reaktori. Ennen palamistapahtumaa, mäntä puristaa polttoaine ilma seosta ja tulppaan johdettu sähkövaraus sytyttää seoksen. Sytytys tapahtuu ennen kuin mäntä on saavuttanut aseman, jossa reaktorin tilavuus on pienin. Tätä asemaa sanotaan yläkuolokohdaksi (Top Dead Center). Se millä kammengkulman asteluvulla tapahtuva sytytys hetki, puhutaan sytytysennakosta (Spark Advance) on optimaalinen nettoenergiatuoton ja puhtaan palamisen kannalta on vaikea kysymys. Suljetun säätöpiirin (Closed Loop Control) käyttö on yleisesti ottaen mahdotonta. Sen sijaan yleinen ratkaisu on käyttää säätökarttaa (Map-Based Controller). Säätökartassa useista tulomuuttujista esimerkiksi kierrosluku, kuormitustaso, polttoaineen ja ilman määrä, ilmanpaine ja lämpötila muodostetaan lähtömuuttujan, sytytysennakon arvo.

Palaminen kaasumoottorissa tapahtuu seuraavasti: Polttoaine ja ilma sekoitetaan imujärjestelmässä ja johdetaan imuventtiilin kautta sylinteriin, jossa seos kohtaa edellisen palamisen jäännöskaasut. Puristustahdin aikana kaasuseos, loppukaasu (end-gas) jatkaa sekoittumistaan ja puristuu. Ennen yläkuolokohtaa palotilaan sijoitetun tulpan kärkien väliin johdetaan sähkövaraus. Seos syttyy tulpan kärkien välissä ja jatkaa palamistaan liekkirintamana, edeten kaikkiin vapaisiin suuntiin aina palotilan laitoihin asti, jossa liekkirintama sammuu. Palaminen jatkuu jossakin muodossa aina poistotahdin loppuun asti. Pako- tai jälkikäsitteilyjärjestelmässä tapahtuu viimeiset palamisreaktiot. Tämän jälkipalamisen hallinta on usein tärkeä osa moottorisuunnittelua matalan päästötason saavuttamiseksi.

Moottorialan referenssiteos Internal Combustion Engine Fundamentals, (Heywood, 1988) jakaa merkittävät epänormaalien palamisen tilat kahteen luokkaan: nakutus ja pintasytytys. Pintasytytys tapahtuu, kun jokin kuuma pinta tai karstahiutale palotilassa aiheuttaa ohjaamattoman sytytyksen. Nakutus on epänormaalien palamisen ilmiöistä tärkein. Nakutusilmiö on saanut nimensä itsesyttymistapahtumaan tyypillisesti liittyvästä metallisen

kilahtavasta äänestä (knock). Nakutus tapahtumasta Heywood, 1988 s. 375 kertoo seuraavaa, vapaasti käännettynä:

*”Tulpan kärkivälistä ilma/polttoaine -seoksen palaminen etenee liekkirintamana kohti palotilan laitoja. Seoksen lämpötila, paine ja tiheys kasvavat. Ilmasta, polttoaineesta ja jäännöskaasuista muodostuvan loppukaasun (end-gas) sisässä, jossakin pisteessä tapahtuu kemiallisia reaktioita, joissa vapautuu energiaa **nopeasti ja kiihtyvästi**. Tätä tapahtumaa sanotaan itsesyttymiseksi. Syntyy toinen liekkirintama. Näiden kahden liekkirintaman törmätessä ja yhteisvaikutuksena syntyy nakutus. Kyseessä on akustinen ilmiö. Palotila toimii akustisesti resonoivana ontelona.”*

Kaasumoottori toimii ottoprosessina, jonka termiseen hyötysuhteeseen vaikuttaa työtahdin loppu- ja alkutilavuuden suhde (expansion ratio). Hyötysuhteen maksimointi ja tätä kautta hiilidioksidipäästöjen minimointi vaatii puristussuhteen nostamista korkealle. Rajoittavana tekijänä tulee vastaan nakutustaipumuksen kasvaminen.

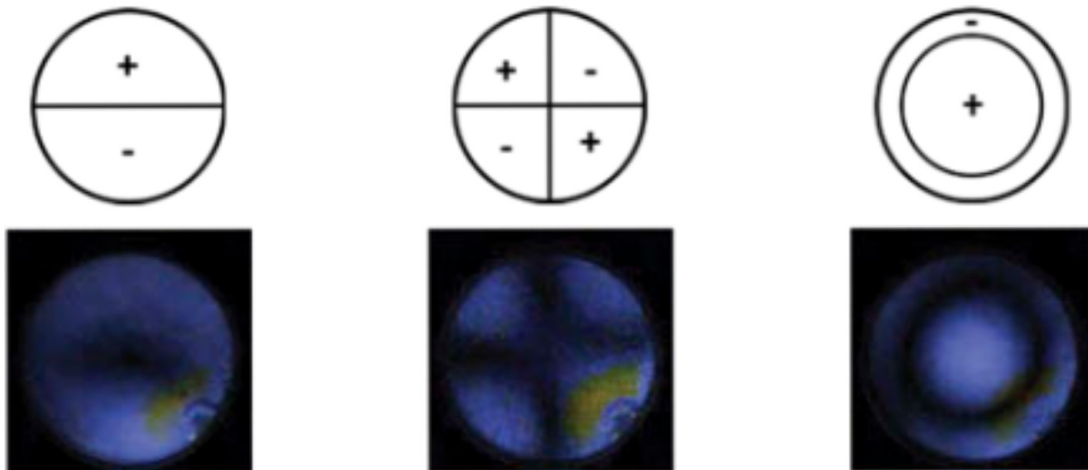
Kaasumoottori usein käytännössä suunnitellaan sellaiseksi, että joissakin ajotilanteissa nakutusta tapahtuu, mutta nakutuksen taso pidetään moottorimallikohtaisesti määritellyn siedettävän tason (borderline knock) alapuolella. Nakutusraja (Knock Limited Spark Advance, KLSA) kertoo suurimman mahdollisen sytytysennakon määrän ilman, että nakutus kasvaa yli haitalliseksi määritellyn tason. Toisin sanoen nakutuksen hillitseminen määrää sytytysennakon arvoa voimakkaammin kuin hyötysuhteen maksimoiminen. Palautuminen nakuttavasta ajosta tasaiseen ajoon tapahtuu seuraavasti: Sytytysennakkoa siirretään nopeasti selvä harppaus myöhemmälle. Tällöin nakutus normaalisti loppuu. Jos ei lopu, kuormitusta pitää vähentää. Nakutuksen loputtua sytytysennakkoa kasvatetaan hitaasti aina lähes — mutta ei aivan — nakutukseen johtaneelle tasolle asti. Paljonko on lähes, on tapauskohtainen asia ja mielenkiintoinen kysymys. Nakutusilmiön luonteeseen kuuluu, että tietyn raja-arvon jälkeen lisättäessä ennakkoa nakutuksen määrä kasvaa voimakkaasti. Voimistunut nakutus ei rauhoitu ennen kuin ennakko asetetaan selvästi myöhemmälle.

Moottorin suunnittelussa pyritään mahdollisimman väljiin polttoaineen laatuvaatimuksiin. Tämä lisää moottori-investoinnin taloudellista kiinnostavuutta ja myös käyttötilanteita, joissa moottori nakuttaa.

3.1 Nakutustutkimuksia

Datatieteessä tutkimuskohteena ei suinkaan ole data eikä signaali, vaan ilmiöt jotka ovat luoneet datan. Aikasarjadatasta, johon tämä tutkielma perustuu, käytetään yleisesti myös nimitystä signaali. Ilmiöt pitää pyrkiä ymmärtämään niin pitkälle kuin mahdollista. Historiallinen näkökulma on myös tärkeä, koska aikakautensa tutkijat ovat nykymittapuun mukaan alkeellisilla välineillä tavoitelleet samoja ilmiöitä, joita edelleen tavoitellaan. Tässä luvussa tutustutaan polttomoottorin sylinteripainedatan akustiseen kerrokseen ja ilmiöihin, jotka jättävät jälkensä tähän kerrokseen.

Nakutustilanteeseen liittyvää akustista värähtelyä on tutkittu ja myös saatettu näkyväksi. Työssä *Visualization of the Mode Shapes of Pressure Oscillation in a Cylindrical Cavity*, (He et al., 2015) on kuvannettu sylinterissä resonoivia paineaaltoja. Erilaisten värähtelytilojen kuvauksia on yksitoista kappaletta, joista esimerkkinä kuvassa 4 on kolme matalimman järjestysluvun tilaa. Kuvissa värähtelyn kupu- ja solmukohdat ovat näkyvissä värein sekä kaavioissa plus- ja miinusmerkein.



Kuva 4: Sylinterinmuotoisen ontelon kolme matalimman järjestysluvun akustisen värähtelyn tilaa. Kupu- ja solmukohdat erottuvat kuvassa värein sekä kaavioissa plus- ja miinusmerkein. Kuva lähteestä He et al., 2015.

Nakutus tai muu akustinen heräte saa aikaan palotilassa lukuisan joukon värähdystiloja, joiden voimakkuus ja vaihe ovat tapauskohtaisia. Yhdestä havaintopisteestä tämä näkyy paineen vaihteluna, joka muodostuu kaikkien osavaikutusten superpositiona. Herää kysymys, minkä pisteen painemittaus parhaiten kuvaa koko värähtelijän värähdystilaa. Tätä asiaa on

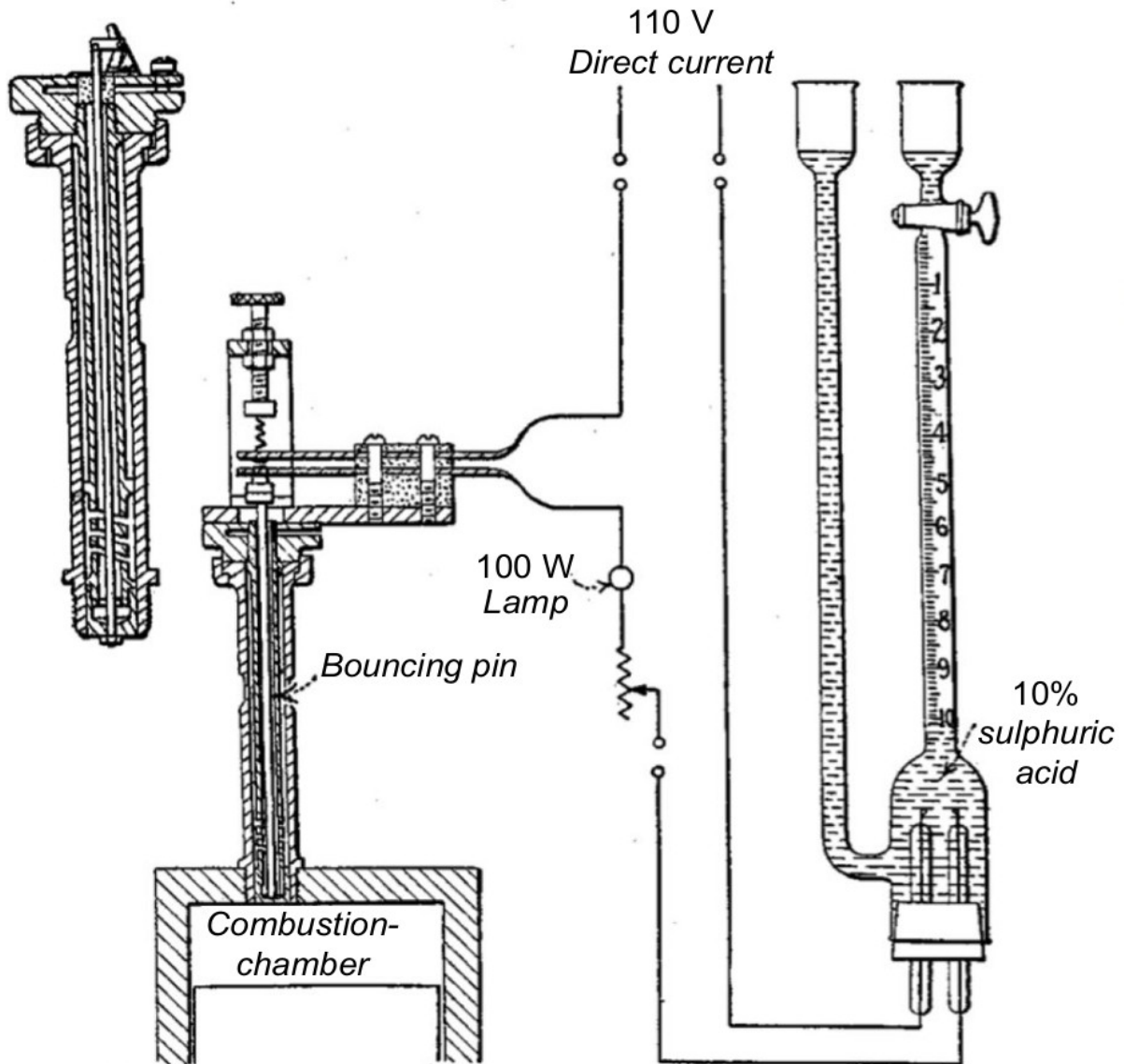
pohdittu julkaisussa Gasoline Engine Knock Analysis using Cylinder Pressure Data, (Brunt et al., 1998).

Sylinteripaineesta mitatun nakutuksen määrän lukuarvoon vaikuttavat merkittävästi kaikki mittaus- ja analyysiparametrit, kuten laskenta-algoritmi, nakutuksen raja-arvon määrittely, suodattimen määrittely, anturin ominaisuudet (erityisesti ominaistaajuus), palamistapahtumien lukumäärä, havaintoikkunan pituus, anturin asennustapa ja sijainti. Mittausarvot ovat toistettavissa ja vertailukelpoisia vain, jos mittausjärjestely ja moottorin malli pysyvät samoina. Paineen mittaus voidaan tehdä joko aika- tai kammenkulmatasossa. Kulmatason mittauksen etuna on skaalautuvuus käyntinopeuden suhteen. Vaikeutena on paineanturin näytteistyksen synkronointi kulma-anturin yksiköiden kanssa mittaustilanteessa. Tämän tutkielman data on aikatasossa.

Nakutus on yksi tärkeimmistä moottorikehitystä rajoittavista ongelmista. Asian keskeisyyttä ja tärkeyttä kuvaa se, että ottomoottorin nakutusta on tutkittu enemmän kuin sata vuotta. Tästä ajan jaksosta kerrotaan julkaisussa Knock: A Century of Research, (Corrigan and Fontanesi, 2021). Tämä vuosisadan kehityksen kattava katsaus on massiivinen käsittäen 405 viitettä. Tähän on poimittu tutkimustuloksia, jotka taustoittavat tämän tutkielman teemaa.

Katsauksen alusta alkaen 1920-luvulla, autonkuljettajat olivat hyvin tietoisia nakutuksesta, koska tuohon aikaan kuljettaja huolehti sytytysennakon vivun asettelusta ajon aikana. Kuormitustilanteeseen tai käyntinopeuteen nähden liian aikainen ennakko aiheutti epämiellyttävän metallisen kilahduksen moottorin käyntiin. Liian myöhäinen ennakko puolestaan aiheutti alentuneen tehon ja lisääntyneen lämmöntuoton. Myös voimakkaan nakutuksen moottorin rakenteita vahingoittava vaikutus (erosio) tiedettiin. Eri öljylähteistä peräisin olevat bensiinit havaittiin erittäin erilaisiksi nakutusherkkyydeltään. Bensiinin lisäaineiden, kuten lyijytetraetylin, nakutusta hillitsevä vaikutus tunnettiin. Myös jäähdytetyn pakokaasun kierrätys (Exhaust Gas Recirculation, EGR) ja vesisumun lisääminen polttoaine ilma seokseen tunnettiin nakutustaipumusta hillitsevinä toimina. Pakokaasun kierrätyksessä seoksen happipitoisuus alenee ja tätä myötä palamisen huippulämpötila alenee. Pakokaasun sisältämä hiilidioksidi toimii reaktiivisesti, hilliten nakutustaipumusta. Tietyn lämpötilan yläpuolella hiilidioksidi pelkistyy ja tietyn lämpötilan alapuolella hapettuu. Pelkistyminen on endo- ja hapettuminen eksoterminen reaktio.

Kunnioitusta herättäviä ovat sekä mittaustekniikka, että instrumentit, joita lähes vuosisata sitten käytettiin. Tästä esimerkkinä on kuva 5 lähteestä *Methods of Measuring the Antiknock Value of Fuels*, (Cummings, 1927). Nakutusilmaisin tyyppiä Dickinson/Midgley perustuu hyppivään (kimpoavaan) neulaan (Bouncing Pin). Ilmaisim toimii seuraavasti: Sylinteripaine vaikuttaa mittausmäntään, jonka päällä lepää neula. Kun sylinteripaineen nousunopeus on riittävän suuri, eli sylinteri nakuttaa, neula ponnahtaa irti männästä. Tämä irtoaminen sulkee virtapiirin. Osana virtapiiriä on kemiallinen reaktio, jonka tuottama kaasumäärä mitataan. Tuotettu kaasun määrä on integroitu mittaustulos. Integrointi ottaa huomioon sen, että nakutus ei tapahdu jokaisella työtahdilla. Tämän tyyppistä instrumenttia on yleisesti käytetty 1950-luvun puoliväliin asti. Tämän jälkeen instrumentin havaintokoskettimen korvasi magneettisuuteen perustuva havaintoelin. Sensorina käytettiin edelleen hyppivää neulaa.



Kuva 5: Hyppivä neula (Bouncing Pin) -tyyppisen nakutusilmäsimen rakenne. Palotilan (Combustion Chamber) paine vaikuttaa mittausmäntään, jonka päällä lepää hyppivä neula. Nakustapauksessa havaintokosketin sulkee virtapiirin ja kemiallisen reaktion tuottama kaasumäärä kertoo integroidun nakutuksen määrän. Kuva lähteestä Cummings, 1927.

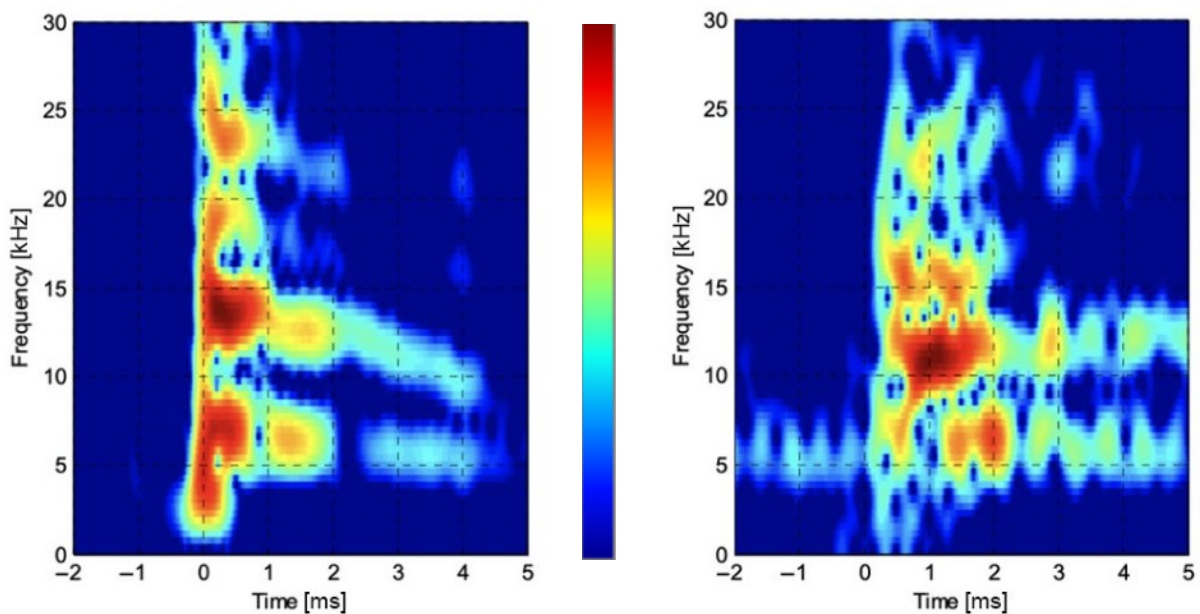
Kehitys jatkui ripeänä 1930-luvulla. Nestemäisten polttoaineiden oktaaniluvuiksi sanottu nakutuskestävyyden mitat standardisoitiin. Liekkirintaman eteneminen ottomoottorin nakuttavassa ja ei-nakuttavassa ajotilanteessa valokuvattiin. Kuvia on esitetty julkaisussa *Flame Temperatures Vary with Knock and Combustion-Chamber Position*, (Rassweiler et al., 1935). Kirjoittajat myös raportoivat nakustilanteeseen liittyvästä, kasvaneesta lämmön siirtymisestä sylinterin seinämiin. Kasvu johtuu akustisen värähtelyn lämmön siirtymistä tehostavasta vaikutuksesta. Julkaisussa mainitaan myös kohonnut valon tuotto nakutuksen

aikana. Tutkimuksessa käytetty kamera otti 5000 kuvaa sekunnissa. Voiteluöljystä peräisin olevia hehkuvia partikkeleita havaittiin. Myös itsesyttymisen tapahtumia kaukana liekkirintaman saavuttamattomassa osassa loppukaasun (end-gas) sisällä raportoitiin. Itsesyttymiskeskuksen sijainti vaihteli. Tämä osoitti, että kyseessä ei ole kuumasta pisteestä alkava pintasyttyminen vaan nakutus.

Tultaessa 1940-luvulle ottomoottoreiden suorituskyky ja käyttövarmuus kasvoivat huomattavasti. Myös polttoaineiden kehitys oli nopeaa. Tuotantomootoreissa alettiin ensimmäisiä kertoja käyttämään moottoriin rakennettua nakutuksenhallintajärjestelmää. Vuosikymmenen ehkä kauaskantoisin nakutuksen hallintaan liittyvä uusi asia on niin sanottu Miller-prosessi, joka on esitetty julkaisussa *Supercharging and Internal Cooling Cycle for High Output*, (Miller, 1947). Prosessi eroaa ottoprosessista siten, että imuventtiili sulkeutuu ennen kuin imutahti on päättynyt (Early Intake Valve Closing, EIVC). Tästä on seurauksena puristuksen loppulämpötilan aleneminen, joka tehokkaasti pienentää nakutustaipumusta.

Ympäristökysymykset saivat yhä suurempaa merkitystä 1970-luvulle tultaessa. Keskustelu ja kehitys ovat jatkuneet näihin päiviin asti. Päästöille asetettiin rajoituksia ja rajoitukset tiukkenivat kaiken aikaa. Aikaisemmin nakutustutkimuksen painopiste on ollut eroosion aiheuttaman moottorin totaalisen hajoamisen estäminen ja ominaistehon nostaminen. Nyt nakutus on tunnistettava jo heikkotasoisena, koska tavoite on puhtaan palamisen varmistaminen. Jos puhdasta palamista sylinterissä ei voi saavuttaa, on moottori varustettava jälkikäsitteilylaitteilla. Tuotantomootorin instrumentoinnissa vakioratkaisuksi muodostui kiihtyvyyssanturin asentaminen sylinterilohkoon. Isojen moottorien rakenteessa sylinterit ovat erillisiä eivätkä muodosta yhteistä lohkoa. Tällöin anturit asennetaan sylinterien kansiin. Kiihtyvyyssanturin signaali suodatetaan alipäästönä ja huippuarvon itseisarvo rekisteröidään. Arvon ylittäessä valitun raja-arvon, palamistapahtuma luokitellaan nakuttavaksi. Tämä indeksi on nimeltään MAPO (Maximum Amplitude of Pressure Oscillation). Tutkiessaan indeksin jakaumaa julkaisussa *Individual-Cylinder Knock Occurrence and Intensity in Multicylinder Engines*, (Leppard, 1982). Leppard päätyi tulokseen, että nakutusvoimakkuusindeksin jakauma poikkeaa normaalijakaumasta. Sekä viistoikkuutta (Skewness) että huipukkuutta (kurtosis) esiintyi. Hieman erilaisin menetelmin sylinteripaineen analyysiä ovat tehneet Checkel ja Dale. Julkaisussaan *Computerized Knock Detection from Engine Pressure Records*, (Checkel and Dale, 1986). He esittivät nakutukselle indeksin, joka perustuu sylinteripainesignaalin kolmanteen derivaattaan.

Nakutuksen tunnistusta voidaan tehdä joko sylinteripaineen tai moottorilohkon värähtelyn signaalista. Yleisesti voidaan sanoa, että painesignaali on laadultaan parempi, koska tutkimuskohteena on sylinterissä vellovat paineaallot ja niiden aiheuttaja. Värähtelysignaaliin sisältyvät myös moottorirakenteen resonanssien vaikutukset ja kulkuajan viive. Paineen suora mittaaminen, joskin vain yhdestä pisteestä, antaa hyvän prosessikuvan. Itsesyttymisen sijaintipisteen havaitsemiseen tarvitaan vähintään kolme havaintopistettä, kuten Liiva ja muut ovat tutkimuksessaan *Use of Multiple Pressure Transducers to Find In-Cylinder Knock Location*, (Liiva et al., 1992) asian demonstroineet. Sylinteripaineen ja moottorilohkon värähtelyn vertailevaa tutkimusta ovat tehneet Naber ja muut tutkimuksessaan *Analysis of Combustion Knock Metrics in Spark-Ignition Engines*, (Naber et al., 2006). Kuvassa 6 on vasemmalla painesignaalin ja oikealla värähtelyn aikataajuuskuvaajat. Värähtelykuvassa amplitudin maksimi on siirtynyt hieman matalammalle taajuudelle ja siinä on viive. Signaalin häiriöisyydestä kertoo se, että signaalilla on amplitudia jo ennen palamistapahtumaa, ennen ajanhetkeä 0 ms.



Kuva 6: Vasemmalla sylinteripaineen ja oikealla moottorilohkon värähtelyn aikataajuuskuvaajat. Värähtelysignaalin heikkouksia ovat viive ja häiriöisyys. Kuva lähteestä (Naber et al., 2006).

Painekuvaajasta on selvästi havaittavissa resonoivan taajuuden 12,5 kHz lasku aikavälillä 2-4 ms. Työtahdin edetessä ajanhetkestä 0 ms, palotilan tilavuus kasvaa, paine laskee, lämpötila ja äänen nopeus laskevat. Äänen nopeus on lähes riippumaton paineesta, mutta riippuu selkeästi lämpötilasta.

Satavuotisessa ottomoottorin nakutusta käsittelevässä katsauksessaan Knock: A Century of Research, (Corrigan and Fontanesi, (2021) mainitsevat kaasumuotoiset polttoaineet vasta viittauksella julkaisuun. Knock Characteristics of Liquid and Gaseous Fuels in Lean Mixture, (Ronney et al., 1991). Tosiasiassa ottomoottorin palamistapahtumassa polttoaine on aina kaasumuotoista. Polttoainejärjestelmän tehtävänä on sekoittaa ilma ja polttoaine kaasuseokseksi, joka on reaktiivisten aineiden suhteeltaan juuri oikea ja kauttaaltaan tasalaatuinen. On toki tunnettua, että joissakin tilanteissa seos voi sisältää poltto- tai voiteluaineen pisaroita. Tavoite on muodostaa kaasuseos, joka poltetaan.

Kaasumuotoiset polttoaineet ovat palamis- ja nakutusominaisuuksiltaan vaihtelevia ja vaihtelu voi tapahtua hyvinkin nopeasti. Moottori-investoinnin arvoa kasvattaa se, että hyväksyttävän polttoaineen laatuvaatimukset ovat väljät. Tällöin voidaan esimerkiksi öljynjalostusprosessissa sivutuotteena syntyvät kaasut hyödyntää sähkön tuotantoon. Olemassa oleva yleinen käytäntö on, että tällaiset prosessin sivutuotteena syntyvät kaasut poltetaan soihtuna ilmaan, vailla mitään hyödyllistä tarkoitusta.

3.2 Nakutusmallit

Palotilan akustisten ilmiöiden ymmärtämiseksi ja havainnollistamiseksi on kehitetty malleja. Tutkimuksessa The Physical Effects of Detonation in a Closed Cylindrical Chamber, (Draper, 1935) on esitetty akustiseen aaltoyhtälöön perustuvan malli. Kyseinen malli on esitetty nykyaikaisin merkinnöin julkaisussa Modeling of In-cylinder Pressure Oscillations under Knocking Conditions: Introduction to Pressure Envelope Curve, (Brecq and Corre, 2005) liitteessä A. Brecq ja Corre laajentavat Draperin mallia lisäämällä resonoivan värähtelyn vaimennuksen funktion. Osittaisdifferentiaaliyhtälöt on esitetty sylinterikoordinaatistomuodossa. Kuten tunnettua, osittaisdifferentiaaliyhtälöt ovat hankalia ratkaistavia ja ratkaisu on usein löydettävissä vain numeerisesti. Edellä mainittujen tutkijoiden työn tulokset ovat uskottavia, mutta taustaoletukset ovat käytännön tilanteita yksinkertaistavia.

Mallin laatiminen on vaativa tehtävä. Hyvä malli on yksinkertainen, mutta selittää tutkittavat ilmiöt kattavasti. Akustinen malli perustuu seuraaviin taustaoletuksiin: Palotila on vakio-tilavuuksinen sylinteri, äänen nopeus on vakio, herätteen alkukohta on sylinterin keskellä. Nakutustutkimuksen yhteydessä mallin soveltaminen on ongelmallista, koska nakutuksen alkupisteen sijainti on tuntematon tai sattuman sanelema. On tyydyttävä mittaustasoon, jossa prosessikuvana on sylinteripaineen vaihtelun arvo yhdessä havaintopisteessä. Pisteeseen paineen arvo muodostuu sylinteritilavuudessa vallitsevien värähdystilojen superpositiona.

4 Tavoitteet ja aineisto

Tässä tutkielmassa tavoitteena on verrata kaasumoottorin normaalin ja epänormaalin (nakuttavan) palamisen tilaa. Taustana on ottomoottorin toistasataa vuotta jatkunut nakutustutkimus. Huolimatta pitkästä aikajänteestä nakutuksen tutkimus aivan kuten itse ottomoottorikin ovat kehittyneet kautta vuosien.

Perinteisesti nakutus on tunnistettu moottorilohkoon tai kanteen asennetun kiihtyvyyssanturin (Accelerometer) signaalista. Nakutustunnistuksen alkuaikoina tavoitteena oli moottorivaurioon johtavan kehityskulun aikainen pysäyttäminen. Tähän kiihtyvyyssanturi soveltui hyvin. Nykyisin nakutus on tunnistettava heikkotasoisena, koska tavoitteena on palamisen hallinta niin, että kaikissa ajotilanteissa päästöjen määrä alittaa normien salliman rajan. Suora sylinteripaineen mittaus antaa tämän tavoitteen saavuttamiseksi hyvän prosessikuvan.

Tämä tutkielma ei anna ratkaisua satavuotiseen ongelmaan, vaan edustaa pientä pisaraa tuhansien tutkimusten valtameressä. On oletettavaa, että jatkossakin edistys tapahtuu pienin askelin. Tavoitteena on tehdä havaintoja eri ajotilanteissa signaalissa tapahtuvista muutoksista. Ajotilanteet kuuluvat kahteen luokkaan tasainen ja nakuttava. Toisin sanoen normaali ja epänormaali palaminen. Erilaisten kuormitustilanteiden ja kierroslukujen vaikutus signaaliin pitää myös selvittää. Pidemmän aikavälin tavoite on luoda koneoppiva järjestelmä, joka luokittelee palamistapahtumat. Tässä työssä kehitetään joukko algoritmeja, jotka löytävät analyttisiä pisteitä, jotka ovat kullekin palamistapahtumalle luonteenomaisia. Toisin sanoen analyttiset pisteet ovat tapahtuman piirteitä.

4.1 Mittaukset

Tutkimusaineistona käytetään olemassa olevaa, muiden tutkimusten yhteydessä rekisteröityä dataa. Mittaukset on tehty Wärtsilä Finland Oyj:n moottorilaboratoriossa Vaasassa marraskuussa 2009. Tämän tutkielman kirjoittaja on ollut mittaustapahtumassa mukana.

Data on saatettava säännönmukaiseen muotoon. Osa datasta on käyttökelvotonta, koska kaikki signaalit eivät ole tallentuneet, anturit ovat rikkoutuneet jne. Kaikki data on tarkastettava visuaalisesti ja kelvottomat osuudet on hylättävä. Yhteen ajoon liittyvä data on

yhdessä tiedostossa, käsittäen sadasta neljäänsataan moottorin työkiertoa. Ajon asetusarvoja ovat kierrosluku, tehotaso ja ajon tyyppi. Ajon tyyppejä ovat tasainen ja nakuttava. Siis normaalin ja epänormaalin palamisen ajo. Datan käsittelyn helpottamiseksi on kehitettävä funktio, joka parametrien ohjaamana poimii ajotiedostosta joukon työkiertoja, joihin kiinnostus kulloinkin kohdistuu. Nämä työkierrat numeroidaan juoksevasti. Nelitahtisen ottomoottorin työkierto on 720° . Tästä valittujen joukosta poimitaan, niin ikään parametrien ohjaamana jakso jota tutkitaan – siis tässä tapauksessa palamistapahtuma tai osa siitä. Käytettävissä oleva data sisältää 11000 työkiertoa.

Signaali

Sylinteripaineen signaalin voidaan katsoa muodostuvan kolmesta kerroksesta. Tarkastellaan ensin moottorin kammien kiertämisen vaikutusta sylinteripaineen muodostumiseen. Sylinteri ja kampiakseliin kiertokangen välityksellä liitetty mäntä muodostavat moottorin mekaanisen perusrakenteen.

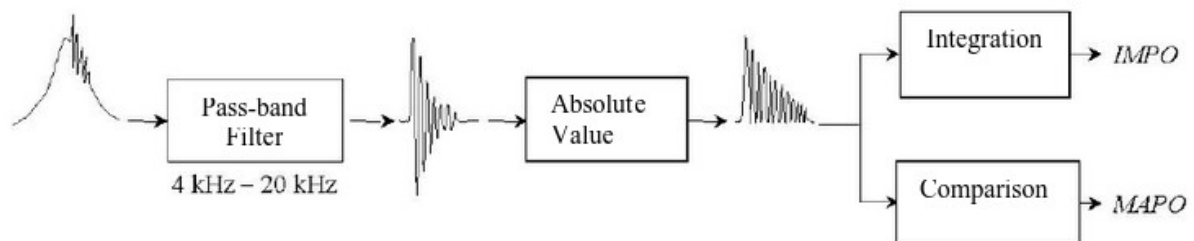
Tarkasteltaessa puristustahtia ja sitä seuraavaa työtahtia kaasunvaihtotarvetta palvelevat venttiilit ovat kiinni kaiken aikaa. Kun kampea kierretään, sylinterissä oleva kaasu puristuu kunnes saavutetaan yläkuolokohta. Tässä kohdassa mäntä pysähtyy. Jos kampea kierretään hieman lisää, sylinterissä oleva paineen alainen kaasu työntää mäntää edellään ja kiertää kampea. Energia, joka käytettiin puristukseen, vapautuu työtahtin aikana. Kitkan ja häviöiden vuoksi palautuminen ei ole täydellinen. Tarkasteltaessa sylinteripaineen signaalia edellä mainitussa tapauksessa havaitaan, että signaalin kuvaaja on kammien kulman 0° suhteen symmetrinen. Siis negatiivinen ja positiivinen energia ovat yhtä suuria. Kuvaajan pinta-ala vastaa energiaa. Tästä liikkeen synnyttämästä sylinteripainekäyrästä käytetään nimitystä motor-käyrä, johdettuna latinan liikettä tarkoittavasta sanasta.

Kun motor-prosessiin lisätään polttoaine/ilma -seoksen syttyminen ennen yläkuolokohtaa, painekäyrän luonne muuttuu kammien kulman 0° suhteen epäsymmetriseksi. Motor-käyrän päälle muodostuu vapautuneen lämpöenergian (Heat Release) aiheuttaman paineen nousun käyrä. Nettoenergiatuoton kannalta on oleellista se, millä ajanhetkellä sytytys tapahtuu ja minkälainen on palamisen energian tuoton funktio. Sekä motor- että lämpövaikutuskäyrät ovat unipolaarisia, eli signaalin vaihtelu on aina positiivista.

Edellä mainittujen motor- ja lämpövaikutuskerrosten päällä sijaitsee painesignaalin kolmas kerros. Tämä kerros rakentuu sylinterissä tapahtuvista akustisista ilmiöistä. Akustinen kerros on bipolaarinen, eli signaalin vaihtelu tapahtuu nollassa molemmilla puolilla. Bipolaarinen ja symmetrinen signaali ei lisää eikä vähennä kammien kiertoon tarvittavaa voimaa. Toisin sanoen akustisen kerroksen symmetrinen jaksollinen värähtely kasvattaa signaalin kompleksisuutta, mutta ei kasvata painekuvaajan pinta-alaa.

MAPO indeksi

Akustisen kerroksen suuruutta kuvaamaan on kehitetty indeksejä, joista ehkä tunnetuin on MAPO (Maximum of Pressure Oscillations). Kyseinen indeksi on esitetty julkaisussa *Modeling of In-cylinder Pressure Oscillations under Knocking Conditions: Introduction to Pressure Envelope Curve*, (Brecq and Corre, 2005). Prosessi jonka tuloksena MAPO indeksi muodostuu, on esitetty kuvassa 7. Sylinteripaineen signaali suodatetaan kaistanpäästönä ja tuloksesta otetaan absoluuttiarvo. Suurin arvo on MAPO indeksi.



Kuva 7: Prosessi MAPO indeksin muodostamiseksi. Sylinteripainekäyrä kaistanpäästö suodatetaan ja tuloksesta otetaan absoluuttiarvo. Arvon maksimi on MAPO indeksi. Kuva lähteestä (Brecq and Corre, 2005).

SOC-algoritmi

Palamisen alkuhetken (Start Of Combustion, SOC) havaitseva algoritmi on kehitetty työn kestäessä. Julkaisussa *Real-time start of combustion detection based on cylinder pressure signals for compression ignition engines*, (Fang et al., 2017) on esitetty kirjallisuuskatsaus, koskien sylinteripainesignaaliin perustuvia palamisen alkuhetken havaintomenetelmiä.

Menetelmät on jaettu neljään luokkaan: Joissa havaitaan

1. hetki, jolloin painesignaali poikkeaa motor-käyrästä
2. painekäyrän toisen derivaatan ensimmäinen huippu
3. painekäyrän toisen derivaatan ensimmäinen nollakohdan ylitys

4. painekäyrän kolmannen derivaatan ensimmäinen huippu

Tässä tutkielmassa käytetään menetelmää 3 yhdistettynä juoksevan summan suodattimeen.

Mittausjärjestely

Sylinteripainedata on mitattu keskinopeasta kaasumoottorista laboratoriossa. Laboratorion moottori on hyvin pitkälti tuotantomoottorin SG34 kaltainen, mutta kattavammin instrumentoitu. Moottori on työkierroltaan nelitahtinen. Polttoaine/ilma -seos sytytetään tulpalla, joka sijaitsee esikammiossa. Esikammioilla järjestetään tulpan läheisyyteen rikas seos, jolla varmistetaan luotettava syttyminen. Sylinterissä poltetaan hyvin lauhaa seosta, jolla saavutetaan matalat päästöarvot. Moottori toimii ottoprosessilla.

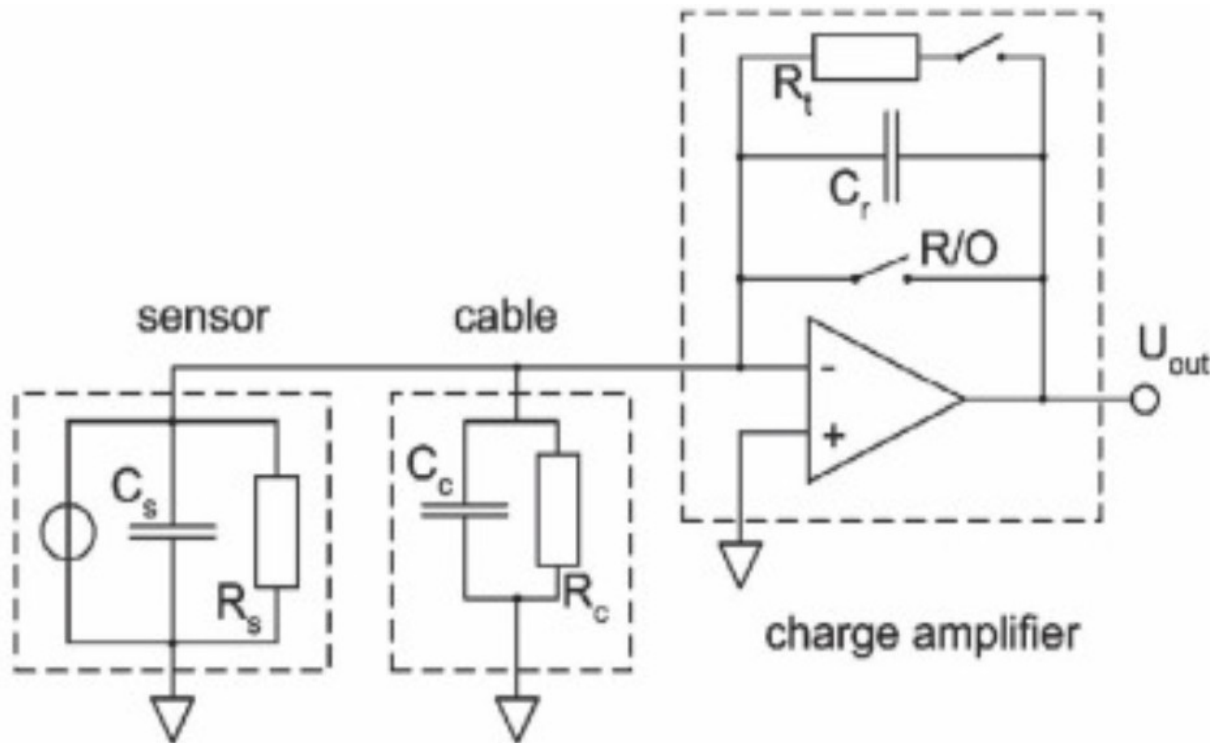
Sylinteripaineet mitattiin pietsosähköiseen ilmiöön perustuvalla anturilla kahdesta sylinteristä, yhdestä pisteestä kustakin. Mittaukset on tehty aikatasossa. Aikataso tarkoittaa, että rekisteröinti on tehty tasaisin aikaväleihin. Vaihtoehtoinen tapa on kulmataso, joka tarkoittaa, että rekisteröinti tehdään tasavälisin kammien kulma-astein. Anturit olivat kytketyt varausvahvistimien kautta laboratorion tiedonkeruujärjestelmään. Näytetaajuutena oli 24 kHz. Nyquistin teoreema mukaan suurin mitattava taajuus on puolet näytetaajuudesta, siis tässä tapauksessa 12 kHz. Liitäntäyksiköiden alipäästösuodattimet asetettiin arvoon 12 kHz, jotta laskostumista (Aliasing) ei pääse tapahtumaan. Koska anturi varausvahvistimensa kanssa on mittausten laadun kannalta keskeisimmät instrumentit, tarkastellaan näitä lähemmin. Kun voima vaikuttaa kvartsianturin pietsosähköiseen kiteeseen, syntyy jännite kiteen osiin kiinnitettyjen elektrodien välille. Jännite on verrannollinen voimaan. Tätä ilmiötä käytetään paineen mittaukseen. Kvartsianturin lähtöimpedanssi on suuri. Virtaa se ei pysty syöttämään. Puhutaan varauksen siirtymästä. Varausvahvistin on laite, joka pystyy tämän varauksen siirtymän havaitsemaan ja muodostamaan voimaan verrannollisen standardiviestin. Sinänsä kvartsianturi on aktiivinen komponentti. Se ei tarvitse käyttöjännitettä, vaan toimii itse jännitegeneraattorina. Myös moottorin teho ja kierrosluku mitattiin. Ensimmäisen sylinterin vaihe mitattiin pulssianturilla, joka antoi pulssin etureunan yläkuolokohdassa. Kammien asema mitattiin pulssianturilla, joka antoi 300 pulssia kierrokselle.

Anturitekniikan käsikirja *Sensor Technology Handbook*, (Wilson, 2005) esittää anturin, kaapelin ja varausvahvistimen (charge amplifier) kytkennän kuvassa 8. Aktiivinen kytkentä on integraattori (integrator). Sekä anturin (sensor) että kaapelin (cable) resistanssilla R_s , R_c ja

kapasitanssilla C_s , C_c on merkitystä, oikean mittaustuloksen saavuttamisessa.

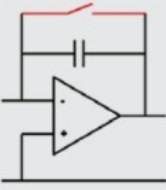
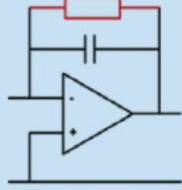
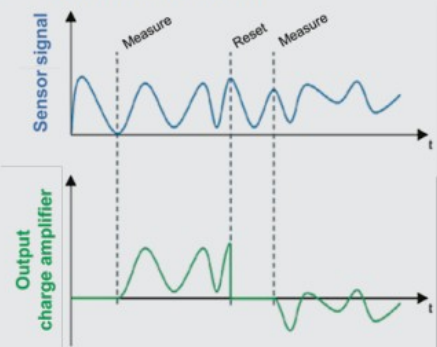
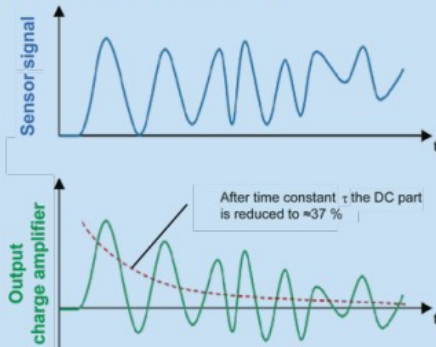
Integrointikondensaattorin C_r nolllaukseen on kaksi vaihtoehtoa. Joko nolllataan aina ennen mittauksen alkua sulkemalla kytkin R/O, tai nolllausresistanssin R_t kautta jatkuvana.

Integraattorin nolllauksen epäonnistumisen seurauksena on signaalin nolllatason vaeltaminen (zero drift).



Kuva 8: Anturin, kaapelin ja varausvahvistimen muodostama sijaikytkentä. Anturi mallinnetaan virtalähteeksi (varauslähteeksi) ja kapasitanssiksi C_s sekä resistanssiksi R_s . Kaapelin ominaisuuksista tärkeimmät ovat kapasitanssi C_c ja eristysvastus R_c . Varausvahvistimen takaisinkytkentäpiiriin on kytketty integraattorin kondensaattori C_r jatkuvan nolllauspiirin resistanssi R_t ja nolllauskytkin R/O. Kuva lähteestä *Sensor Technology Handbook* (Wilson, 2005).

Anturitekniikan käsikirja *Sensor Technology Handbook*, (Wilson, 2005) vertailee integraattorin kahta nolllautapaa kuvassa 9. Vasemmalla lähes staattinen mittaus (quasistatic measurement) jossa, nolllauskytkin avataan ennen kiinnostavan signaalijakson alkua. Oikealla dynaaminen mittaus, jossa aikavakion kautta integraattoria nolllataan kaiken aikaa.

Quasistatic measurement	Dynamic measurement
	
<ul style="list-style-type: none"> • Zero point is set on starting the measurement • Start of measurement is controlled by the Reset/Measure switch 	<ul style="list-style-type: none"> • Measurement without zero point reference, due to the time constant • No Reset/Measure signal is needed, or the charge amplifier is always operated in Measure mode
<ul style="list-style-type: none"> • Behavior in the time domain: 	<ul style="list-style-type: none"> • Behavior in the time domain: 

Kuva 9: Vasemmalla lähes staattinen (quasistatic) mittaus, jossa nollauskytkimen avaushetkellä voidaan olla varmoja siitä, että integraattorin arvo on nolla. Oikealla dynaaminen mittaus, jossa integraattoria nollataan aikavakion kautta. Tällöin kiinnostavan signaalijakson alussa vallitsevaa integraattorin arvoa ei tunneta. Kuva lähteestä *Sensor Technology Handbook*, (Wilson, 2005).

4.2 Kertomuksellinen aineisto

Tämä tutkielma sisältää sekä määrällisen (kvantitatiivisen), että laadullisen (kvalitatiivisen) tutkimuksen piirteitä. Laadullisen aineiston mukana olo on perusteltua, johtuen tutkimuskohteen nakutusilmiön luonteesta. Yleisimmin käytetty nakutuksen tunnistin on moottorien käyttöön perehtyneen henkilön kuulohavainto. Voidaanko nakutusta edes mitata? Tätä kysymystä käsitellään luvussa johtopäätökset. Joka tapauksessa kertomukset sisältävät informaatiota moottorikehityksen kohteista ja taustoittavat toimintaympäristöä.

Tässä on kokoelma, joka koostuu kirjoittajan muistelmista. Kertojat ovat kirjoittajan työ- tai harrastustapahtumissa kohtaamia asiantuntijoita. Mukaan on valittu tarinat, jotka suoraan

tai epäsuorasti auttavat nakutusongelmien ja ongelmakentän ymmärtämistä. Kertojat — nämä virittäjät ja konemestarit ovat käytännön moottoriongelmiin parhaita ratkaisijoita ja näin ollen myös nakutukseen liittyvien ongelmien tuntijoita. Maailmassa on paljon tarinoita.

”Merimiesjutuiksi” tunnistettavia ei ole mukaan kelpuutettu.

Kilpa-autoilijoiden varikolla tunnetaan moottorin karstaisuuden edistävän nakutustaipumusta. Tunnettu korjauskeino karstaiseen moottoriin on pesu ihan tavallisella vedellä tai kivennäisvedellä. Tämä tapahtuu korottamalla tyhjäkäyntikierroslukua (noin 2000 kierrosta minuutissa on käyttökelpoinen arvo) ja varovasti kaatamalla vesi kaasuttimeen. Näin saadaan karstat pois menoa haittaamasta.

Edellä mainittu moottorin sisäinen pesu hieman hirvittää laivojen konemestareita. Vesi palotilassa on potentiaalinen riski moottorin totaaliseen tuhoutumiseen. Veden tilavuus ei pienene puristettaessa. Jos vettä on niin paljon, että kammien kiertyminen estyy, on katastrofi valmis. Isoilla moottoreilla käynnistysrutiiniin kuuluu puhallus, jossa moottoria pyöritetään käynnistimellä indikointihana avoinna ja ilman polttoainesyöttöä. Indikointihana on sylinterin palotilasta vapaaseen tilaan johtava hana. Laivamoottori on usein rakenteeltaan sellainen, että venttiilipesä ja sylinterikansi ovat erillisiä osia ja tehdyt eri materiaaleista. Ainoa este jäähdytysveden joutumiselle sylinteriin on O-renkaat. Se on pienestä kiinni.

Kaasumoottori muodostaa myös nokea. Pakokaasun sisältämällä noella on taipumus tarttua ympäristöönsä kylmempiin pintoihin. Kaasumoottorin tapauksessa nämä nokikerrostumat ovat tiiviitä ja tiukasti kiinnittyneitä. Edellä mainitun johdosta pakokaasuturbiinin koteloon kerrostuu nokea, joka hiomalla lyhentää turbiinin siipiä. Tämän seurauksena turbiinin käyntiväly kasvaa ja hyötysuhde alenee. Turboahdinten valmistajan vastatoimi tähän ongelmaan on, että osa siivistä varustetaan kovalla kärkikappaleella, joka kaappii nokikerrosta ajon aikana ja näin suojaa siipiä kulumiselta.

Turboahdin ja turboon läheisesti liittyvät laitteet on kokonaisuus, joka on kehittynyt ja teknisesti monimutkaistunut ehkä eniten viime vuosina ja vuosikymmeninä. Puristettua ilmaa välijäähdytetään ennen syöttöä sylinteriin. Käyttötilanteen mukaan osa pakokaasuista ohjataan hukkaportilla (Waste Gate) turbiinin ohi. Osa puristetusta ilmasta voidaan syöttää kompressorin ohi (By-pass). Kompressorissa voidaan käyttää sisäistä takaisin virtausta (Anti-surge insert). Useita siipipyöriä voidaan kytkeä peräkkäin sarjakytkentään. Turboahdinten teho

on luokkaa 30% moottorin ulos menevästä tehosta ja hyötysuhde maksimissaan 75%. Likaantumisen aiheuttamien ongelmien voittamiseksi on kehitetty pesureita, joilla sekä turbiini että kompressori pestään vedellä. Pesu tehdään ajon aikana, mutta alennetulla tehotasolla.

5 Algoritmit ja havainnot

Tässä luvussa esitetään joukko sylinteripainekäyriä ja algoritmein laskettuja analyttisiä pisteitä. Pisteistä tallennetaan sekä sijainti että suuruus. Nämä pisteet ovat kullekin tapahtumalle luonteenomaisia. Toisin sanoen analyttiset pisteet ovat tapahtuman piirteitä. Tässä tutkielmassa on keskitytty datan käsittelyn hallintaan ja analyttisten pisteiden havaitsemiseen pystyvien algoritmien kehittämiseen. Seuraavana on lyhyt kuvaus algoritmeista.

Palamisen alkuhetki (Start Of Combustion, SOC). Merkitty mustalla ristillä.

1. Suodatus juoksevan summan (Running Sum) suodattimella, asteluku 10
2. Differentiointi
3. Suodatus juoksevan summan (Running Sum) suodattimella, asteluku 10
4. Differentiointi
5. Kynnysarvon ylittävä piste on palamisen alkuhetki, SOC
6. Amplitudin ja kammen kulman tallennus

Edellä mainitut vaiheet 1-4 voidaan ymmärtää suodatuksena ja toisena derivaattana.

Akustisen amplitudin maksimi. Merkitty punaisella pisteellä.

1. Suodatus juoksevan summan (Running Sum) suodattimella, asteluku 10
2. Detrend funktio signaalijaksolle 14 näytettä
3. Maksimin tunnistus
4. Amplitudin ja kammen kulman tallennus

Akustisen amplitudin minimi. Merkitty sinisellä pisteellä.

1. Suodatus juoksevan summan (Running Sum) suodattimella, asteluku 10
2. Detrend funktio signaalijaksolle 14 näytettä
3. Minimien tunnistus
4. Amplitudin ja kammen kulman tallennus

Nousevan käyrän kaarevuuden vaihtopiste. Merkitty vihreällä pisteellä.

1. Suodatus juoksevan summan (Running Sum) suodattimella, asteluku 10
2. Differentiointi
3. Maksimin tunnistus
4. Amplitudin ja kammien kulman tallennus

Laskevan käyrän kaarevuuden vaihtopiste. Merkitty vaalean sinisellä pisteellä.

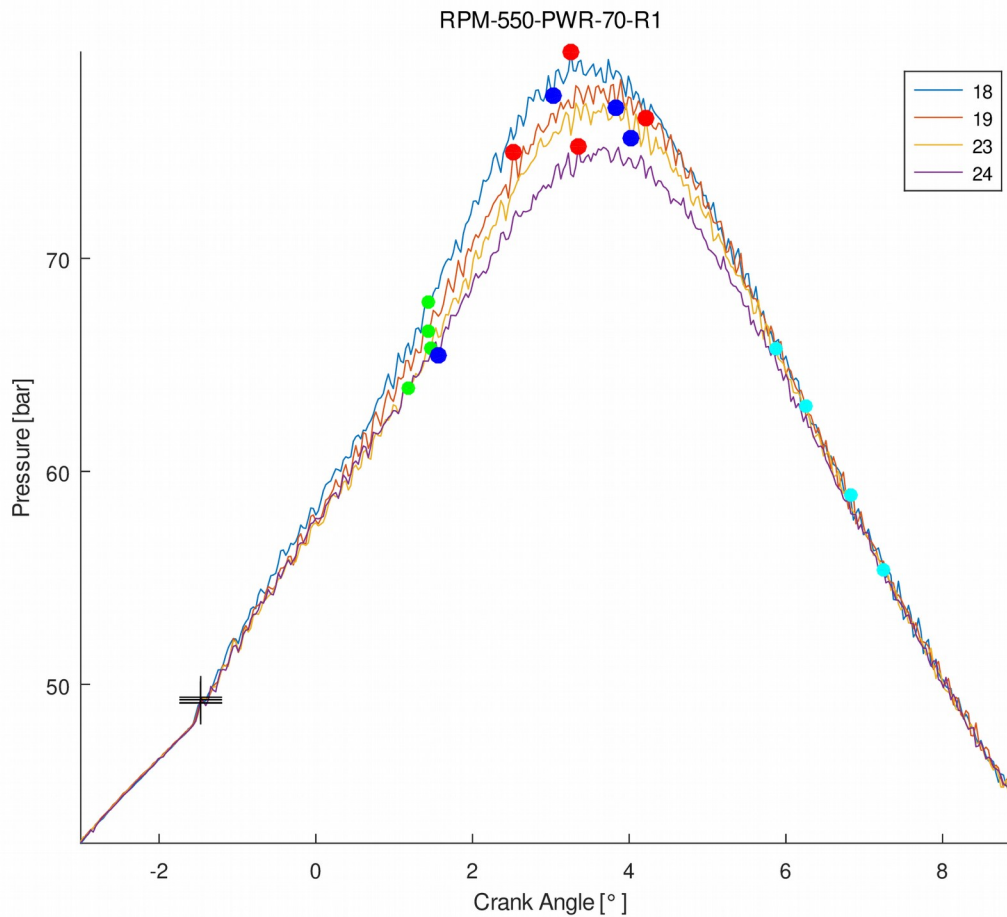
1. Suodatus juoksevan summan (Running Sum) suodattimella, asteluku 10
2. Differentiointi
3. Minimien tunnistus
4. Amplitudin ja kammien kulman tallennus

Painekäyrät edustavat kahta ajotyyppiä: tasainen ja nakuttava ajo sekä kolmea kierroslukua 550, 650 ja 750 kierrosta minuutissa (RPM), sekä useita kuormitustasoja. Yhteen kuvaan on otettu neljä painekäyrää, jotka on valittu siten, että kaikkien valittujen palamisen alkuhetki osuu samalle kammien kulman asteelle. Tämä tekee kuvan lukemisen ja käyrien vertailun mahdolliseksi tai ainakin helpommaksi.

5.1 Paineokuvaajat 550 RPM

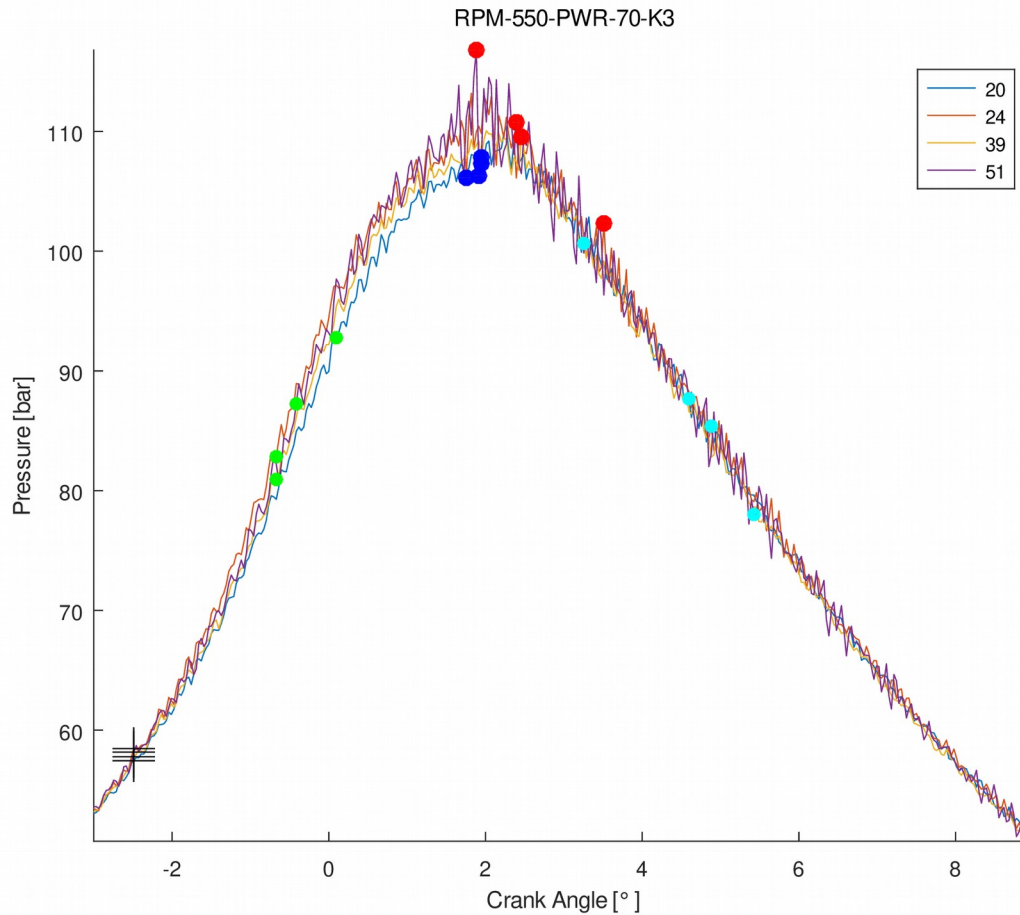
Sylinteripaineokuvaajat kierrosluvulle 550 RPM on esitetty kuvissa 10-16. Kuvaajissa vertaillaan ajotapoja tasainen ja nakuttava toisiinsa. Tasainen ajo on moottorin normaalia käyttöä puuttumatta säätölaitteisiin. Kuormitustaso ja kierrosluku ovat asetetut. Nakuttava ajotapa on toteutettu siten, että sytytysennakko on pakotettu aikaisemmalle, kuin mitä moottorin säätölaite määrää. Nakutustila on operaattorin kuulohavainnon perusteella vahvistama.

Tarkoituksena on tehdä havaintoja moottorin ajotapojen ja painekäyrässä tapahtuvien muutosten suhteesta sekä tarkkailla algoritmien sijoittamien analyttisten pisteiden käyttäytymistä. Analyttisten pisteiden määrä ja laatu ovat hyviä silloin, kun kiinnostuksen kohteena olevat ilmiöt moduloivat pisteiden amplitudia ja sijaintia systemaattisesti. Pisteet jo sinänsä ovat informatiivisia, mutta niiden päätarkoitus on toimia syötteenä jatkossa kehitettävälle koneoppivalle järjestelmälle.



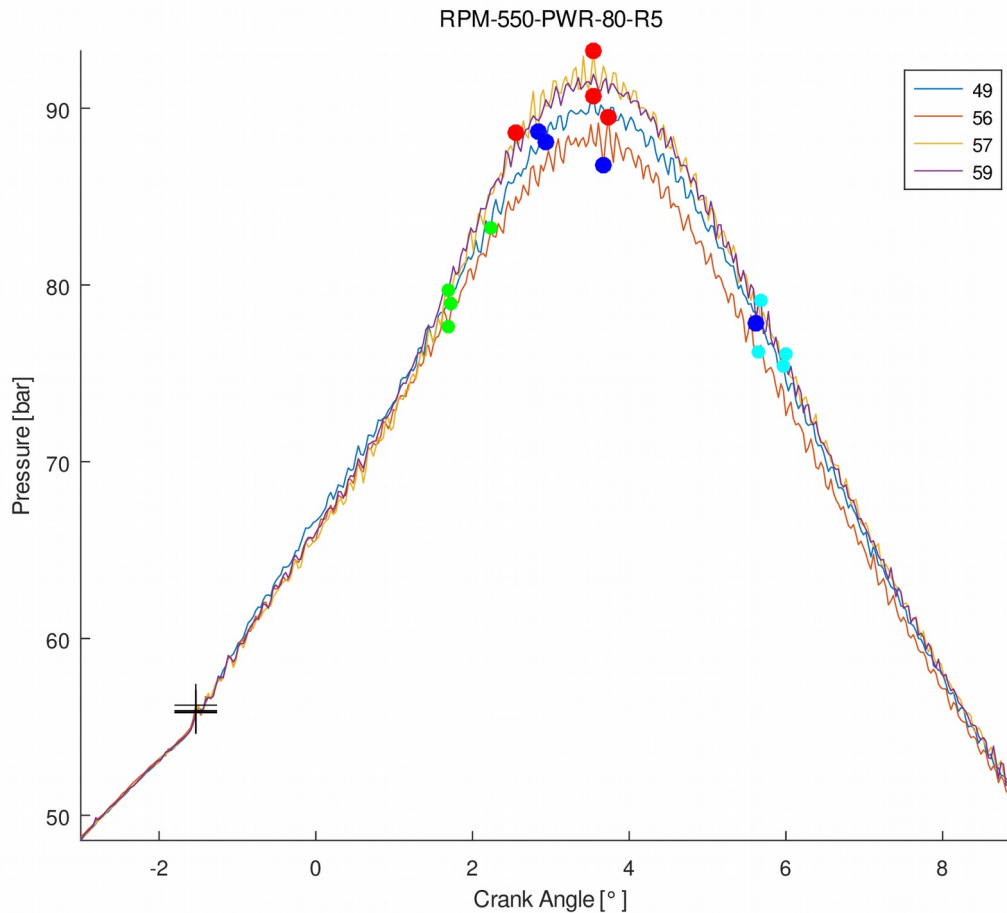
Kuva 10: Sylinteripaineen (Pressure) käyrät kammien kulman (Crank Angle) funktiona kierrosluvulla 550 rpm ja teholla 70%. Ajotyypinä tasainen (Reference, R). Neljä saman syttymiskohdan (Start of Combustion, SOC) tapahtumaa, merkitty mustalla ristillä. Oikeassa yläkulmassa tapahtumien numerot. Pisteiden merkitys: Punainen osoittaa akustisen amplitudin maksimin ja sininen minimin. Vihreä osoittaa nousevan painekäyrän kaarevuuden vaihtopisteen ja vaaleansininen laskevan.

Havainnot: Puristuspaine nousee vakaasti. Käyrät ovat toistensa kaltaisia, mutta amplitudit eroavat selvästi. Palaminen on tasaisen turbulenttista. Akustisen amplitudin pisteet ovat visuaalisesti oikein. Laskevan paineen vaihtopisteen hajonta on suurta.



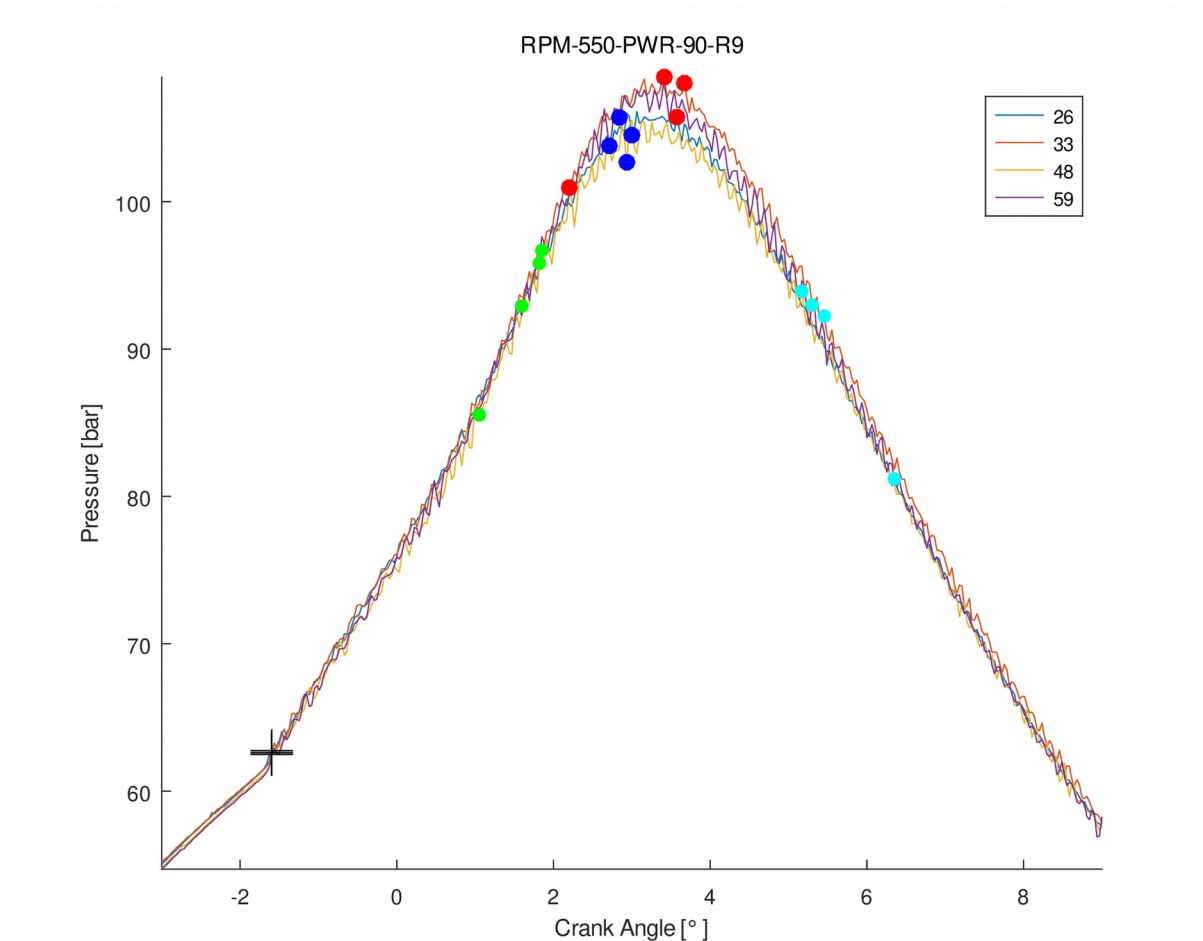
Kuva 11: Sylinteripaineen (Pressure) käyrät kammien kulman (Crank Angle) funktiona kierrosluvulla 550 rpm ja teholla 70%. Ajotyypinä nakuttava (Knock, K). Neljä saman syttymiskohdan (Start of Combustion, SOC) tapahtumaa, merkitty mustalla ristillä. Oikeassa yläkulmassa tapahtumien numerot. Pisteiden merkitys: Punainen osoittaa akustisen amplitudin maksimin ja sininen minimin. Vihreä osoittaa nousevan painekäyrän kaarevuuden vaihtopisteen ja vaaleansininen laskevan.

Havainnot: Huomattavaa turbulenssia esiintyy jo ennen syttymispistettä. Käyrien luonne poikkeaa toisistaan. Palaminen on turbulენტtista tai voimakkaan turbulენტtista. Osa nakuttaa, osa ei. Akustisen amplitudin pisteet ovat visuaalisesti oikein. Laskevan paineen vaihtopisteen hajonta on suurta.



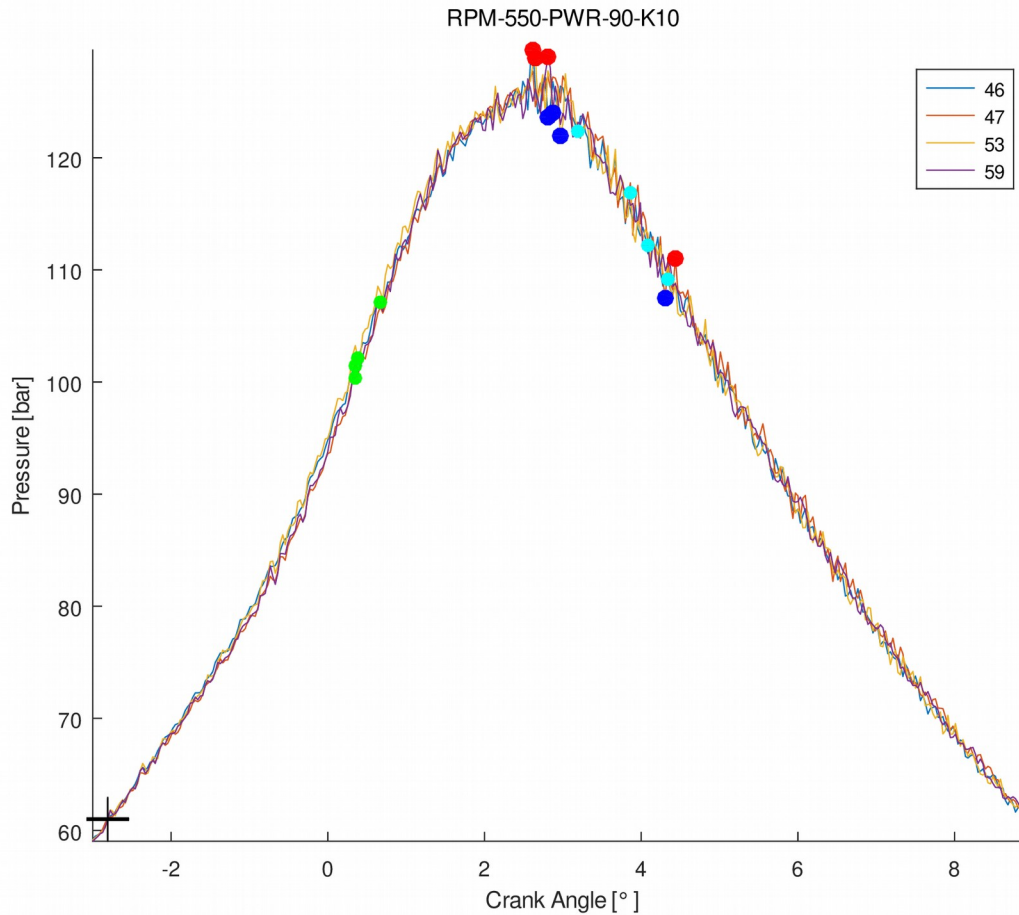
Kuva 12: Sylinteripaineen (Pressure) käyrät kammien kulman (Crank Angle) funktiona kierrosluvulla 550 rpm ja teholla 80%. Ajotyypinä tasainen (Reference, R). Neljä saman syttymiskohdan (Start of Combustion, SOC) tapahtumaa, merkitty mustalla ristillä. Oikeassa yläkulmassa tapahtumien numerot. Pisteiden merkitys: Punainen osoittaa akustisen amplitudin maksimin ja sininen minimin. Vihreä osoittaa nousevan painekäyrän kaarevuuden vaihtopisteen ja vaaleansininen laskevan.

Havainnot: Puristusaine nousee vakaasti ja hieman häiriöisesti. Käyrät ovat toistensa kaltaisia, mutta amplitudit eroavat selvästi. Palaminen on tasaisen turbulenttista. Tapauksen 59 akustisen maksimin ja minimin pisteet ovat kaukana toisistaan. Laskevan paineen vaihtopisteen hajonta on pientä.



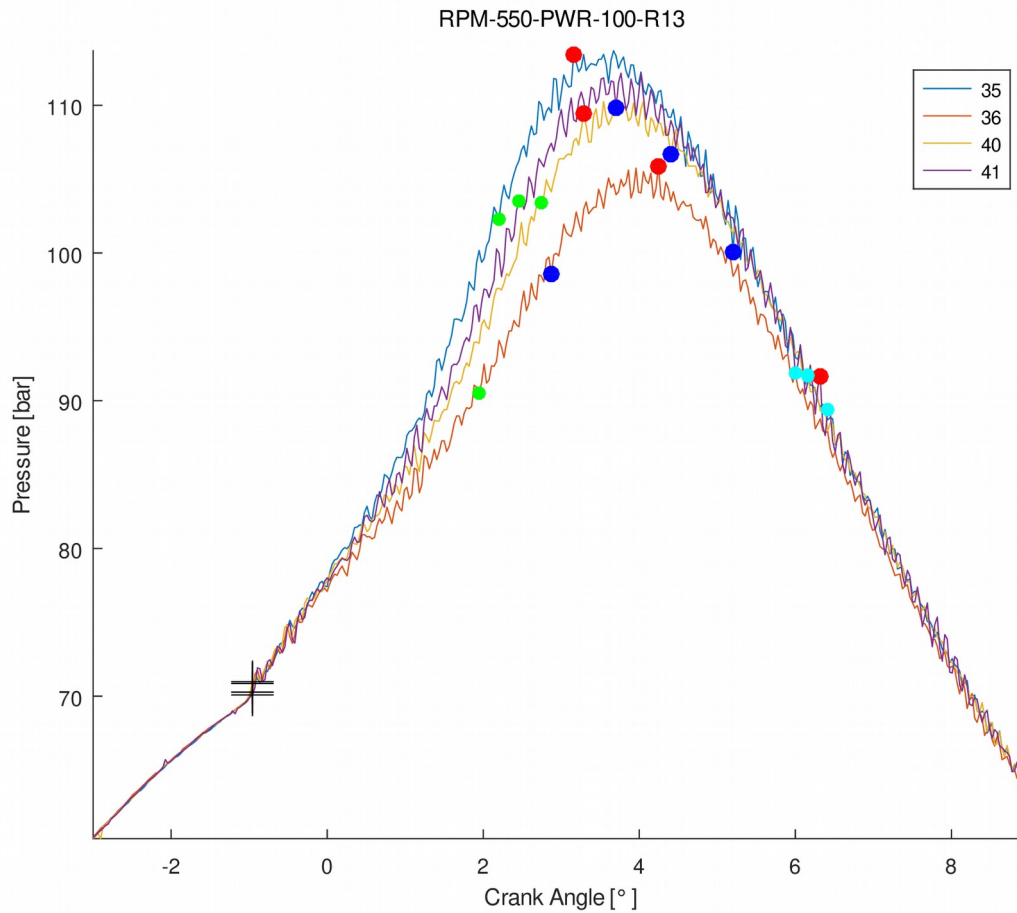
Kuva 13: Sylinteripaineen (Pressure) käyrät kammien kulman (Crank Angle) funktiona kierrosluvulla 550 rpm ja teholla 90%. Ajotyypinä tasainen (Reference, R). Neljä saman syttymiskohdan (Start of Combustion, SOC) tapahtumaa, merkitty mustalla ristillä. Oikeassa yläkulmassa tapahtumien numerot. Pisteiden merkitys: Punainen osoittaa akustisen amplitudin maksimin ja sininen minimin. Vihreä osoittaa nousevan painekäyrän kaarevuuden vaihtopisteen ja vaaleansininen laskevan.

Havainnot: Puristuspaine nousee vakaasti. Käyrät ovat toistensa kaltaisia. Palaminen on tasaisen turbulენტtista. Akustisen amplitudin pisteet ovat visuaalisesti oikein. Laskevan paineen vaihtopisteen hajonta on pientä, yksi poikkeus.



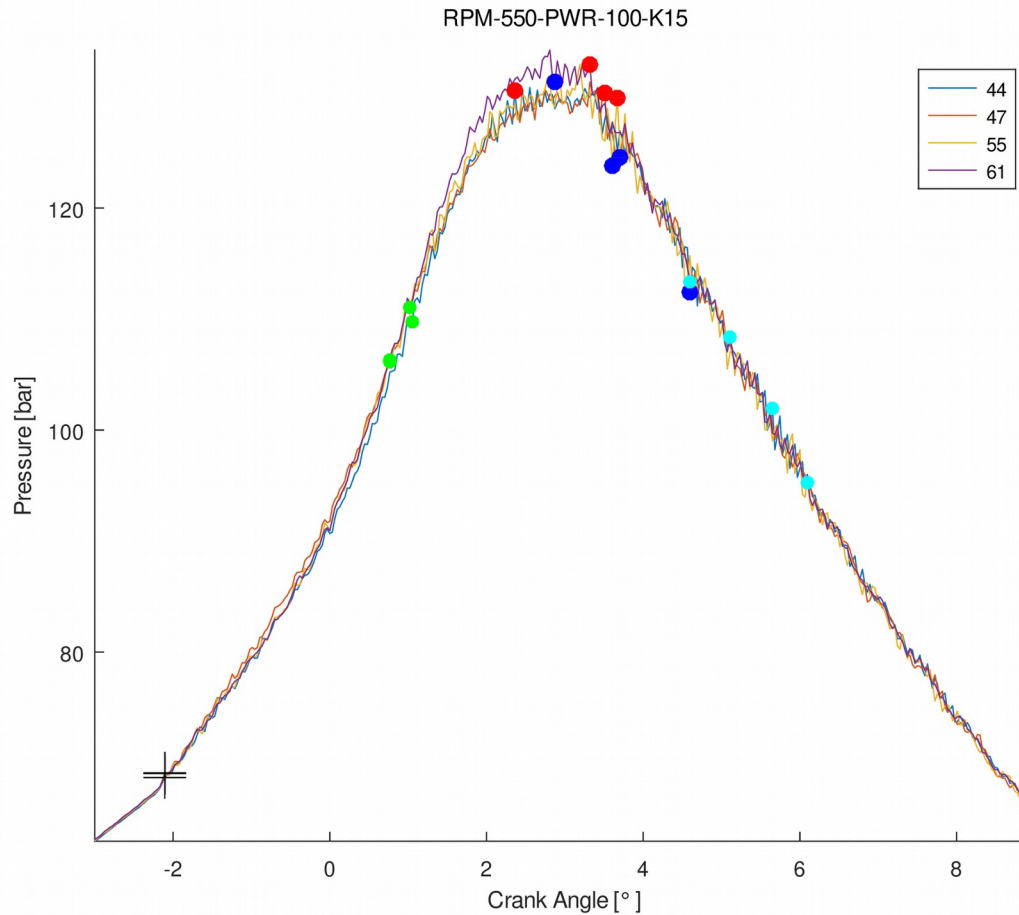
Kuva 14: Sylinteripaineen (Pressure) käyrät kammien kulman (Crank Angle) funktiona kierrosluvulla 550 rpm ja teholla 90%. Ajotyypinä nakuttava (Knock, K). Neljä saman syttymiskohdan (Start of Combustion, SOC) tapahtumaa, merkitty mustalla ristillä. Oikeassa yläkulmassa tapahtumien numerot. Pisteiden merkitys: Punainen osoittaa akustisen amplitudin maksimin ja sininen minimin. Vihreä osoittaa nousevan painekäyrän kaarevuuden vaihtopisteen ja vaaleansininen laskevan.

Havainnot: Käyrät ovat samankaltaisia. Palamisen turbulenttisuus on huippua kohti kasvavaa. Tapaus 47, akustinen minimi ja maksimi ovat lähellä toisiaan, mutta kaukana muista ja huipusta. Kaikki käyrät ovat selvästi nakuttavia. Laskevan paineen vaihtopisteet ovat ylempänä kuin nousevat.



Kuva 15: Sylinteripaineen (Pressure) käyrät kammien kulman (Crank Angle) funktiona kierrosluvulla 550 rpm ja teholla 100%. Ajotyypinä tasainen (Reference, R). Neljä saman syttymiskohdan (Start of Combustion, SOC) tapahtumaa, merkitty mustalla ristillä. Oikeassa yläkulmassa tapahtumien numerot. Pisteiden merkitys: Punainen osoittaa akustisen amplitudin maksimin ja sininen minimin. Vihreä osoittaa nousevan painekäyrän kaarevuuden vaihtopisteen ja vaaleansininen laskevan.

Havainnot: Yhdessä puristuspuheen nousussa terävä häiriö. Käyrät toistensa kaltaisia, mutta amplitudit eroavat selvästi. Palaminen tasaisen turbulenttista. Akustisen amplitudin minimi ja maksimit ovat kaukana toisistaan ja tapauskohtainen sijainti vaihtelee. Laskevan paineen vaihtopisteet ovat alempana kuin nousevat, yksi nouseva poikkeus on lähes tasan.



Kuva 16: Sylinteripaineen (Pressure) käyrät kammien kulman (Crank Angle) funktiona kierrosluvulla 550 rpm ja teholla 100%. Ajotyypinä nakuttava (Knock, K). Neljä saman syttymiskohdan (Start of Combustion, SOC) tapahtumaa, merkitty mustalla ristillä. Oikeassa yläkulmassa tapahtumien numerot. Pisteiden merkitys: Punainen osoittaa akustisen amplitudin maksimin ja sininen minimin. Vihreä osoittaa nousevan painekäyrän kaarevuuden vaihtopisteen ja vaaleansininen laskevan.

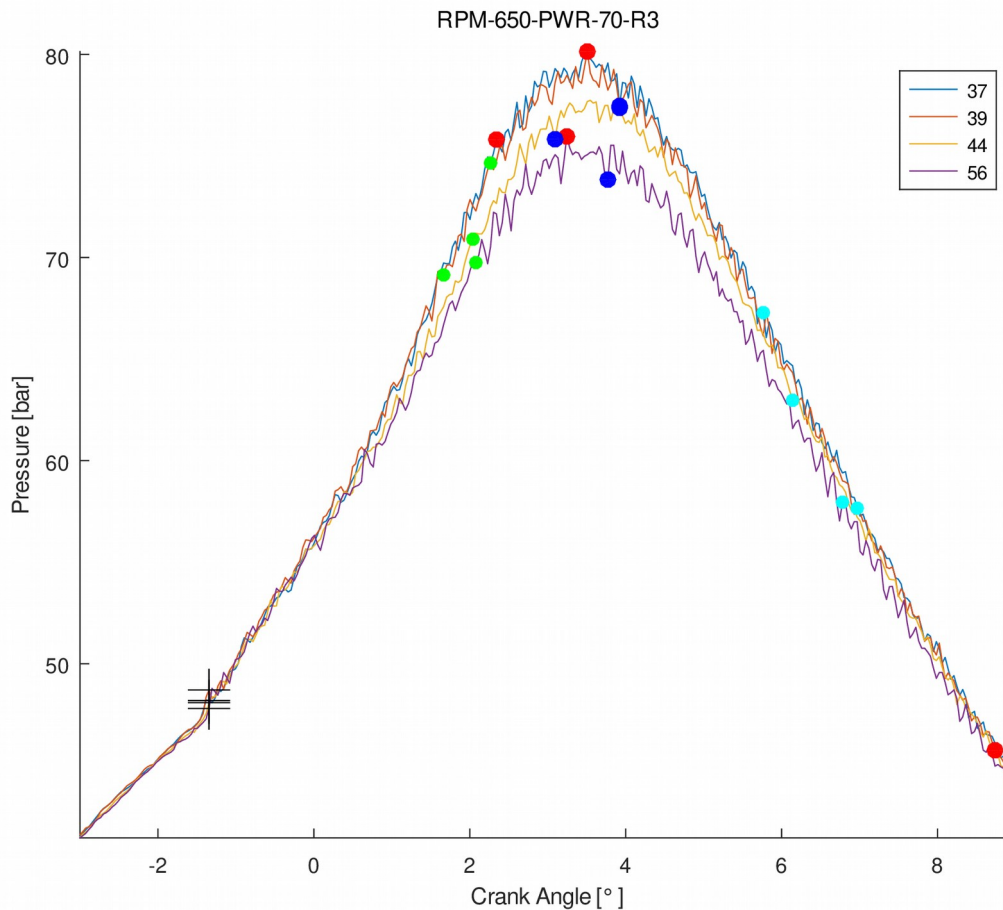
Havainnot: Puristusaine nousee vakaasti. Käyrien luonne on keskenään samankaltainen. Palaminen on kasvavan turbulენტista. Akustisen amplitudin minimi ja maksimit eroavat toisistaan ja tapauskohtainen sijainti vaihtelee. Nousevan paineen vaihtopisteen hajonta on pientä ja laskevan suurta.

5.2 Paine kuvaajat 650 RPM

Sylinteripaine kuvaajat kierrosluvulle 650 RPM on esitetty kuvissa 17-26. Kuvaajissa vertaillaan ajotapoja tasainen ja nakuttava toisiinsa. Tasainen ajo on moottorin normaalia käyttöä puuttumatta säätölaitteisiin. Kuormitustaso ja kierrosluku ovat asetetut. Nakuttava ajotapa on toteutettu siten, että sytytysennakko on pakotettu aikaisemmalle, kuin mitä moottorin säätölaite määrää. Nakutustila on operaattorin kuulohavainnon perusteella vahvistama.

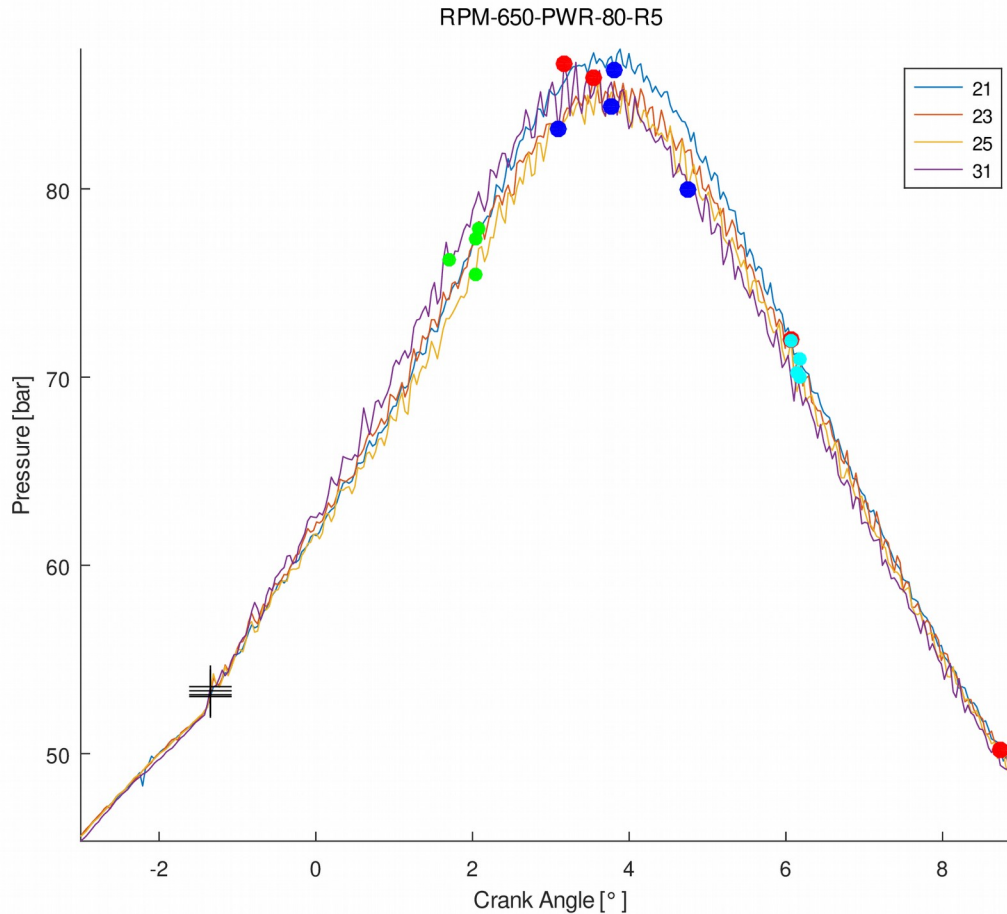
Tarkoituksena on tehdä havaintoja moottorin ajotapojen ja painekäyrässä tapahtuvien muutosten suhteesta sekä tarkkailla algoritmien sijoittamien analyttisten pisteiden käyttäytymistä. Analyttisten pisteiden määrä ja laatu ovat hyviä silloin, kun kiinnostuksen kohteena olevat ilmiöt moduloivat pisteiden amplitudia ja sijaintia systemaattisesti. Pisteet jo sinänsä ovat informatiivisia, mutta niiden päätarkoitus on toimia syötteenä jatkossa kehitettävälle koneoppivalle järjestelmälle.

Ryhmien 550 RPM ja 650 RPM välisessä tarkastelussa ei ole havaittavissa mitään ryhmäkohtaista erottavaa ominaisuutta, joka luokittelisi ryhmät. Toisin sanoen kierrosluvun muuttuminen arvosta 550 RPM arvoon 650 RPM ei aiheuta visuaalisesti havaittavaa ryhmäkohtaisten ominaisuuksien eroa ryhmien välillä. Eroa saattaa kuitenkin löytyä tutkittaessa asiaa tilastollisella analyysillä.



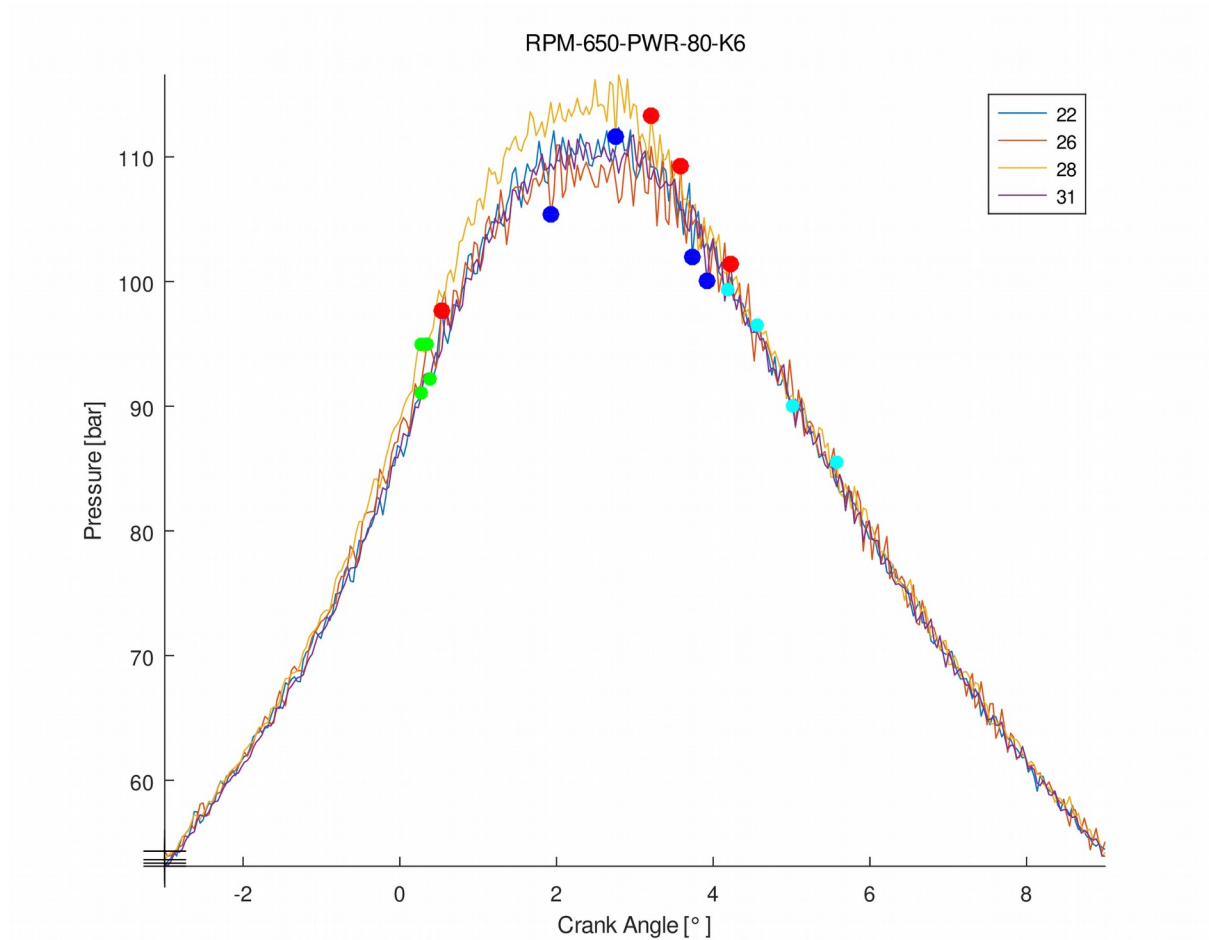
Kuva 17: Sylinteripaineen (Pressure) käyrät kammien kulman (Crank Angle) funktiona kierrosluvulla 650 rpm ja teholla 70%. Ajotyypinä tasainen (Reference, R). Neljä saman syttymiskohdan (Start of Combustion, SOC) tapahtumaa, merkitty mustalla ristillä. Oikeassa yläkulmassa tapahtumien numerot. Pisteiden merkitys: Punainen osoittaa akustisen amplitudin maksimin ja sininen minimin. Vihreä osoittaa nousevan painekäyrän kaarevuuden vaihtopisteen ja vaaleansininen laskevan.

Havainnot: Puristuspaineen nousu on aaltoileva. Käyrät ovat toistensa kaltaisia, mutta amplitudit eroavat selvästi. Palaminen on tasaisen turbulenttista. Akustisen amplitudin minimi ja maksimit ovat kaukana toisistaan ja tapauskohtainen sijainti vaihtelee. Yksi akustinen maksimi sijaitsee erittäin myöhään. Laskevan paineen vaihtopisteet ovat alempana kuin nousevan, yksi poikkeus on lähes tasan.



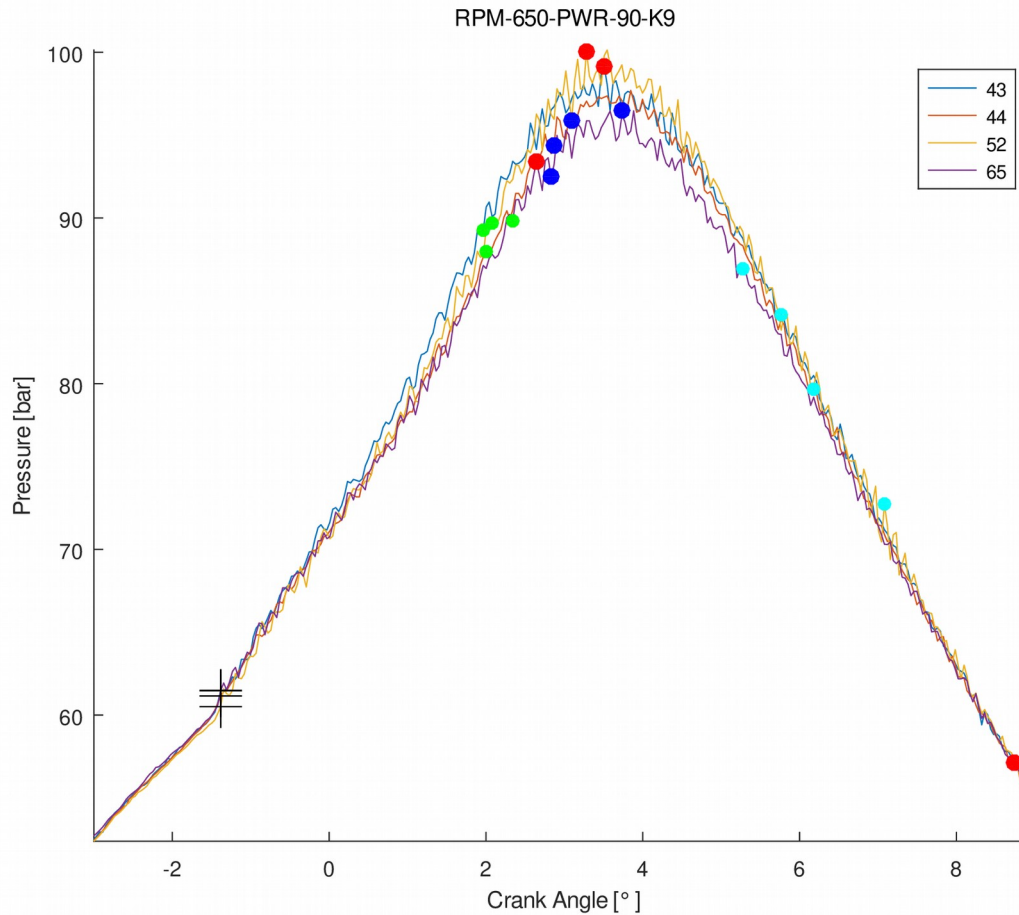
Kuva 18: Sylinteripaineen (Pressure) käyrät kammien kulman (Crank Angle) funktiona kierrosluvulla 650 rpm ja teholla 80%. Ajotyypinä tasainen (Reference, R). Neljä saman syttymiskohdan (Start of Combustion, SOC) tapahtumaa, merkitty mustalla ristillä. Oikeassa yläkulmassa tapahtumien numerot. Pisteiden merkitys: Punainen osoittaa akustisen amplitudin maksimin ja sininen minimin. Vihreä osoittaa nousevan painekäyrän kaarevuuden vaihtopisteen ja vaaleansininen laskevan.

Havainnot: Puristuspuheen nousu on yleisesti ottaen häiriöistä ja käyrässä n:o 21 on iso poikkeama. Käyrät ovat toistensa kaltaisia. Palaminen on tasaisen turbulenttista. Yksi akustisen amplitudin maksimi esiintyy erittäin myöhään. Sekä nousevan että laskevan puheen vaihtopisteen hajonta on pientä.



Kuva 19: Sylinteripaineen (Pressure) käyrät kammien kulman (Crank Angle) funktiona kierrosluvulla 650 rpm ja teholla 80%. Ajotyypinä nakuttava (Knock, K). Neljä saman syttymiskohdan (Start of Combustion, SOC) tapahtumaa, merkitty mustalla ristillä. Oikeassa yläkulmassa tapahtumien numerot. Pisteiden merkitys: Punainen osoittaa akustisen amplitudin maksimin ja sininen minimin. Vihreä osoittaa nousevan painekäyrän kaarevuuden vaihtopisteen ja vaaleansininen laskevan.

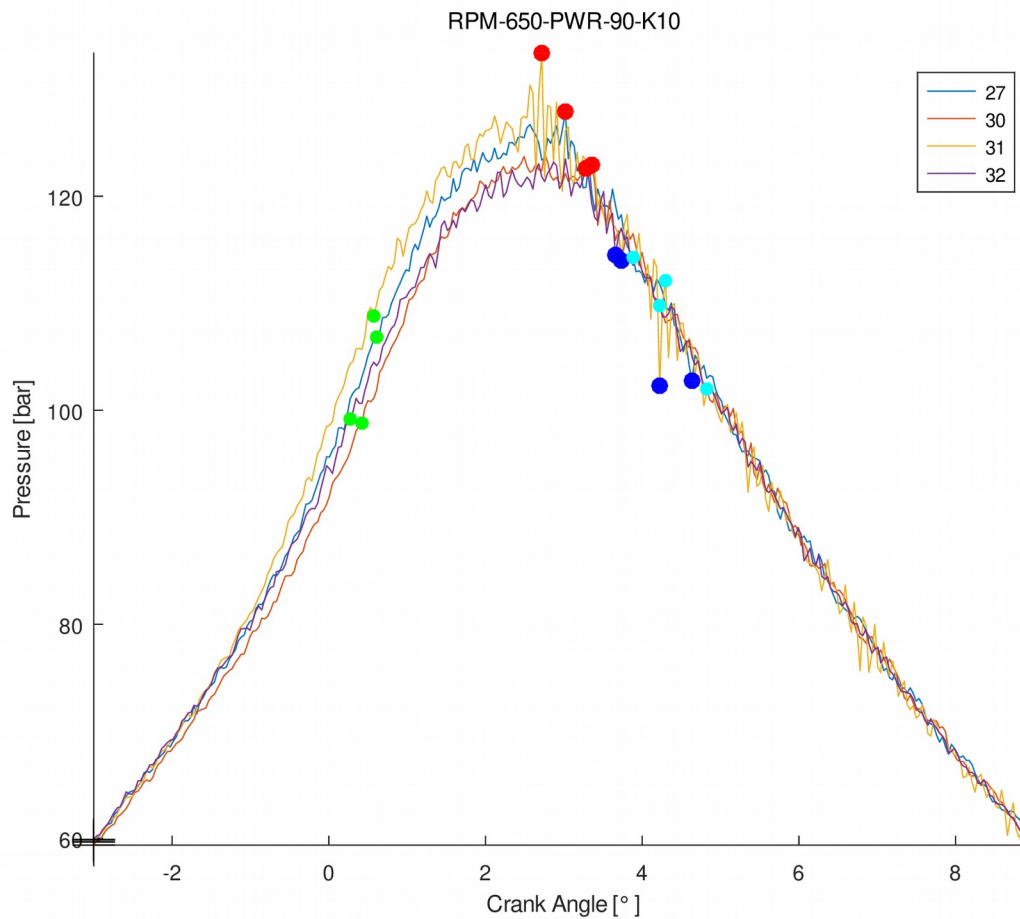
Havainnot: Käyrien luonne on keskenään samankaltainen. Palaminen on huippua kohti kasvavan turbulენტtista ja selkeästi nakuttavaa. Akustisen amplitudin minimi ja maksimit eroavat toisistaan ja tapauskohtainen sijainti vaihtelee. Nousevan vaihtopisteen hajonta on pientä ja laskevan suurta.



Kuva 20: Sylinteripaineen (Pressure) käyrät kammien kulman (Crank Angle) funktiona kierrosluvulla 650 rpm ja teholla 90%. Ajotyypinä tasainen (Referense, R). Neljä saman syttymiskohdan (Start of Combustion, SOC) tapahtumaa, merkitty mustalla ristillä. Oikeassa yläkulmassa tapahtumien numerot. Pisteiden merkitys: Punainen osoittaa akustisen amplitudin maksimin ja sininen minimin. Vihreä osoittaa nousevan painekäyrän kaarevuuden vaihtopisteen ja vaaleansininen laskevan.

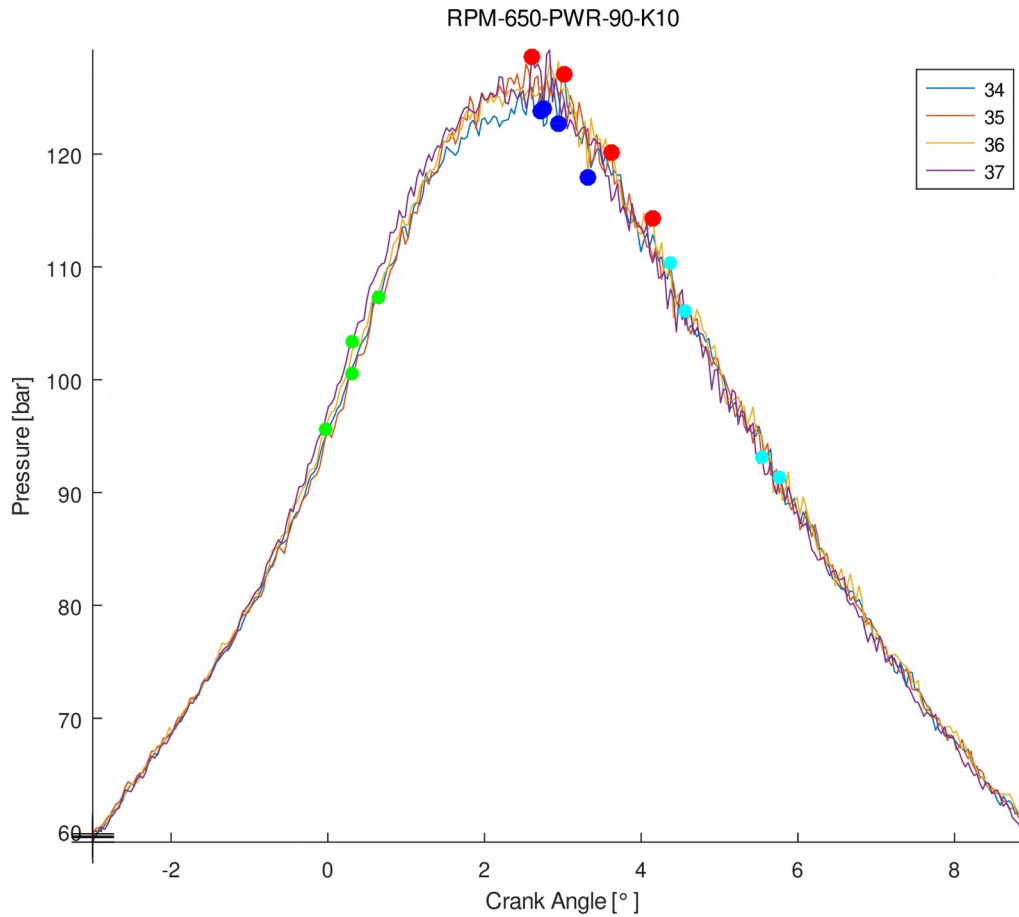
Havainnot: Nimeämisvirhe! Käyrät ovat tasaisesta ajosta eivätkä nakuttavasta.

Puristuspaineen nousu on aaltoilevaa. Käyrät ovat toistensa kaltaisia. Palaminen on huippua kohden kasvavan turbulენტtista. Yksi akustisen amplitudin maksimi esiintyy erittäin myöhään. Nousevan paineen vaihtopisteen hajonta on pieniä ja laskevan suurta.



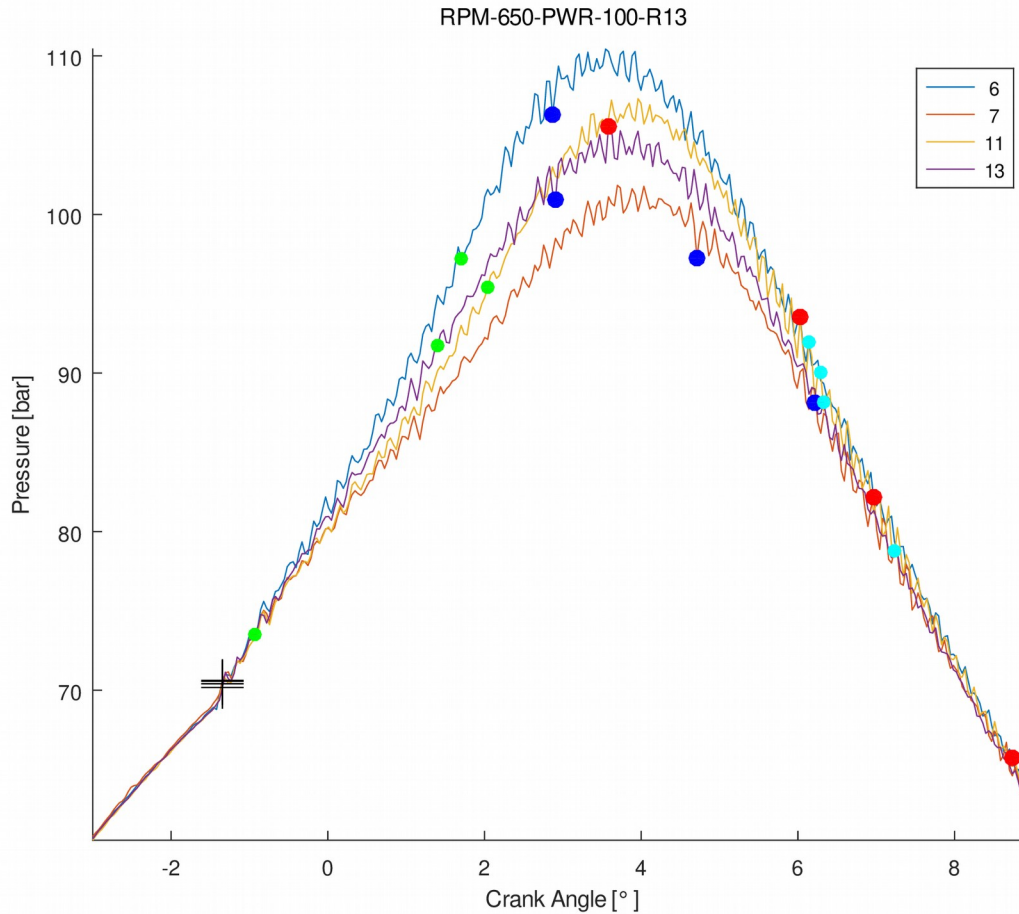
Kuva 21: Sylinteripaineen (Pressure) käyrät kammien kulman (Crank Angle) funktiona kierrosluvulla 650 rpm ja teholla 90%. Ajotyypinä nakuttava (Knock, K). Neljä saman syttymiskohdan (Start of Combustion, SOC) tapahtumaa, merkitty mustalla ristillä. Oikeassa yläkulmassa tapahtumien numerot. Pisteiden merkitys: Punainen osoittaa akustisen amplitudin maksimin ja sininen minimin. Vihreä osoittaa nousevan painekäyrän kaarevuuden vaihtopisteen ja vaaleansininen laskevan.

Havainnot: Palamisen turbulenssi kasvaa nousukäyrällä noin 115 bar kohdalla. Käyrien luonne on keskenään erilainen. Toiset nakuttavat ja toiset eivät. Akustisen amplitudin minimi ja maksimit ovat kaukana toisistaan ja kaikki maksimit esiintyvät ennen kaikkia minimejä. Nousevan ja laskevan paineen vaihtopisteen hajonta samaa suuruusluokkaa.



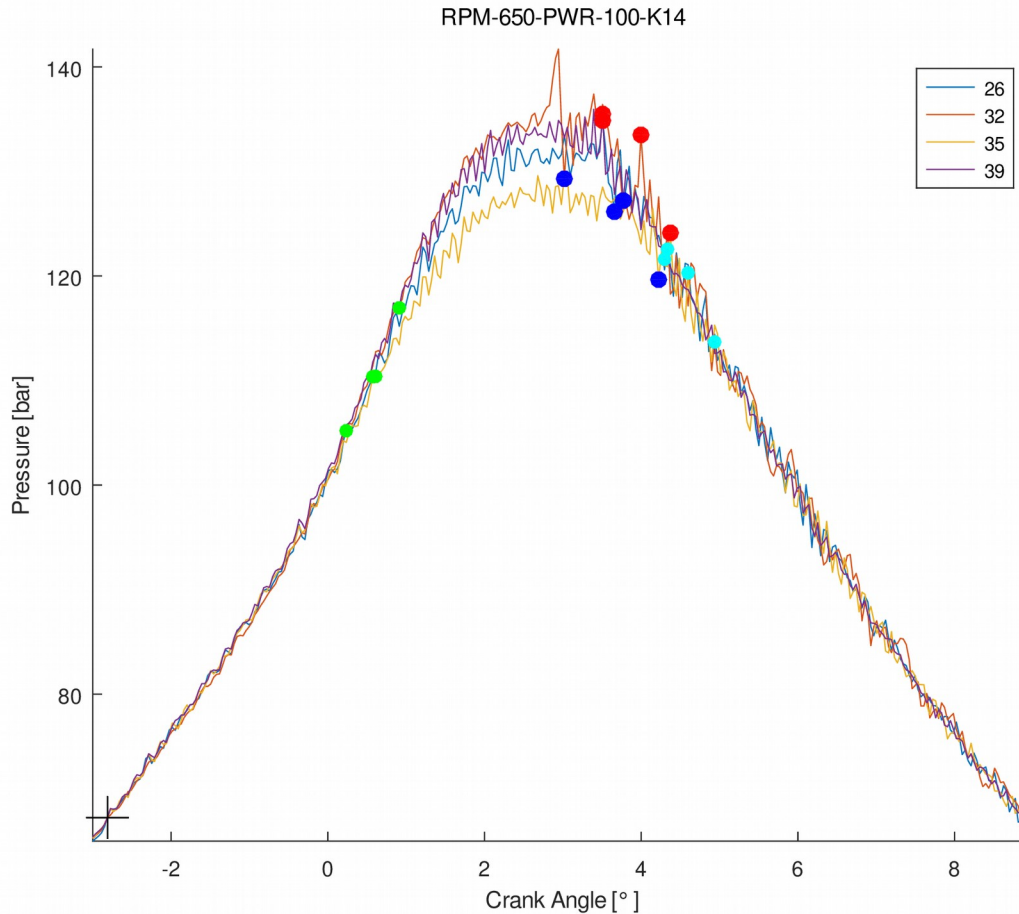
Kuva 22: Sylinteripaineen (Pressure) käyrät kammien kulman (Crank Angle) funktiona kierrosluvulla 650 rpm ja teholla 90%. Ajotyypinä nakuttava (Knock, K). Neljä saman syttymiskohdan (Start of Combustion, SOC) tapahtumaa, merkitty mustalla ristillä. Oikeassa yläkulmassa tapahtumien numerot. Pisteiden merkitys: Punainen osoittaa akustisen amplitudin maksimin ja sininen minimin. Vihreä osoittaa nousevan painekäyrän kaarevuuden vaihtopisteen ja vaaleansininen laskevan.

Havainnot: Palamisen turbulenssi kasvaa nousukäyrällä noin 115 bar kohdalla. Käyrien luonne on keskenään samanlainen. Toiset nakuttavat enemmän ja toiset vähemmän. Akustisen amplitudin minimi ja maksimi sijoittuvat huipun tuntumaan. Laskevan paineen vaihtopisteen hajonta on suurempaa kuin nousevan.



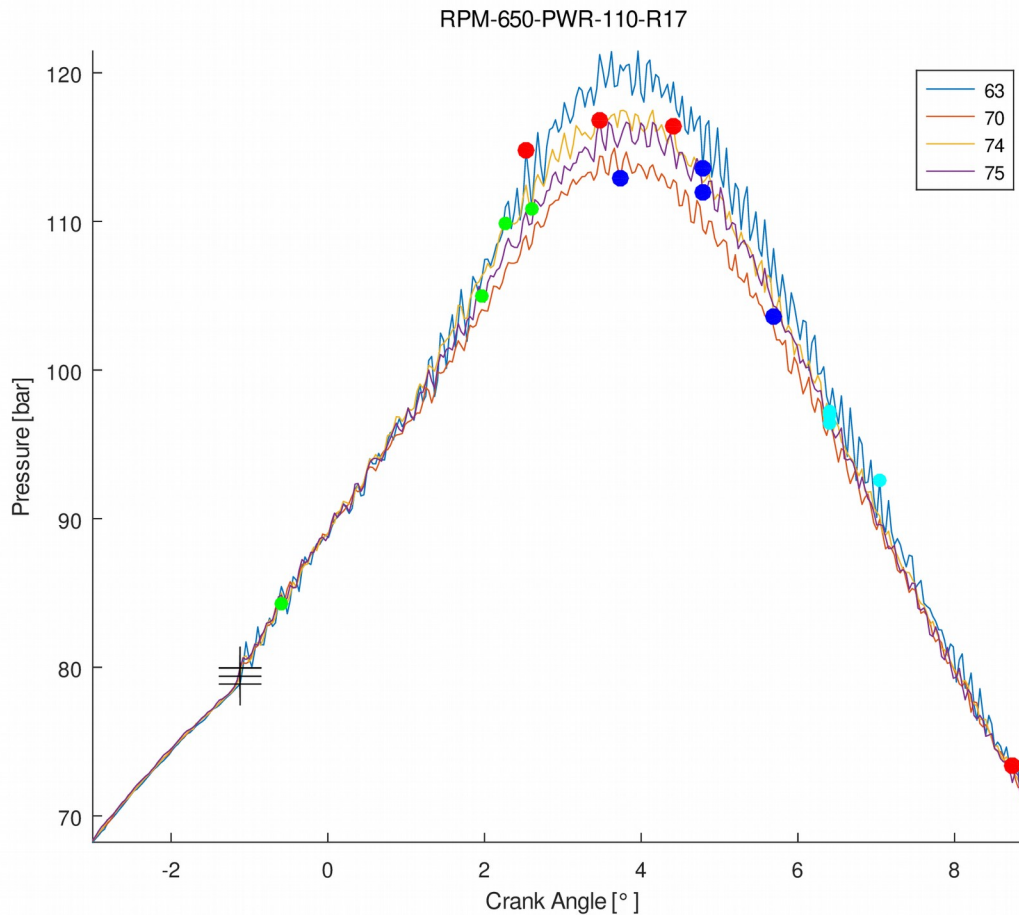
Kuva 23: Sylinteripaineen (Pressure) käyrät kammien kulman (Crank Angle) funktiona kierrosluvulla 650 rpm ja teholla 100%. Ajotyypinä tasainen (Reference, R). Neljä saman syttymiskohdan (Start of Combustion, SOC) tapahtumaa, merkitty mustalla ristillä. Oikeassa yläkulmassa tapahtumien numerot. Pisteiden merkitys: Punainen osoittaa akustisen amplitudin maksimin ja sininen minimin. Vihreä osoittaa nousevan painekäyrän kaarevuuden vaihtopisteen ja vaaleansininen laskevan.

Havainnot: Puristuspuheen nousu on hieman häiriöinen. Käyrät ovat toistensa kaltaisia, mutta amplitudit eroavat selvästi. Palaminen on tasaisen turbulenttista. Akustisen amplitudin minimi ja maksimi ovat kaukana toisistaan ja kaksi maksimia esiintyy myöhään. Laskevat vaihtopisteet ovat alempana kuin nousevat, yksi nouseva esiintyy erittäin aikaisin.



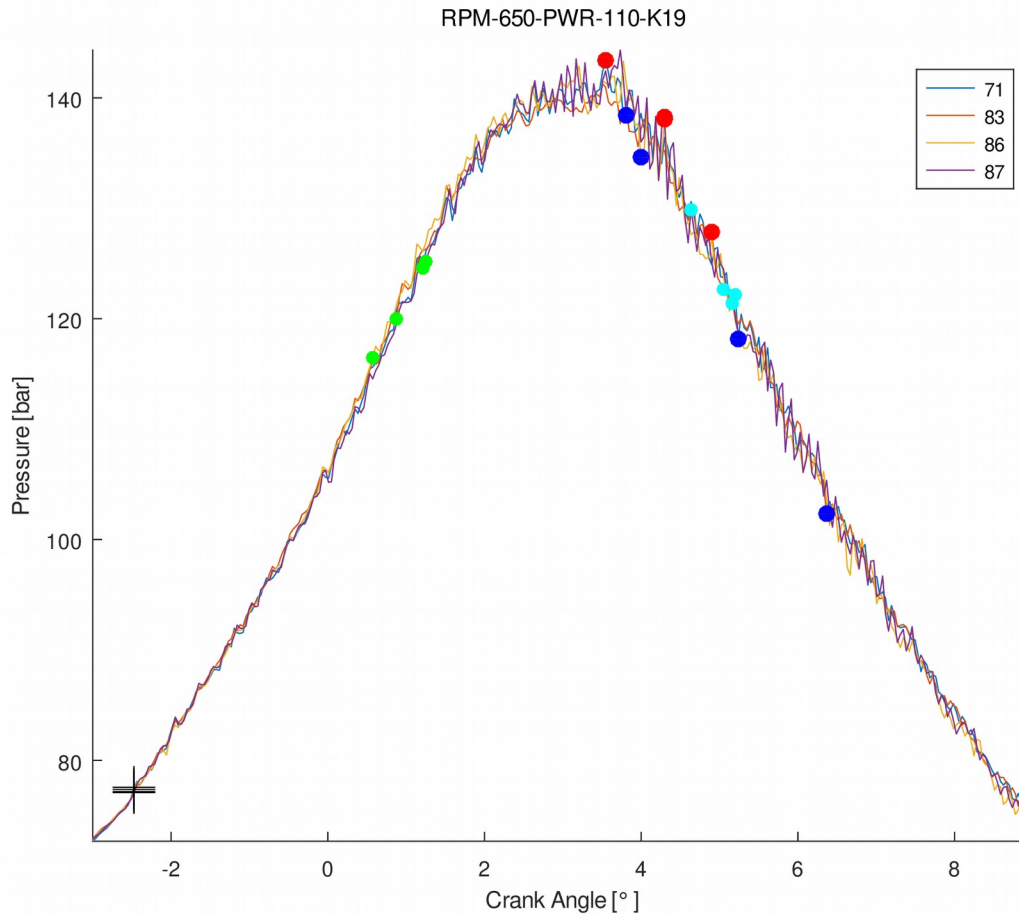
Kuva 24: Sylinteripaineen (Pressure) käyrät kammien kulman (Crank Angle) funktiona kierrosluvulla 650 rpm ja teholla 100%. Ajotyypinä nakuttava (Knock, K). Neljä saman syttymiskohdan (Start of Combustion, SOC) tapahtumaa, merkitty mustalla ristillä. Oikeassa yläkulmassa tapahtumien numerot. Pisteiden merkitys: Punainen osoittaa akustisen amplitudin maksimin ja sininen minimin. Vihreä osoittaa nousevan painekäyrän kaarevuuden vaihtopisteen ja vaaleansininen laskevan.

Havainnot: Paineen nousun turbulenttisuus kasvaa 115 bar kohdalla. Käyrien luonne on keskenään erilainen. Käyrän 32 akustisen amplitudin ensimmäistä positiivista huippua ei merkata, koska myöhemmin esiintyy korkeampi huippu. Tämä on MAPO:n ominaisuus. Sekä nousevien että laskevien vaihtopisteiden hajonta on pientä.



Kuva 25: Sylinteripaineen (Pressure) käyrät kammien kulman (Crank Angle) funktiona kierrosluvulla 650 rpm ja teholla 110%. Ajotyypinä tasainen (Reference, R). Neljä saman syttymiskohdan (Start of Combustion, SOC) tapahtumaa, merkitty mustalla ristillä. Oikeassa yläkulmassa tapahtumien numerot. Pisteiden merkitys: Punainen osoittaa akustisen amplitudin maksimin ja sininen minimin. Vihreä osoittaa nousevan painekäyrän kaarevuuden vaihtopisteen ja vaaleansininen laskevan.

Havainnot: Puristuspaineen nousu on lievästi aaltoileva. Käyrät ovat toistensa kaltaisia, mutta amplitudit eroavat selvästi. Palaminen on huippua kohti kasvavan turbulენტtista. Akustisen amplitudin minimit ja maksimit ovat huipun tuntumassa, yksi poikkeus. Yksi maksimi esiintyy myöhään. Yksi nouseva vaihtopiste esiintyy aikaisin.



Kuva 26: Sylinteripaineen (Pressure) käyrät kammien kulman (Crank Angle) funktiona kierrosluvulla 650 rpm ja teholla 110%. Ajotyypinä nakuttava (Knock, K). Neljä saman syttymiskohdan (Start of Combustion, SOC) tapahtumaa, merkitty mustalla ristillä. Oikeassa yläkulmassa tapahtumien numerot. Pisteiden merkitys: Punainen osoittaa akustisen amplitudin maksimin ja sininen minimin. Vihreä osoittaa nousevan painekäyrän kaarevuuden vaihtopisteen ja vaaleansininen laskevan.

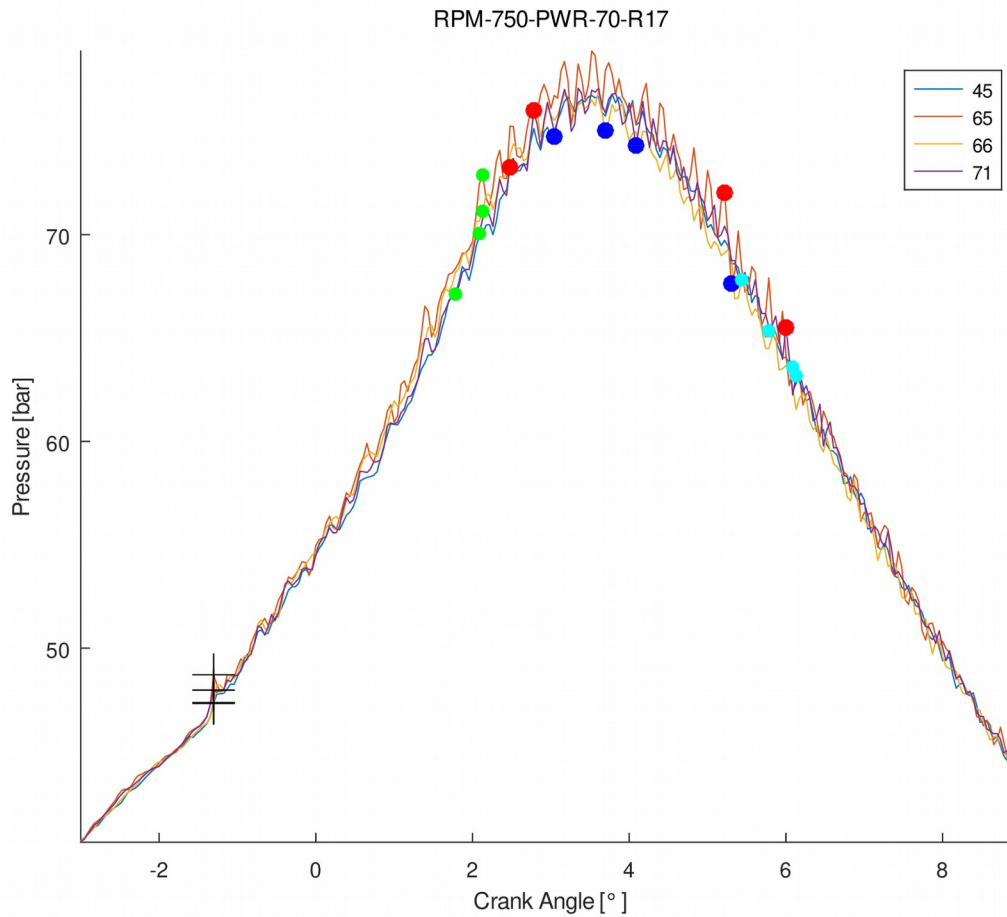
Havainnot: Palamisen paine nousee aaltoillen ja lähes synkronisesti. Käyrien luonne on keskenään samankaltainen. Kaikki nakuttavat. Akustisen amplitudin minimi ja maksimit eroavat toisistaan ja sijaitsevat laskevalla painekäyrällä. Vaihtopisteiden hajonta on pientä.

5.3 Paineokuvaajat 750 RPM

Sylinteripaineokuvaajat kierrosluvulle 750 RPM on esitetty kuvissa 27-36. Kuvaajissa vertaillaan ajotapoja tasainen ja nakuttava toisiinsa. Tasainen ajo on moottorin normaalia käyttöä puuttumatta säätölaitteisiin. Kuormitustaso ja kierrosluku ovat asetetut. Nakuttava ajotapa on toteutettu siten, että sytytysennakko on pakotettu aikaisemmalle, kuin mitä moottorin säätölaite määrää. Nakutustila on operaattorin kuulohavainnon perusteella vahvistama.

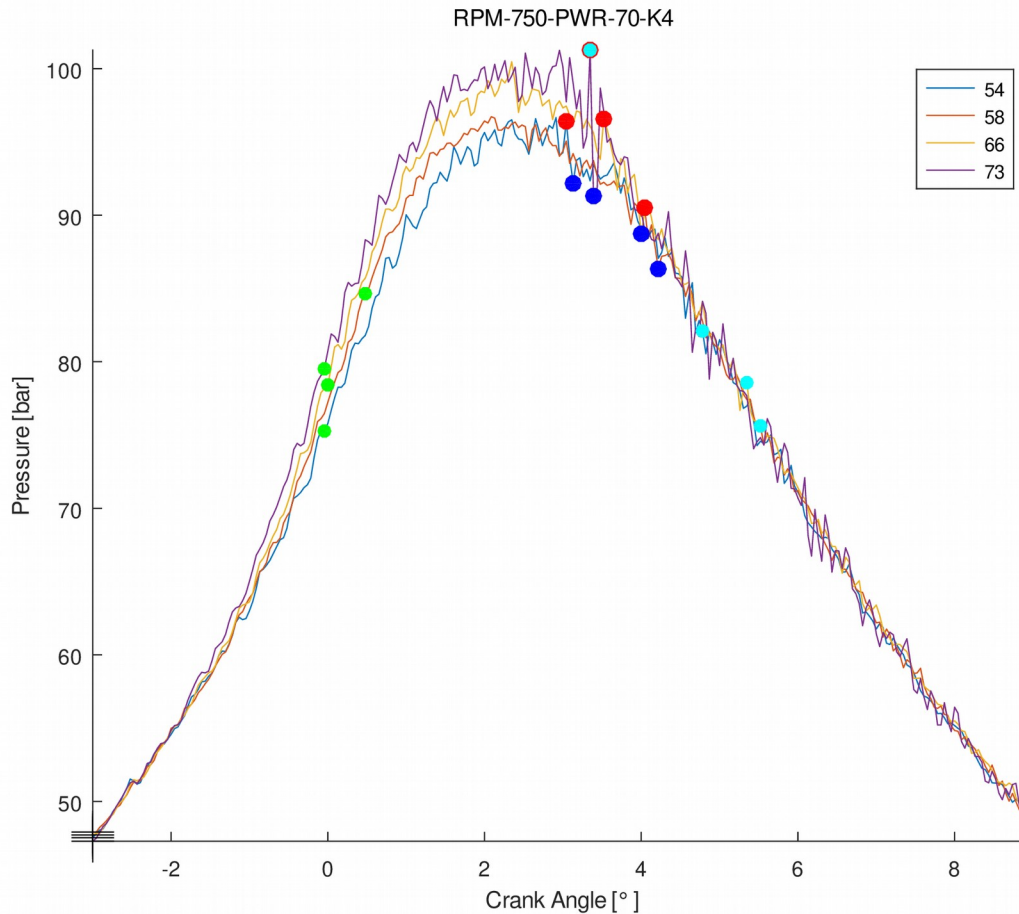
Tarkoituksena on tehdä havaintoja moottorin ajotapojen ja painekäyrässä tapahtuvien muutosten suhteesta sekä tarkkailla algoritmien sijoittamien analyyttisten pisteiden käyttäytymistä. Analyyttisten pisteiden määrä ja laatu ovat hyviä silloin, kun kiinnostuksen kohteena olevat ilmiöt moduloivat pisteiden amplitudia ja sijaintia systemaattisesti. Pisteet jo sinänsä ovat informatiivisia, mutta niiden päätarkoitus on toimia syötteenä jatkossa kehitettävälle koneoppivalle järjestelmälle.

Ryhmien 550 RPM, 650 RPM ja 750 RPM välisessä tarkastelussa ei ole havaittavissa mitään ryhmäkohtaista erottavaa ominaisuutta, joka luokittelisi ryhmät. Toisin sanoen kierrosluvun muuttuminen arvosta 550 RPM arvoon 650 RPM ja edelleen 750 RPM ei aiheuta visuaalisesti havaittavaa ryhmäkohtaisten ominaisuuksien eroa ryhmien välillä. Eroa saattaa kuitenkin löytyä tutkittaessa asiaa tilastollisella analyysillä.



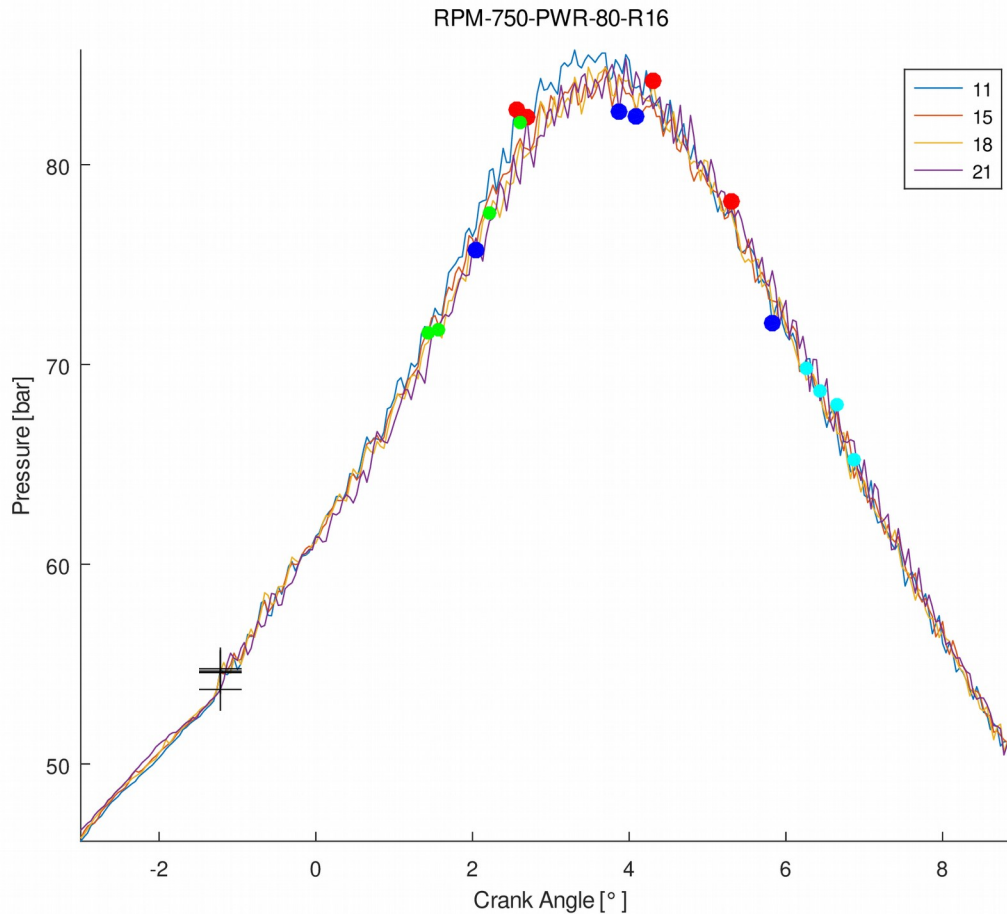
Kuva 27: Sylinteripaineen (Pressure) käyrät kammien kulman (Crank Angle) funktiona kierrosluvulla 750 rpm ja teholla 70%. Ajotyypinä tasainen (Reference, R). Neljä saman syttymiskohdan (Start of Combustion, SOC) tapahtumaa, merkitty mustalla ristillä. Oikeassa yläkulmassa tapahtumien numerot. Pisteiden merkitys: Punainen osoittaa akustisen amplitudin maksimin ja sininen minimin. Vihreä osoittaa nousevan painekäyrän kaarevuuden vaihtopisteen ja vaaleansininen laskevan.

Havainnot: Puristuspaineen nousu on häiriöinen. Käyrät ovat toistensa kaltaisia, mutta turbulentsisuudet eroavat selvästi. Akustisen amplitudin minimit ja maksimit ovat kaukana toisistaan ja tapauskohtainen sijainti vaihtelee. Laskevat vaihtopisteet ovat alempana kuin nousevat, yksi poikkeus on lähes tasan.



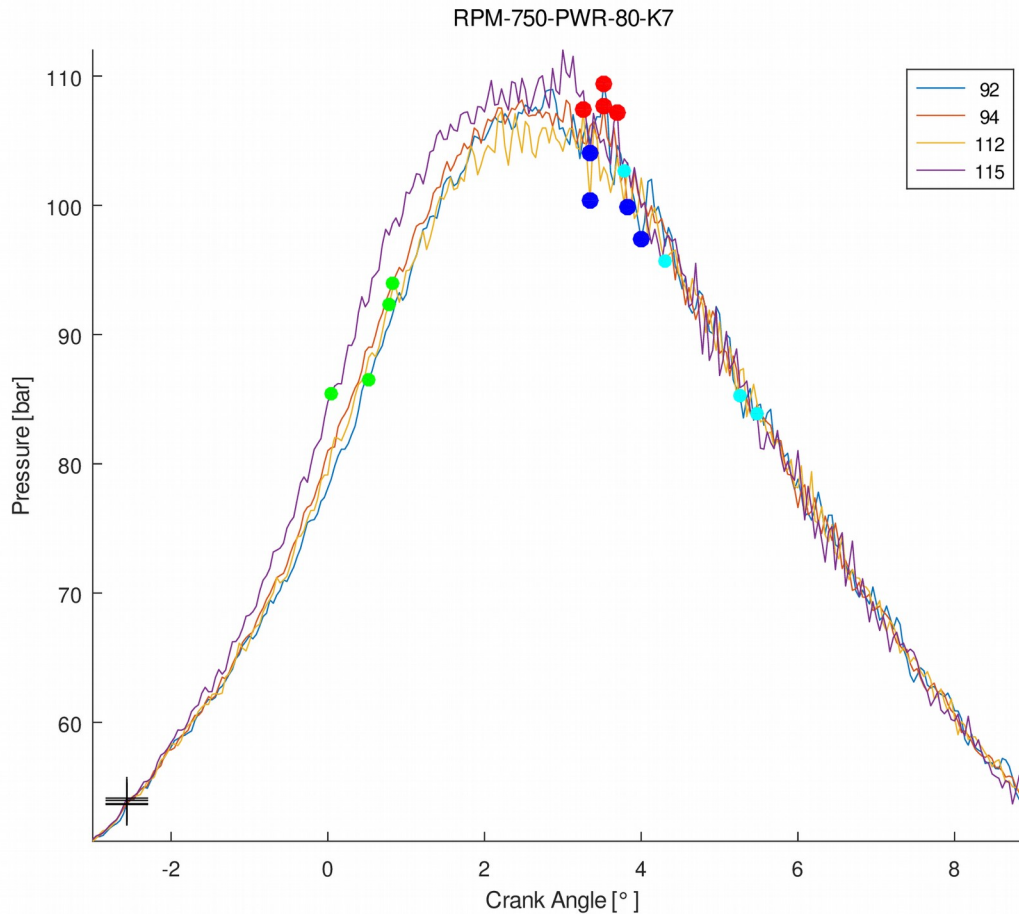
Kuva 28: Sylinteripaineen (Pressure) käyrät kammien kulman (Crank Angle) funktiona kierrosluvulla 750 rpm ja teholla 70%. Ajotyypinä nakuttava (Knock, K). Neljä saman syttymiskohdan (Start of Combustion, SOC) tapahtumaa, merkitty mustalla ristillä. Oikeassa yläkulmassa tapahtumien numerot. Pisteiden merkitys: Punainen osoittaa akustisen amplitudin maksimin ja sininen minimin. Vihreä osoittaa nousevan painekäyrän kaarevuuden vaihtopisteen ja vaaleansininen laskevan.

Havainnot: Käyrien luonne on keskenään erilainen. Osa nakuttaa, osa ei. Akustisen amplitudin maksimit ja minimi sijaitsevat laskevalla käyrällä. Nousevan ja laskevan vaihtopisteen sijainti ja hajonta on lähes tasan.



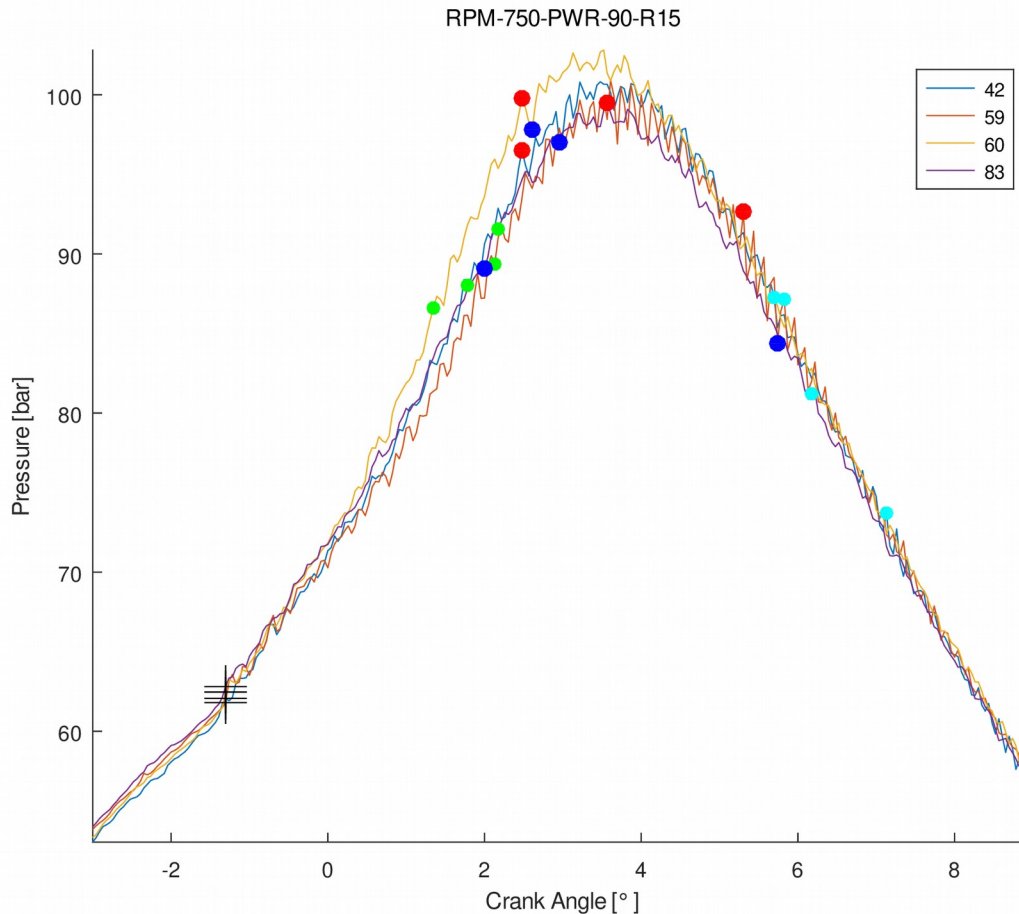
Kuva 29: Sylinteripaineen (Pressure) käyrät kammien kulman (Crank Angle) funktiona kierrosluvulla 750 rpm ja teholla 80%. Ajotyypinä tasainen (Reference, R). Neljä saman syttymiskohdan (Start of Combustion, SOC) tapahtumaa, merkitty mustalla ristillä. Oikeassa yläkulmassa tapahtumien numerot. Pisteiden merkitys: Punainen osoittaa akustisen amplitudin maksimin ja sininen minimin. Vihreä osoittaa nousevan painekäyrän kaarevuuden vaihtopisteen ja vaaleansininen laskevan.

Havainnot: Puristuspuheen nousu on häiriöinen. Käyrät ovat toistensa kaltaisia. Palaminen on tasaisen turbulentista. Akustisen amplitudin minimi ja maksimit ovat kaukana toisistaan ja tapauskohtainen sijainti vaihtelee sekä nousevalle että laskevalle käyrälle. Laskevat vaihtopisteet ovat alempana kuin nousevat. Nousevien vaihtopisteiden hajonta on suurempi.



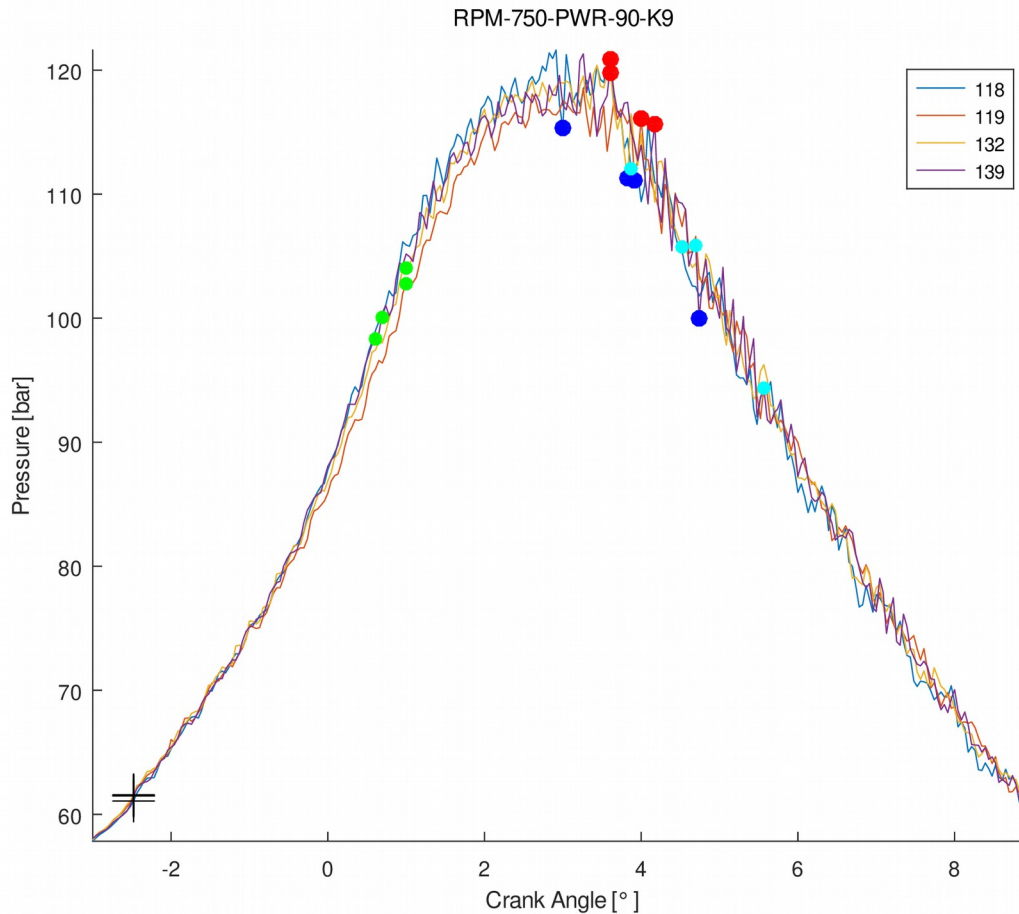
Kuva 30: Sylinteripaineen (Pressure) käyrät kammien kulman (Crank Angle) funktiona kierrosluvulla 750 rpm ja teholla 80%. Ajotyypinä nakuttava (Knock, K). Neljä saman syttymiskohdan (Start of Combustion, SOC) tapahtumaa, merkitty mustalla ristillä. Oikeassa yläkulmassa tapahtumien numerot. Pisteiden merkitys: Punainen osoittaa akustisen amplitudin maksimin ja sininen minimin. Vihreä osoittaa nousevan painekäyrän kaarevuuden vaihtopisteen ja vaaleansininen laskevan.

Havainnot: Palamisen paine nousee vakaasti. Käyrien keskinäinen turbulenttisuus vaihtelee. Akustisen amplitudin minimit ja maksimit esiintyvät heti huipun jälkeen. Nousevan käyrän akustinen energia on pientä ja laskevan suurta. Nousevan vaihtopisteen hajonta on pientä ja laskevan suurta.



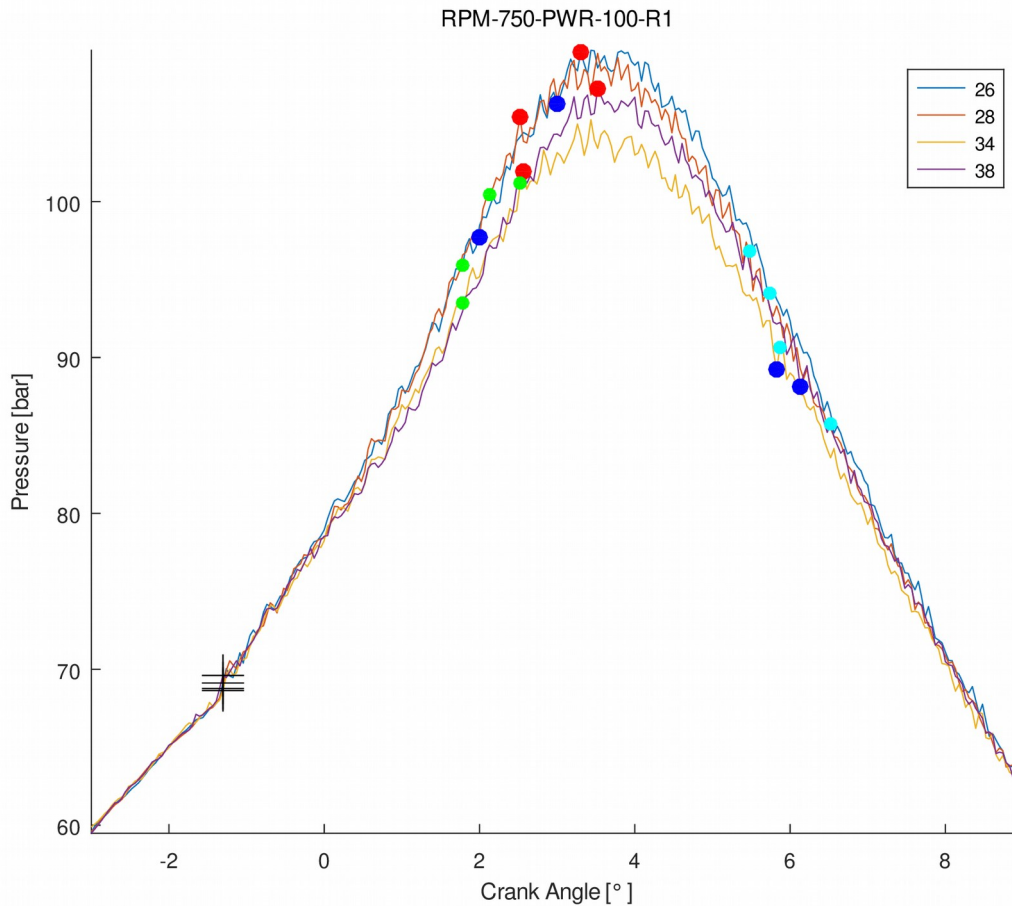
Kuva 31: Sylinteripaineen (Pressure) käyrät kammien kulman (Crank Angle) funktiona kierrosluvulla 750 rpm ja teholla 90%. Ajotyypinä tasainen (Reference, R). Neljä saman syttymiskohdan (Start of Combustion, SOC) tapahtumaa, merkitty mustalla ristillä. Oikeassa yläkulmassa tapahtumien numerot. Pisteiden merkitys: Punainen osoittaa akustisen amplitudin maksimin ja sininen minimin. Vihreä osoittaa nousevan painekäyrän kaarevuuden vaihtopisteen ja vaaleansininen laskevan.

Havainnot: Puristuspaineen nousu on häiriöinen. Käyrät ovat toistensa kaltaisia. Palaminen tasaisen turbulენტtista. Akustisen amplitudin minimi ja maksimit ovat kaukana toisistaan ja tapauskohtainen sijainti vaihtelee. Laskevien vaihtopisteiden hajonta on suurempi kuin nousevien.



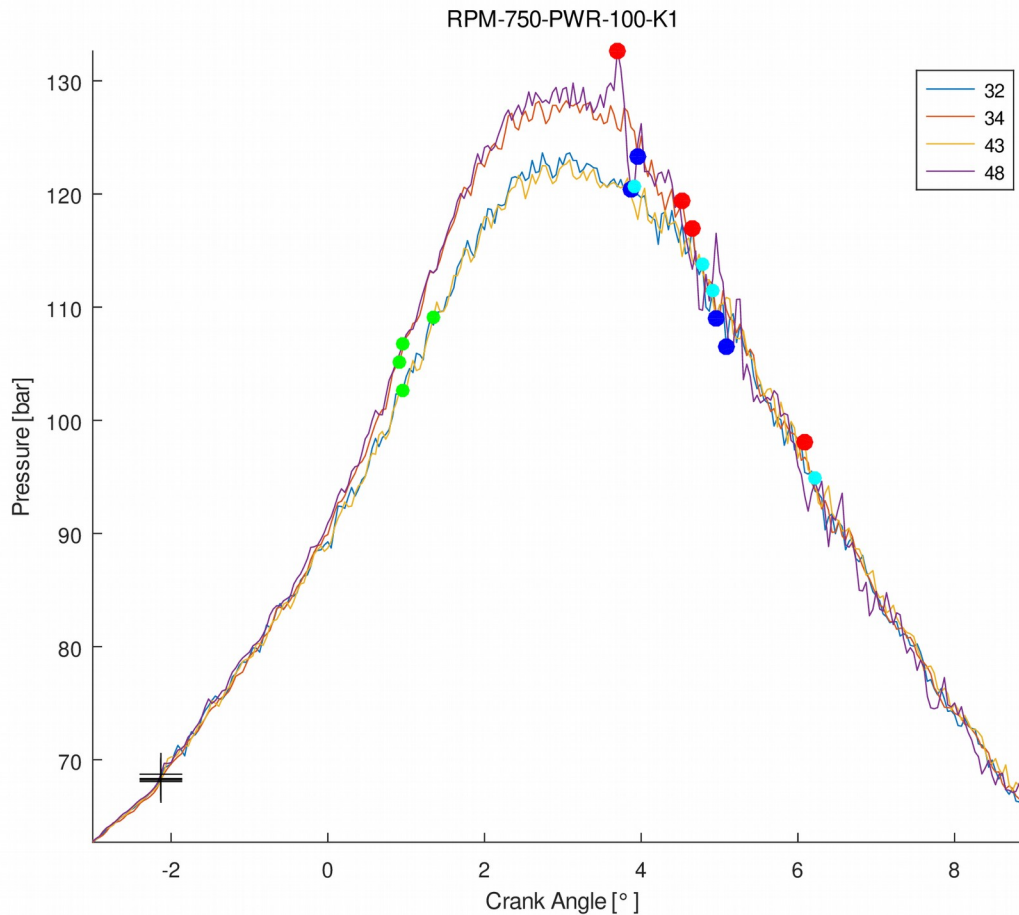
Kuva 32: Sylinteripaineen (Pressure) käyrät kammien kulman (Crank Angle) funktiona kierrosluvulla 750 rpm ja teholla 90%. Ajotyypinä nakuttava (Knock, K). Neljä saman syttymiskohdan (Start of Combustion, SOC) tapahtumaa, merkitty mustalla ristillä. Oikeassa yläkulmassa tapahtumien numerot. Pisteiden merkitys: Punainen osoittaa akustisen amplitudin maksimin ja sininen minimin. Vihreä osoittaa nousevan painekäyrän kaarevuuden vaihtopisteen ja vaaleansininen laskevan.

Havainnot: Käyrien luonne on keskenään erilainen. Toiset nakuttavat ja toiset eivät nakuta. Palamisen paine on kasvavan turbulენტista. Akustisen amplitudin minimi ja maksimi esiintyvät huipun kohdalla ja jälkeen. Nousevan vaihtopisteen hajonta on pientä ja laskevan suurta.



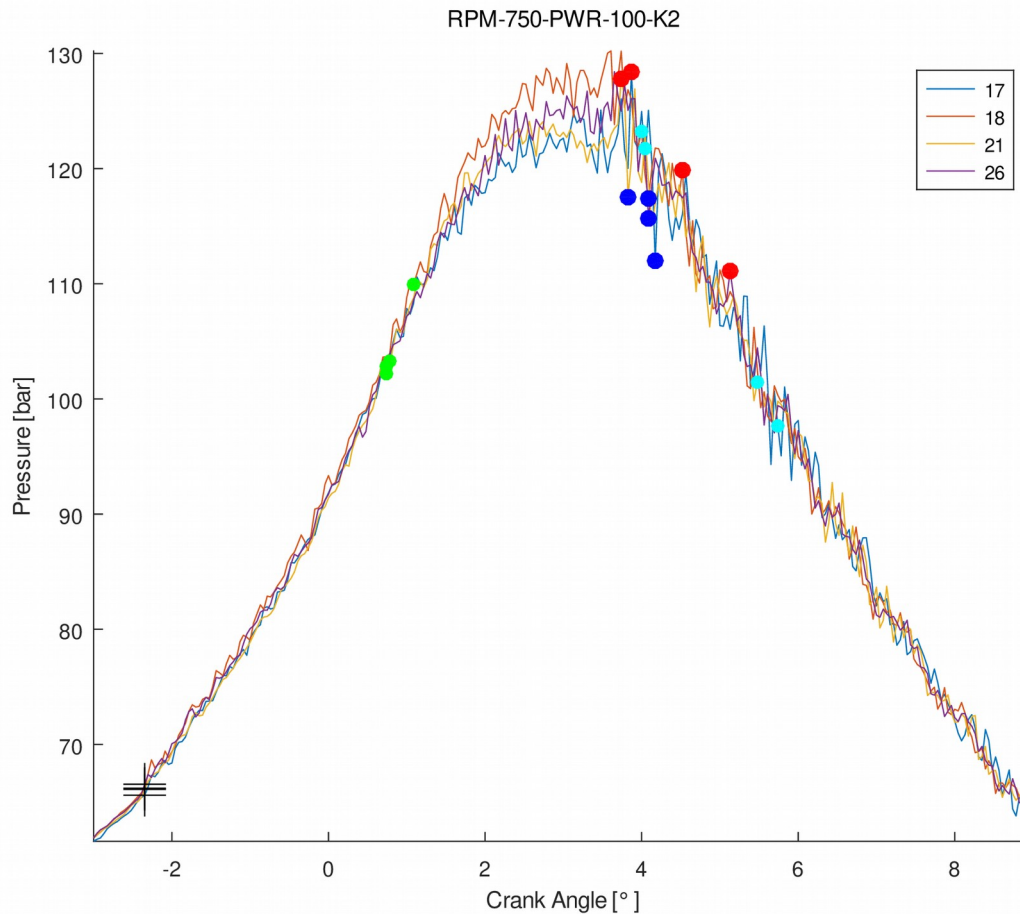
Kuva 33: Sylinteripaineen (Pressure) käyrät kammien kulman (Crank Angle) funktiona kierrosluvulla 750 rpm ja teholla 100%. Ajotyypinä tasainen (Referense, R). Neljä saman syttymiskohdan (Start of Combustion, SOC) tapahtumaa, merkitty mustalla ristillä. Oikeassa yläkulmassa tapahtumien numerot. Pisteiden merkitys: Punainen osoittaa akustisen amplitudin maksimin ja sininen minimin. Vihreä osoittaa nousevan painekäyrän kaarevuuden vaihtopisteen ja vaaleansininen laskevan.

Havainnot: Puristuspaineen nousu on häiriöinen. Käyrät ovat toistensa kaltaisia, mutta amplitudit eroavat selvästi. Palaminen on tasaisen turbulენტtista. Akustisen amplitudin minimi ja maksimit ovat kaukana toisistaan ja tapauskohtainen sijainti vaihtelee. Laskevan vaihtopisteen hajonta on lievästi suurempaa kuin nousevan.



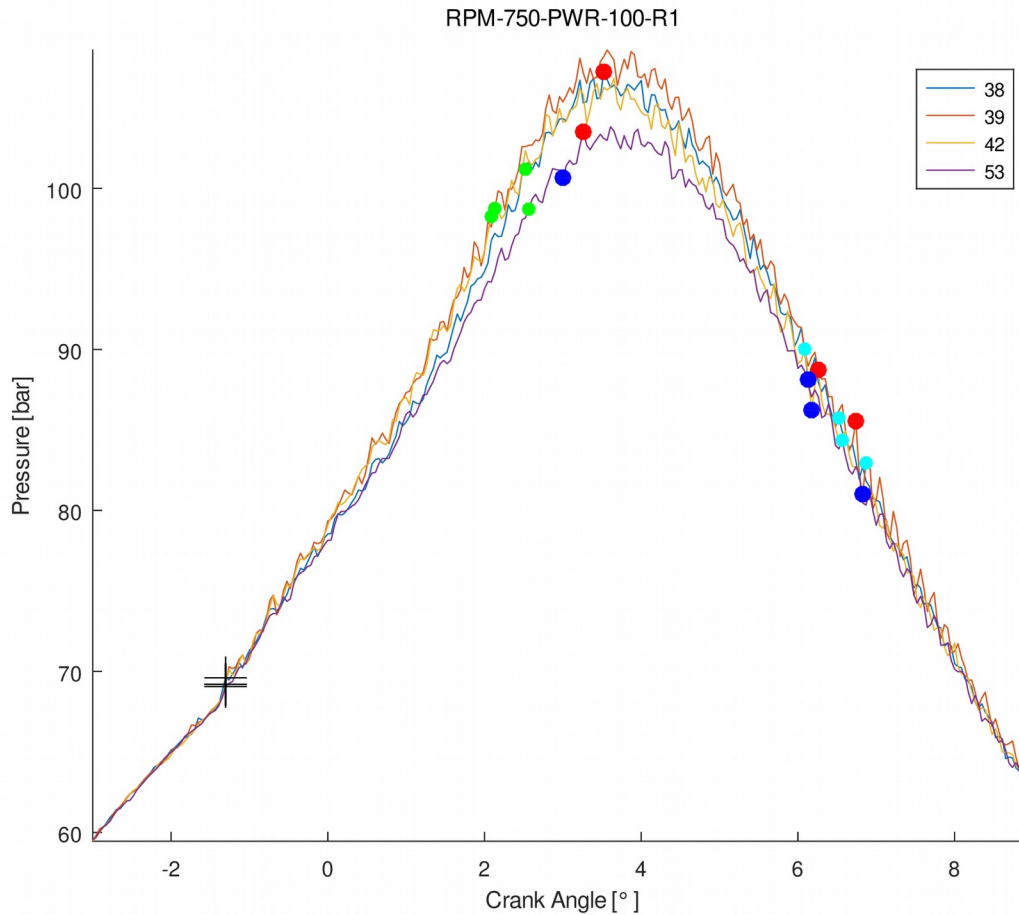
Kuva 34: Sylinteripaineen (Pressure) käyrät kammien kulman (Crank Angle) funktiona kierrosluvulla 750 rpm ja teholla 100%. Ajotyypinä nakuttava (Knock, K). Neljä saman syttymiskohdan (Start of Combustion, SOC) tapahtumaa, merkitty mustalla ristillä. Oikeassa yläkulmassa tapahtumien numerot. Pisteiden merkitys: Punainen osoittaa akustisen amplitudin maksimin ja sininen minimin. Vihreä osoittaa nousevan painekäyrän kaarevuuden vaihtopisteen ja vaaleansininen laskevan.

Havainnot: Puristusaine nousee lievästi aaltoillen. Käyrien luonne on keskenään samankaltainen. Palaminen on huippua kohti kasvavan turbulენტtista ja kaikki tapaukset nakuttavat laskevalla käyrällä. Akustisen amplitudin minimi ja maksimit esiintyvät laskevalla käyrällä. Nousevan vaihtopisteen hajonta on pientä ja laskevan suurta.



Kuva 35: Sylinteripaineen (Pressure) käyrät kammien kulman (Crank Angle) funktiona kierrosluvulla 750 rpm ja teholla 100%. Ajotyypinä nakuttava (Knock, K). Neljä saman syttymiskohdan (Start of Combustion, SOC) tapahtumaa, merkitty mustalla ristillä. Oikeassa yläkulmassa tapahtumien numerot. Pisteiden merkitys: Punainen osoittaa akustisen amplitudin maksimin ja sininen minimin. Vihreä osoittaa nousevan painekäyrän kaarevuuden vaihtopisteen ja vaaleansininen laskevan.

Havainnot: Puristusaine nousee lievästi aalloilla. Käyrien luonne on keskenään samankaltainen. Palaminen on kasvavan turbulenssin ja huipun jälkeen nakuttavaa. Akustisen amplitudin minimit ja maksimit esiintyvät laskevalla käyrällä. Nousevan vaihtopisteen hajonta on pientä ja laskevan suurta.



Kuva 36: Sylinteripaineen (Pressure) käyrät kammien kulman (Crank Angle) funktiona kierrosluvulla 750 rpm ja teholla 100%. Ajotyypinä tasainen (Reference, R). Neljä saman syttymiskohdan (Start of Combustion, SOC) tapahtumaa, merkitty mustalla ristillä. Oikeassa yläkulmassa tapahtumien numerot. Pisteiden merkitys: Punainen osoittaa akustisen amplitudin maksimin ja sininen minimin. Vihreä osoittaa nousevan painekäyrän kaarevuuden vaihtopisteen ja vaaleansininen laskevan.

Havainnot: Puristuspaineen nousu on lievästi häiriöinen. Käyrät ovat toistensa kaltaisia. Palaminen on tasaisen turbulენტtista. Akustisen amplitudin kolme minimiä ja kaksi maksimia esiintyvät kaukana laskevalla käyrällä. Laskevat vaihtopisteet ovat alempana kuin nousevat.

6 Tulokset

Tämä tutkielma käsittelee kaasumoottorin palamistapahtumien luokittelua normaali/epänormaali (nakuttava) perustuen sylinteripainekäyrän analyysiin. Työn tiukasta aikarajoituksesta johtuen luokittelijaa ei tässä yhteydessä esitetä. Tuloksina esitetään algoritmit ja analyttiset pisteet, jotka kuvaavat kullekin painekäyrälle luonteenomaisia piirteitä. Muunnos (Transformation) operaatioissa datajoukko korvataan uudella pienemmällä datajoukolla, jossa tutkittavien ilmiöiden edustavuus säilyy. Tässä tutkielmassa on myös laadullisen tutkimuksen piirteitä. Tällä valaistaan nakutustutkimuksen toimintaympäristöä ja ongelmakenttää.

Työssä on kehitetty palamisen alkuhetken havaitseva algoritmi (SOC). Algoritmi on rakenteeltaan yksinkertainen mutta tehokas. Juoksevan summan (Running Sum) suodatus yhdistettynä differentiointiin voidaan tehdä yhdellä suodattimella. Kun kaksi tällaista yksikköä kytketään sarjaan ja määritellään raja-arvo (Threshold Level), on tuloksena SOC-algoritmi. Yleisesti tunnettu tosiasia on differentioinnin taipumus voimistaa korkeataajuisia kohinaa. Tässä yhteydessä käytetty rakenne, jossa differentiointiin on yhdistetty alipäästösuodatin, on toiminut moitteetta. SOC-algoritmi tarttuu tehokkaasti ensimmäiseen painekäyrän pisteeseen, jonka amplitudi on suurempi kuin motor-käyrää edettäessä olisi. Aikaväli tulpan kipinästä SOC-pisteeseen edustaa syttymisviivettä. Toistuvat säännölliset rakenteet ovat tehokkaita tehtäessä sulautettua järjestelmää.

SOC-algoritmi saattaa olla hyödyllinen myös seuraavasta syystä: Nakutuksen kontrollointijärjestelmässä on vaikeutena se, että prosessin tilaa mitataan samaan aikaan kuin sitä säädetään. SOC-algoritmin avulla voidaan poimia palamistapahtumat, jotka alkavat keskenään samasta pisteestä. Näiden tapahtumien kohdalla sytytysennakon säätöjärjestelmä on samassa säätötilanteessa. Tällä menettelyllä prosessin tilan muutos ja säätötilanteen muutos saadaan erotettua toisistaan.

Akustisen kerroksen maksimin ja minimin havaitseva algoritmi on toteutettu suodattamalla ja GNU Octaven detrend funktiolla. Minimistä ja maksimista itseisarvoltaan suurempi vastaa yleisesti käytettyä MAPO-indeksiä. Detrend funktio ei ole sulautetussa järjestelmässä paras mahdollinen ja tämän algoritmin virtaviivaistamista pitää pohtia.

Akustinen kerros voidaan erottaa pelkällä ylipäästösuodatuksella. Matalan taajuuskaistan suodattaminen pois vaatii kuitenkin paljon kertoimia tai kompleksisen suodatinrakenteen.

Nousevan ja laskevan painekäyrän kaarevuuden vaihtopisteiden algoritmi on toteutettu juoksevan summan (Running Sum) suodatuksena ja differentiointina, yhtenä suodinrakenteena.

6.1 Keskustelu

Tässä tutkielmassa on sekä määrällisen (kvantitatiivisen) että laadullisen (kvalitatiivisen) tutkimuksen piirteitä. Nakutus on ilmiö, jonka suuruutta ei ainakaan toistaiseksi voi mitata. Indeksien kautta asetetaan nakutusilmiölle hyväksyttävän maksimin raja. Itse asiassa tämä on siedettävän kokonaispäästömäärän raja. Tämä raja asetetaan moottorimalli- ja mittaustapa kohtaiseen kokemusperäiseen arvoon. Silti nakutusindeksi on enemmän kuin dikotominen, kaksiarvoinen muuttuja. Jos ajetaan yli raja-arvon, päästöjen kehittyminen kasvaa voimakkaasti ja päästöjen lajien (CO, HC, NO_x ja SO_x) muodostama profiili muuttuu. Indeksille voi asettaa raja-arvon tai -arvoja, mutta mitta-asteikon sovittaminen on ongelmallista. Edellä mainitun johdosta kertomuksellinen aineisto on elimellinen osa tätä tutkielmaa. On myös huomattava, että yleisin ja tunnetuin nakutusilmaisoin on asiantuntijan kuulohavainto. Parhaaseen tulokseen päästään yhdistämällä kuulohavainto ja mittaus.

Prosessikuvasta ja paineen mittauksen vaikeuksista on todettava seuraavaa:

Sylinteripaineen vaihtelu havaitaan yhdessä mittauspisteessä. Tällä mittauksella ei saada tietoa siitä, missä nakutuksen akustisen signaalin alkupiste sijaitsee. Havaittava paine sisältää sylinterin kaikkien värähtelytilojen superposition kyseessä olevassa pisteessä ajanhetkien funktiona. Se missä vaihekulmassa värähdystilat summautuvat, määrää sen kuinka suuri on yhteinen amplitudi.

Työ nakutustutkimuksen parissa on vasta alussa. Tulevassa työssä kehitetään koneoppiva järjestelmä, joka analyttisten pisteiden perusteella tekee luokittelun. Tämä järjestelmä liitetään tuotantomoottoriin, jolloin saadaan tietoa moottorin todellisista käyttöolosuhteista. Idea sylinteripaineen mittaukseen perustuvasta koneoppivasta järjestelmästä on ollut tutkijoiden keskuudessa olemassa jo jonkin aikaa ja myös järjestelmiä on rakennettu. Tästä esimerkkinä julkaisu Knock Detection in Combustion Engine Time Series Using a Theory-

Guided 1-D Convolutional Neural Network Approach, (Ofner et al., 2022). Järjestelmän toimivuus ja käyttökelpoisuus jättää toiveille sijaa, joten tutkimustyötä vielä tarvitaan.

Nakutustutkimuksen suuri kysymys on ilmiöön liittyvän stokastiikan selvittäminen. Stokastisessa ilmiössä on sisällä yksi tai useampi satunnaismuuttuja. Kaasumoottorissa mahdollisia satunnaismuuttujia ovat polttoaineen koostumus, ilma/polttoaine -seoksen homogeenisuus, karstapartikkelit palotilassa, pintojen likaantuminen, voiteluainepisarat ja muut toistaiseksi tuntemattomat asiat.

Lähdeluettelo

- Brecq, G., Corre, O., 2005. Modeling of In-cylinder Pressure Oscillations under Knocking Conditions: Introduction to Pressure Envelope Curve. SAE Tech. Pap. <https://doi.org/10.4271/2005-01-1126>
- Brunt, M.F.J., Pond, C.R., Biundo, J., 1998. Gasoline Engine Knock Analysis using Cylinder Pressure Data. SAE Trans. 107, 1399–1412.
- Checkel, M.D., Dale, J.D., 1986. Computerized Knock Detection from Engine Pressure Records. p. 860028. <https://doi.org/10.4271/860028>
- Corrigan, D.J., Fontanesi, S., 2021. Knock: A Century of Research. SAE Int. J. Engines 15, 03-15-01–0004. <https://doi.org/10.4271/03-15-01-0004>
- Cummings, H.K., 1927. Methods of Measuring the Antiknock Value of Fuels. SAE Trans. 22, 24–39.
- Draper, C.S., 1935. The Physical Effects of Detonation in a Closed Cylindrical Chamber.
- Fang, C., Ouyang, M., Yang, F., 2017. Real-time start of combustion detection based on cylinder pressure signals for compression ignition engines. Appl. Therm. Eng. 114, 264–270. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.11.161>
- He, X., Qi, Y., Wang, Z., Wang, J., Shuai, S., Tao, L., 2015. Visualization of the Mode Shapes of Pressure Oscillation in a Cylindrical Cavity. Combust. Sci. Technol. 187, 1610–1619. <https://doi.org/10.1080/00102202.2015.1038385>
- Heywood, J.B., 1988. Internal combustion engine fundamentals, McGraw-Hill series in mechanical engineering. McGraw-Hill, New York.
- Leppard, W.R., 1982. Individual-Cylinder Knock Occurrence and Intensity in Multicylinder Engines (SAE Technical Paper No. 820074). SAE International, Warrendale, PA. <https://doi.org/10.4271/820074>
- Liiva, P.M., Valentine, J.N., Cobb, J.M., Acker, W.P., 1992. Use of Multiple Pressure Transducers to Find In-Cylinder Knock Location. p. 922368. <https://doi.org/10.4271/922368>
- Miller, R., 1947. Supercharging and Internal Cooling Cycle for High Output. Trans. Am. Soc. Mech. Eng. 1947, 453–454.
- Naber, J., Blough, J.R., Frankowski, D., Goble, M., Szpytman, J.E., 2006. Analysis of Combustion Knock Metrics in Spark-Ignition Engines. pp. 2006-01–0400. <https://doi.org/10.4271/2006-01-0400>
- Oakey, J., 2015. Fuel Flexible Energy Generation: Solid, Liquid and Gaseous Fuels. Elsevier Science & Technology, Cambridge, UK.
- Ofner, A.B., Kefalas, A., Posch, S., Geiger, B.C., 2022. Knock Detection in Combustion Engine Time Series Using a Theory-Guided 1-D Convolutional Neural Network Approach. IEEE ASME Trans. Mechatron. 1–11. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2022.3144832>

- Rassweiler, G.M., Withrow, L., Steele, S., 1935. Flame Temperatures Vary with Knock and Combustion-Chamber Position. SAE Trans. 30, 125–146.
- Ronney, P.D., Shoda, M., Waida, S.T., Westbrook, C.K., Pitz, W.J., 1991. Knock Characteristics of Liquid and Gaseous Fuels in Lean Mixtures. SAE Trans. 100, 557–568.
- Wärtsilä methane number calculator [WWW Document], 2022. . Wartsila.com. URL <https://www.wartsila.com/marine/products/gas-solutions/methane-number-calculator> (accessed 19.5.22).
- wärtsilä-50df.pdf (Brochure), 2009. . Wärtsilä Corporation.
- Wilson, J.S. (Ed.), 2005. Chapter 16 - Pressure Sensors, in: Sensor Technology Handbook. Newnes, Burlington, pp. 411–456. <https://doi.org/10.1016/B978-075067729-5/50056-2>