

Opinnäytetyö (AMK)

Ajoneuvo- ja kuljetustekniikka

2024

Lauri Linna

Polttomoottorin suorituskyvyn nostaminen

- John Deere 6068 -moottorin suoritusarvojen
mittaus ja arviointi



Opinnäytetyö (AMK) | Tiivistelmä

Turun ammattikorkeakoulu

Ajoneuvo- ja kuljetustekniikka

Kesäkuu 2024 | 45 sivua

Lauri Linna

Polttomoottorin suorituskyvyn nostaminen

- John Deere 6068 -moottorin suoritusarvojen mittaus ja arviointi

Tässä työssä käydään läpi yhteispaineruiskutuksella varustetun dieselmoottorin tehonnoston taustalla vaikuttavaa teoriaa suhteutettuna moottoritekniikassa tapahtuneeseen kehitykseen ja tehonnostoon historiassa. Samalla työ toimii dokumentaationa toimeksiantajayritys Ekotuning Group Oy:lle suoritetuista mittauksista ja analyyseistä.

Tämän työn mahdollisti Ekotuning Group Oy:n kattava mittausvälineistö, jonka avulla moottorin suorituskykyä on pystytty mittaamaan ja myöhemmin valmiit tulokset analysoimaan. Moottorin tehonnoston havainnollistamiseksi työssä on tehovaatimuksen kannalta oleellisin osin tuotu esiin moottoriteknistä historiaa, jonka vaikutusta on peilattu tämän työn moottorin kehitykseen ja sen taustalla vaikuttaviin tekijöihin.

Työn tuloksena mittaustietojen pohjalta lasketut mittaustulokset osoittivat tarkastelukohteena olleen moottorikokoonpanon saavuttaneen erinomaisen korkeat testitulokset. Päästöjen minimointiin liittyvää moottorin hallintaa oli pystytty hyödyntämään myös suorituskyvyn nostossa. Jatkossa Ekotuning pystyy tarvittaessa ohjaamaan tuotekehitystään ja suhteuttamaan soveltavat moottorikokoonpanot tässä saavutettuihin tuloksiin.

Asiasanat:

moottori, ahdinmoottorit, päästöt, dieselmoottorit, bensiinimoottorit

Bachelor's Thesis | Abstract

Turku University of Applied Sciences

Automotive and Transportation Engineering

June 2024 | 45 pages

Lauri Linna

Improving the Performance of an Internal Combustion Engine

- John Deere 6068 -Engine Performance Measurement and Evaluation

This work contains information about tuning performance of a common rail diesel engine, the theory behind it as well as historical aspects of performance and engine technology. At the same time, this work is a documentation of measurements and analyses done to this engine.

This work was made possible because of Ekotuning Groups comprehensive range of measurement devices, which can be used to measure engine performance. To demonstrate engine tuning as a topic, there is a lot of engine performance history shown, and how it has also affected the design of the engine used in this work.

As a result, this work contains calculations about measured engine performance, which show exceptionally high-end results. Emission control technology have been used as an advantage to produce high performance in this engine. In future, Ekotuning can use calculations made in this work as help when steering product development in new directions, as well as proportioning possible custom engine assemblies to be made.

Keywords:

engine, charger, emissions, diesel-engines, gasoline-engines.

Sisältö

1 Johdanto	7
2 Teoriatausta	8
2.1 Polttomoottorin tunnuslukuja	8
2.1.1 Teho ja vääntömomentti	9
2.1.2 Tehollinen keskipaine	10
2.1.3 Moottorin fyysiset mitat ja niiden vaikutus tehontuottoon	11
2.1.4 Polttoaineen ominaiskulutus	12
2.2 Päästöt ja päästöregulaatio	13
2.2.1 Hiilidioksidi (CO ₂)	14
2.2.2 Typen oksidit (NO _x)	15
2.2.3 Hiukkaspäästöt (PM)	16
2.2.4 Häkä eli hiilimonoksidi (CO)- ja hiilivety (HC) -yhdisteet	16
2.3 Ekotuning Group Oy:n John Deere -moottorin tekniset tiedot	17
2.3.1 Moottorilohko	19
2.3.2 Ruiskutuslaitteet	20
2.3.3 Nokka-akseli	20
2.3.4 Ahtaminen	20
3 Moottorin suorituskyvyn nostaminen	22
3.1 Tehdasmoottorista kilpamoottoriksi	23
3.1.1 Alkuperäisen moottorin peruskomponenttien hyödyntäminen	23
3.1.2 Poiskarsittavat komponentit	25
3.1.3 Komponenttien uudet käyttötarkoitukset	26
3.2 Moottoritekniikan kehitys	27
3.2.1 Nostoja polttomoottorin historiasta	28
3.2.2 Suorituskyvyn tarve	30
3.3 Ohjainlaitteet ja ohjelmat	31
3.3.1 Moottorin toiminnan varmistaminen toisen maailmansodan lentokoneissa	31
3.3.2 Päästöjen hallinta	34

3.4 Virittäminen	34
4 6068-moottorin tehonmittaukset	36
4.1 Tehonmittauksen valmistelu	36
4.2 Tehonmittaus	37
4.3 Tulokset ja analysointi	39
5 Lopuksi	43
Lähteet	44

Kaavat

Kaava 1. Teho ja vääntömomentti (Heywood 2018, 60).	9
Kaava 2. Tehollinen keskipaine (Heywood 2018, 64).	10
Kaava 3. Tehollisen keskipaineen laskennan kaava (Heywood 2018, 64).	10
Kaava 4. Kokonaisiskutilavuuden kaava (Mollenhauer & Tschöke 2010, 9).	11
Kaava 5. Polttoaineen ominaiskulutuksen kaava (Heywood 2018, 66).	12

Kuvat

Kuva 1. John Deere 6068 -moottori moottoridynamometrissa.	18
Kuva 2. Moottorin männät ja kiertokanget pöydällä ennen kasausta.	19
Kuva 3. Kuvassa ympyröitynä ohjaustehostimen pumppu.	27
Kuva 4. Täyden tehon mittaus talviaikaan.	39

Kuviot

Kuvio 1. Neljän eri lentokonemallin maksiminopeus eri lentokorkeuksilla (Focke-Wulf Flugzeugbau GmbH 1945).	33
Kuvio 2. Tehonmittauksen jälkeinen teho- ja vääntömomenttikäyrä.	39

Taulukot

Taulukko 1. Eri toimenpiteiden vaikutus päästöjen muodostumiseen. (Mollenhauer & Tschöke 2010, 450).	14
Taulukko 2. Ahiomootoria vastaavan moottorin tekniset tiedot (TractorData 2023).	18
Taulukko 3. Mittaussuureiden arvot halutuissa toimintapisteissä.	40

1 Johdanto

Tämä opinnäytetyö kuvaa polttomoottorin suorituskyvyn parantamisen toimintaympäristöä historian, teorian ja käytännön tekemisen tasolla. Aihe valikoitui henkilökohtaisen kiinnostuksen ja useamman työharjoittelujakson (Ekotuning Group Oy, Tractor Pulling) antaman työkokemuksen seurauksena. Ekotuning Group Oy räätälöi moottoreita erilaisiin asiakastarpeisiin toimien kahdessakymmenessä eri maassa ja jonka päämarkkina-alue on Pohjois-Amerikka.

Työn lähdeaineisto keskittyy suorituskyvyn kannalta oleellisiin moottorin komponentteihin ja oheislaitteisiin. Keskeiset tunnusluvut ja niiden keskinäiset riippuvuudet on myös tässä raportissa esitetty. Lähdeaineistossa on tuotu esille moottorien kehityksen historiaa, joka on edelleen merkityksellinen suunnannäyttäjäksi teknisine ratkaisuineen myös modernien moottoreiden kehityksessä.

Päästöjen vähentämistavoitteet ovat sääntelyn vaikutuksesta voimakkaasti ohjanneet moottoritekniikan ratkaisuja. Polttoainetalous on noussut ajankohtaiseksi ja aiempaa merkittävämmäksi kilpailutekijäksi energian kustannusvaikutusten seurauksena. Korkean tehotason saavuttamisen tarve ei moottorikehityksessä kuitenkaan ole minnekään kadonnut: töiden tulee polttoainetaloudesta ja päästöjen alentamisesta riippumatta sujua entistä tehokkaammin. Moottoriurheilussa ei menestytä tehottomilla moottoreilla.

Työ sisältää kuvauksen nykyaikaisen moottorin tehonnostokoestuksen suorittamisesta Ekotuning Group Oy:n laitteistolla ja toimitiloissa. Tavoitteena on myös esitellä suoritettujen tehonnostomittauksien keskeisimmät tulokset. Tavoitteena on, että tässä työssä dokumentoitu aineisto analyysineen toimisi työkaluna mahdollisten uusien moottorikokoonpanojen suorituskykytavoitteiden asettamisessa.

2 Teoriatausta

2.1 Polttomoottorin tunnuslukuja

Polttomoottorin ensisijainen tarkoitus on muuttaa kemiallisen polttoaineen sisältämä energia mekaaniseksi työksi. Polttomoottorin suorituskyvyn ja muiden ominaisuuksien kannalta moottorin sisäiset mittasuhteet luovat keskeisen perustan (Heywood 2018, 1). Lisäksi näiden perusominaisuuksien hyödyntämiseen tarkoitettulla tekniikalla, kuten esimerkiksi ahtamisella, voidaan suorituskykyä edelleen kasvattaa.

Moottorin hyötysuhde on sitä parempi, mitä suuremman osuuden polttoaineen sisältämästä energiasta moottori kykenee muuttamaan liike-energiaksi. Moottorin komponenteilta vaaditaan ominaisuuksia, joiden avulla moottorin tuottama teho mahdollisimman pienin häviöin saadaan moottorista ulos. Moottorin komponentit on mitoitettava kestävästi tavoiteltava teho sekä moottorin elinkaaren aikaiset rasitukset.

Heywoodin mukaan (2018, 53) moottorin tärkeimmät ominaisuudet käyttäjän kannalta ovat

- maksimi suorituskyky moottorin koko kierrosalueella
- polttoainekulutus moottorin käyttöalueella ja polttoainekustannus
- moottorimelu ja päästöt moottorin käyttöalueella
- moottorin hinta asennettuna
- moottorin luotettavuus, kestävyys ja huoltotarve sekä näiden vaikutus moottorin käytettävyyteen ja käyttökustannuksiin

Alla on alaotsikoita, joissa käydään läpi tämän työn kannalta tärkeimmät moottorin tunnusluvut ja näillä pohjustetaan työssä käsiteltävää moottoria, jotta lukijalle avautuu kunnolla, mitä tarkoittaa kovatehoinen polttomoottori.

2.1.1 Teho ja vääntömomentti

Polttomoottorin mitoituksen kannalta tärkein tunnusluku on teho. Teho tarkoittaa työn/energian määrää (joule, kilowattitunti eli kWh) aikayksikköä (joule/sekunti = watti) kohden. Yleisesti moottorivalinta kaikissa käyttötarkoituksissa tehdään sen mukaan, mikä on tarvittava tehomäärä.

Teho on sekä markkinointiteknisesti että työtarkoituksessa tärkein tieto moottorin yleisistä ominaisuuksista. Tehon keskeisyys heijastuu esimerkiksi siten, että usealla eri moottorivalmistajalla on teho esitetty jo moottorin nimessä itsessään, tai ajoneuvossa missä moottori esiintyy. Esimerkiksi Scania R 770 -mallimerkinnässä 770 tarkoittaa teholummaa hevosvoimina (1 kW = 1,36 hv) (Scania 2024a).

Teholukema ei ole suoraan mitattavissa oleva lukema, vaan se on vääntömomentin ja moottorin pyörintänopeuden tulo:

$$P = 2\pi nM$$

, jossa P on teho, n on pyörintänopeus ja M on vääntömomentti (Heywood 2018, 60).

Kaava 1. Teho ja vääntömomentti (Heywood 2018, 60).

Toisin sanoen, kun moottorista mitataan tehoa, tarvitaan tieto moottorin vääntömomentista ja pyörintänopeudesta. Tehodynamometreillä mitataan moottorin tuottamaa vääntömomenttia, jolloin kyseessä olevan mittalaitteen automatisoitu järjestelmä laskee saaduista arvoista tehon. Käytännössä anturilla mitataan painoa, joka on kiinnitettyä dynamometrin runkoon. Kun tiedetään, kuinka pitkä vääntövarsi on moottorin kampiakselista, saadaan mitattua moottorin vääntömomentti.

Vaikka tehon yksikkö on watti, on moottorien yhteydessä käytännöllisempää käyttää kilowattia. Usein puhekielellä tutumpi termi on kuitenkin hevosvoima. Moottori- ja ajoneuvovalmistajat käyttävät kuitenkin teknisistä syistä kilowattia.

2.1.2 Tehollinen keskipaine

Ikonen (2022, 52) määrittelee tehollisen keskipaineen seuraavasti:

”Kyseessä on laskennallinen suure, joka kertoo, kuinka suuri keskimäärin on se palotilassa vallitseva paine, joka synnyttää mäntään kohdistuvan voiman, joka painaa mäntää alaspäin”.

Toisin sanoen tehollisen keskipaineen (kilopascal, kPa) aikaansaama voima muuttuu kampiakseliin kohdistuessaan pyöriväksi liikkeeksi, joten kyseinen tunnusluku kuvaa hyvin moottorin toiminnan tehokkuutta. Alla laskentakaava avattuna:

$$P_e = \frac{2\pi JM}{V_h * n}$$

, jossa P_e on tehollinen keskipaine, j moottorin toimintatapakerroinvakio, M vääntömomentti ja V_h moottorin kokonaistilavuus.

Kaava 2. Tehollinen keskipaine (Heywood 2018, 64).

Tehollinen keskipaine voidaan myös laskea tehon avulla alla olevalla kaavalla 3:

$$P_e = \frac{PJ}{V_h * n}$$

, jossa V_h on moottorin kokonaisiskutilavuus.

Kaava 3. Tehollisen keskipaineen laskennan kaava (Heywood 2018, 64).

Tehollinen keskipaine on suurimmillaan moottorin maksimivääntömomentin kohdalla. Monet teollisuuden tarkoitetut moottorivalinnat tehdään tehollisen keskipaineen perusteella, koska se kertoo yhdellä lukemalla moottorin sekä mekaanisesta että termisestä kuormitusasteesta (Ikonen 2022, 56).

Tehollinen keskipaine turboahdetussa nelitahtisessa dieselmoottorissa on Heywoodin mukaan (2018, 65) tyypillisesti 1600 - 2400 kPa, eli ~16 - 24 bar.

Esimerkiksi nykyaikainen Euro 6 -luokan henkilöauton

yhteispaineruiskutusdieselmoottorin (VW 2.0 TDI) tehollinen keskipaine on noin 2550 kPa maksimi vääntömomentilla ja 2440 kPa maksimiteholla (25,5 bar ja 24,4 bar).

2.1.3 Moottorin fyysiset mitat ja niiden vaikutus tehontuottoon

Moottorin koko ilmoitetaan tyypillisesti tilavuutena (cm³, isommissa moottoreissa litroina). Sillä tarkoitetaan tilaa, jossa polttoaineen ja palamisilman seoksen poltto tapahtuu. Iskutilavuus on sylinterireiän pinta-ala kertaa iskun pituus ja tämä edelleen kerrottuna sylinterilukumäärällä i , toisin sanoen:

$$V_h = i \cdot x \cdot s \cdot \pi \cdot \frac{D^2}{4}$$

Kaava 4. Kokonaisiskutilavuuden kaava (Mollenhauer & Tschöke 2010, 9).

Iskutilavuus on tärkein yksittäinen lukema valittaessa moottoria eri käyttötarkoituksiin. Teollisuuteen on esimerkiksi Scanialla 9-, 11-, 13- ja 16-litraisia moottoreita, joista valitaan koon mukaan sopiva haluttuun käyttötarkoitukseen (Scania 2024b). Iskutilavuuden ja tehon riippuvuus toisistaan on luonnollisesti ilmeinen.

Valmistajat tyypillisesti tarjoavat eri kokoluokan moottoreita toisiaan täydentävillä tehoskaaloilla, joista loppuasiakas voi valita omaan käyttötarkoitukseensa sopivimman. Saman teholuokan voi löytää erikokoisista moottoreista. Käyttötarkoitus ohjaa valintaa esimerkiksi moottorin fyysisen koon, polttoaineen kulutuksen, vuotuisen käyttöajan tai muun sellaisen perusteella.

Huvittava yksityiskohta on iskutilavuuden muodon vaikutus moottorin luonteeseen. Sama iskutilavuus lyhytiskuisessa suuren sylinterihalkaisijan moottorissa verrattuna pitkäiskuiseen pienemmän sylinterihalkaisijan

koneeseen johtaa varsin erilaiseen moottorituntumaan. Lyhytiskainen (esimerkiksi Ford 5000) antaa vaikutelman nopeasti reagoivasta tehosta mutta heikosta väännöstä. Pitkäiskainen (esimerkiksi Ferguson 165) reagoi tehonnostoon hitaammin, mutta moottori tuntuu sitkeältä. (Ekotuning Group Oy, henkilökohtainen tiedonanto 20.5.2024.)

2.1.4 Polttoaineen ominaiskulutus

Polttoaineen ominaiskulutus kertoo, kuinka paljon polttoainetta moottori tarvitsee tietyn työmäärän tai tehon tuottamiseen. Ominaiskulutus (sfc) ilmoitetaan yleensä grammoina tai kilogrammoina polttoainetta (\dot{m}_f) yhtä kilowattituntia (P) kohti (g/kWh):

$$sfc = \frac{\dot{m}_f}{P}$$

Kaava 5. Polttoaineen ominaiskulutuksen kaava (Heywood 2018, 66).

Tyypillisesti moottorin ominaiskulutuksena kerrotaan pienin ominaiskulutus, joka saavutetaan suurimman vääntömomentin pyörintänopeudella tai sen alapuolella täydellä tai lähes täydellä kuormalla. Käytännössä ominaiskulutus vaihtelee runsaasti moottorin kuormitusasteen ja kierrosluvun funktiona. (Ikonen 2022, 80, 83.)

Moottorin polttoainetehokkuuden voi kertoa myös prosentuaalisesti hyötysuhteen avulla. Yleisellä tasolla hyötysuhteella tarkoitetaan moottorin, voimalaitoksen tai muun laitoksen kykyä muuttaa syötetyn polttoaineen energiasisältö hyödylliseksi työksi tai tavoitelluksi energiaksi. Hyötysuhde ilmoitetaan prosentteina tavoitellun energian määränä suhteessa polttoaineesta saatavissa olevaan energiasisältöön.

2.2 Päästöt ja päästöregulaatio

Oleellinen osa nykyajan moottoritekniikkaa on päästöjen hallinta. On tärkeätä ymmärtää polttomoottorin päästöjen syntymekanismi ja niiden vähentämisen hallintakeinot. Mitä tarkoittaa laajemmassa kuvassa luontaisessa palamisessa syntyvien palamistuotteiden vähentäminen? Moottorinvalmistajat joutuvat pohtimaan näitä kysymyksiä suunnitellessaan uusia moottoreita.

Ensimmäiset päästömääräykset tulivat 1960-luvulla ensiksi USA:ssa Kalifornian osavaltioon, josta levisivät kansalliseksi koko Yhdysvaltoihin. Pian tämän jälkeen vastaavanlaisia määräyksiä alkoi ilmestyä sekä Eurooppaan että Japaniin (Heywood, 2018, 4). Tässä työssä pitäydytään selkeyden vuoksi Euroopan dieselhenkilöautojen päästömääräyksissä, eli Euro-standardeissa.

Euro 1 -päästönormi astui voimaan heinäkuussa 1992 ja siinä oli rajoituksena HC ja NO_x yhdistettynä parametrina, CO- sekä hiukkaspäästöt. Euro 2 (1.1996) -päästönormi rajoitti samoja päästölajeja, mutta raja-arvoja oli oleellisesti tiukennettu. Euro 3:ssa (1.2000) raja-arvot laskivat edelleen, tällä kertaa NO_x ja HC mitattiin toisistaan erillisinä päästölajeina. (Autotuoajat 2024.)

Euro 4 (1.2005) ja 5a (9.2009) rajoittivat samoja tekijöitä kuin Euro 3, mutta edellistä tiukempana. Euro 5b (9.2011) oli ensimmäinen, jossa hiukkasten lukumäärä oli rajoitettu. Euro 6 (9.2014) tiukensi edelleen olemassa olevia rajoituksia ja on tämän työn kirjoitushetkellä voimassa oleva standardi. (Autotuoajat 2024.)

Alla on lyhyt perehdytys päästöistä, jotka vaikuttavat eniten moottorin suunnitteluun. Hyvän kokonaiskuvan eri toimenpiteiden vaikutuksesta moottorissa syntyvien päästöjen muodostumiseen antaa taulukko 1.

Taulukko 1. Eri toimenpiteiden vaikutus päästöjen muodostumiseen. (Mollenhauer & Tschöke 2010, 450).

Päästölaaji	NO _x	HC/CO	Noki	Ominaiskulutus	Melu
Ruiskutusennakon myöhäistäminen	+	-	-	-	+
Pakokaasun kierrätys (EGR)	+	-	-	-	+
EGR:n jäähditys	+	-	+	+	0
Ahtaminen	-	+	+	+	0
Ahtoilman välijäähditys	+	-	+	+	0
Pilottiruiskutus	0	+	-	0	+
Jälkiruiskutus	+	0	+	-	0
Ruiskutuspaineen nosto	0	+	+	+	0
Puristuspaineen alentaminen	+	-	+	0	-

2.2.1 Hiilidioksidi (CO₂)

Hiilidioksidi on lämpöä sitova kasvihuonekaasu, jota muodostuu palamisessa. Hiilidioksidin lisääntyminen ilmakehässä estää lämmön karkaamista avaruuteen sekä happamoittaa meriä sinne imeytyessään.

Päästöregulaatio pyrkii alentamaan fossiilisten polttoaineiden käytöstä syntyvää hiilidioksidia. Kaasua muodostuu myös luonnonilmiöissä, kuten maastopaloissa ja tulivuorenpurkauksissa. On olennaista huomata, että hiilidioksidia ei tule nähdä ainoastaan ihmisen aiheuttamana saasteena, vaan ymmärtää sen olevan myös kasvien yhteyttämisen, toisin sanoen elämälle, välttämätön kaasu (NASA 2024).

Hiilidioksidin määrä on suoraan verrannollinen polttoainekulutukseen, mikä on osasyynä valmistajien haluun tuottaa mahdollisimman alhaisen kulutuksen moottoreita. Toinen keskeinen syy panostaa hiilidioksidiarvojen alentamiseen ovat EU:n asettamat sakkomaksut asetetun rajan ylittävistä päästömäärästä. Tällä hetkellä henkilöautojen päästöraja-arvo valmistajan kokonaistuotannolle

on 95 g CO₂/km vuoden 2024 loppuun saakka. Tämän rajan ylityksestä valmistaja joutuu maksamaan sakkoa 95 € ylitettyä grammaa kohti jokaisesta rekisteröidystä autosta. (Euroopan komissio 2024.)

2.2.2 Typen oksidit (NO_x)

Typen oksidit syntyvät palotilassa palotapahtumassa. Käsite NO_x pitää sisällään kaikki typen oksidit, mutta päästöjen näkökulmasta NO- ja NO₂ -yhdisteet ovat merkittäviä. NO₂:sta muodostuu palotapahtumassa vähemmän, mutta ilmassa myös NO hapettuu NO₂:ksi, joka on hengitysteitä ja limakalvoja ärsyttävä kaasu. (Mollenhauer & Tschöke 2010, 425.)

Typen oksideja pystytään vähentämään myöhäistämällä polttoaineen ruiskutusta moottoriin, mutta samalla hiukkaspäästöt nousevat. Kun ruiskutuksen aloitusta sen sijaan aikaistetaan, nousevat vastaavasti typen oksidien määrä pakokaasussa. Päästöjen vähentämiseksi tehdyt toimenpiteet johtavat usein kompromisseihin vaikuttaen negatiivisesti moottorin ominaiskulutukseen ja tehontuoton hyötysuhteeseen. (Mollenhauer & Tschöke 2010, 449 - 451.)

Edellä kuvattua ongelmaa ratkaistaan EGR:n (*Exhaust Gas Recirculation*, pakokaasun takaisinkierrätys) ja korkeamman ruiskutuspaineen avulla. Korkeampi ruiskutuspaineline yksinään lisää NO_x:n määrää, mutta ruiskutusennakkoa voidaan vastaavasti vähentää, koska sama polttoainemäärä saadaan tällöin lyhyemmällä ruiskutusajalla. EGR:n ja korkeamman ruiskutuspaineen yhteisvaikutuksella saadaan NO_x:n määrä pakokaasusta tippumaan merkittävästi. (Mollenhauer & Tschöke 2010, 452.)

Turboahhtimen hyödyntäminen NO_x:n torjunnassa on käytännössä välttämätöntä, johtuen edellä kuvattujen moottorin hyötysuhdetta laskevien toimien pakollisuudesta. Esimerkiksi puristuksen laskeminen on NO_x:n ja hiukkaspäästöjen kannalta eduksi, mutta CO- ja HC-yhdisteiden määrä nousee ominaiskulutuksen samanaikaisesti huonontuessa. (Mollenhauer & Tschöke, 2010, 450, 452 - 453.)

2.2.3 Hiukkaspäästöt (PM)

Hiukkaspäästöt (*Particulate Matter, PM*) syntyvät polttoaineen eri ainesosista, jotka palaessaan vapautuvat ja muuttuvat hiukkasiksi. Aikaisemmassa NO_x-kappaleessa sivuttiin myös hiukkaspäästöjen merkitystä päästöjen hallinnassa. Hiukkaspäästöistä noin kolme neljännestä on nokea ja loppu koostuu palamatta jääneestä voitelu- ja polttoaineesta, vedestä ja rikkiyhdisteistä (Mollenhauer & Tschöke. 2010, 446).

Hiukkasten muodostumiseen pystytään vaikuttamaan oleellisesti ahtamalla ja ahtoilman jäähdytyksellä kuten taulukko 1 antaa ymmärtää. Kuitenkin hiukkasia koskevat määräykset ovat pakottaneet moottorivalmistajat käyttämään myös hiukkassuodattimia pakoputkistossa. Pakokaasuvirta ohjataan kulkemaan hiukkassuodattimen läpi, jossa suuri osa hiukkasista jää suodattimeen.

Hiukkassuodatin täyttyy koko ajan moottoria käytettäessä, joten se täytyy välillä tyhjentää eli regeneroida. Tämä tarkoittaa suodattimeen kertyneen hiukkasmassan polttamista. Tällä tavoin pystytään kontrolloimaan polttoaineen kulutusta. Mikäli suodattimessa olisi ”jatkuva regenerointi”, näkyisi tämä käyttäjälle korkeana polttoaineen kulutuksena. (Mollenhauer & Tschöke. 2010, 458 - 459.)

Kun hiukkassuodattimen käyttö jaksotetaan kerrytys- ja regenerointivaiheeseen, sen käytännöllisyys on maksimoitu suhteessa tehokkaaseen hiukkaspäästöjen vähentämiseen. Tämä edellyttää moottorin muilta komponenteilta toimia, jotta moottorikonaisuus saadaan toimimaan hiukkassuodattimen kannalta tarkoituksenmukaisesti (Mollenhauer & Tschöke. 2010, 458). Tällä tarkoitetaan ahdin- ja polttoainekomponenttien ohjausta siten, että pakokaasusta saadaan regeneroinnin ajaksi mahdollisimman kuumaa.

2.2.4 Häkä eli hiilimonoksidi (CO)- ja hiilivety (HC) -yhdisteet

Hiilimonoksidi ja hiilivety-yhdisteet kulkevat usein käsi kädessä, sen vuoksi ne on tässäkin työssä saman kappaleen alla avattu. Näitä yhdisteitä syntyy

epätäydellisessä ja epäpuhtaassa palotapahtumassa. Häkä ei dieselmootoreiden tapauksessa ole koskaan ollut erityisen suuri ongelma, mutta sen hallitsemiseksi on tietyissä tilanteissa rajoitettava ilmamäärää sylinterissä. Tämä sama pätee HC-yhdisteisiin. (Mollenhauer & Tschöke. 2010, 449.)

Usein tavat, joilla pyritään hallitsemaan hiukkasten ja NO_x:in muodostumista, nostavat ei toivotusti HC- ja CO-yhdisteitä pakokaasussa. Tällöin avainasemassa on muun muassa turboahtimen käyttö. Tavoitteena on pitää moottori toiminta-alueesta riippumatta sellaisessa tilassa, ettei näitä haitallisia yhdisteitä pääsisi syntymään.

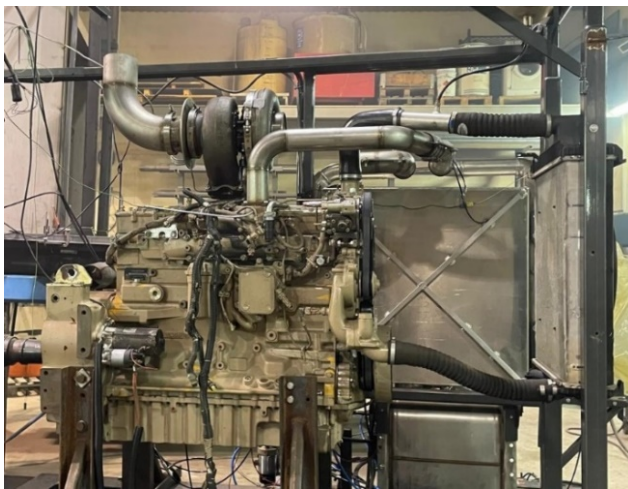
2.3 Ekotuning Group Oy:n John Deere -moottorin tekniset tiedot

Tässä työssä käsiteltävä moottori on rakennettu tuottamaan alkuperäissovellukseen verrattuna huomattavasti suuremman suorituskyvyn ja teholumen. Tehontuotannon kannalta oleelliset komponentit on mitoitettu tavoitellun tehon saavuttamiseksi.

Työn moottori on John Deere 6068HRT90, joka on IT4-työkonepäästönormin mukainen vuosimallin 2014 moottori. Moottori on 6.8-litrainen kuusisyylinterinen rivimoottori, joka hyödyntää neliventtiilitekniikkaa. Lähes kaikki moottorin sisällä olevat komponentit ovat valmistajan alkuperäisosa. Muutamia moottorin komponentteja, muun muassa männät, ovat uudemmasta saman valmistajan moottorista peräisin.

Taulukko 2. Ahiomootoria vastaavan moottorin tekniset tiedot (TractorData 2023).

Moottorin koko	6,79 l
Sylinterin mitat D/S	106,5 mm x 127 mm
Nimellis-/maksimiteho	141,7 kW / 155,9 kW
Puristussuhde	17:1
Työkierrosalue	1300 rpm - 2100 rpm
Päästöluokka	IT4



Kuva 1. John Deere 6068 -moottori moottoridynamometrissa.

Kaavan 4 mukaan:

$$V_h = i \times s * \pi * \frac{D^2}{4} = 6 * 127\text{mm} * \pi * \frac{(106,5)^2\text{mm}^2}{4} \approx 6,79 \text{ l}$$



Kuva 2. Moottorin männät ja kiertokanget pöydällä ennen kasausta.

2.3.1 Moottorilohko

Moottorin tuottama teho saadaan aikaan palotapahtumasta, joka tapahtuu sylinteriputkessa. Sylinteriputki tai -putket sijaitsevat moottorilohkossa, joka on "moottorin runko". Kaikki raakamoottorin komponentit ovat tavalla tai toisella kiinni lohkossa. Lohkossa on olennaista olla myös tilat öljykanaville, vesitilat ja riittävä vahvuus kestäämään tavoiteltu teho.

Moottorilohko on osaltaan hyvin merkittävä tekijä moottorin iskuilavuudelle ja yleisille mittasuhteille. Kyse on yksinkertaisuudessaan siitä, miten suuret mittasuhteet saadaan mahtumaan lohkon sisälle. Usein käyttökohteesta riippumatta lohkon kampikammio on sylinterilohkon kanssa yhtenäinen (Heywood, 2018, 11).

Tässä työssä käsiteltävä John Deere 6068 -moottorin lohko on IT4-standardin aikainen ja sen lohkon rakenne on aikaisempaan moottoriperheeseen verrattuna huomattavasti vahvempi. Moottori on joissakin alkuperäissovelluksissa osa työkoneen runkoa. Moottorilohkon vesitilat ovat muotoiltu veden kierron kannalta hyvin, joten veden lämpötila pysyy erittäin tasaisena. Moottorissa on monen ison dieselmootorin tavoin helposti vaihdettavat sylinteriputket. Heywood (2018, 11) toteaa raskaiden moottorien ja

kuorma-autojen moottorien hyödyntävän usein irrotettavia putkia juuri kulumisteknisistä syistä, jolloin nämä on helppo vaihtaa.

2.3.2 Ruiskutuslaitteet

Tässä työssä käsiteltävä moottori on yhteispaineruiskutuksella varustettu (*Common Rail*). Yhteispaineruiskutus tarkoittaa yhteistä korkeapaineen muodostamista kaikkia sylintereitä varten ja ruiskutus sylintereihin tapahtuu suuttimien ohjauksella (Mollenhauer & Tschöke. 2010, 140 - 141). Moottorin korkeapaineen tuottokyky on suunniteltu toimimaan stabiilisti 2000 barin paineella suuresta ruiskutusmäärästä riippumatta. Moottorin suuttimet ovat rungoltaan alkuperäiset (Denso), mutta ne on muokattu sopiviksi teetetyille suutinkärjille Ekotuning Group Oy:n toimesta.

Jotta 2000 barin ruiskutusaine saadaan pysymään stabiilina ruiskutusmäärän ollessa suuri, tulee pumpun tuotto olla tarpeeksi suuri. Tässä moottorissa on kolme alkuperäistä korkeapainepumppua, joita pystytään ohjaamaan tarkasti ja pitämään ruiskutusaine tasaisena. Ruiskutusaineen nosto on tärkeää savuttomuuden kannalta, jotta saadaan ruiskutus lyhyemmälle ajankohdalle ja näkyvä savu minimiin.

2.3.3 Nokka-akseli

Nokka-akseli on päästöjätorjuntamoottoreissa yleensä muotoiltu niin, ettei se suoraan sellaisenaan tue tehontuottoa. Ekotuning Group Oy:n 6068-moottorissa on alkuperäisestä IT4-nokka-akselista muokattu versio, joka tukee paremmin tehonnoston vaatimia tarpeita.

2.3.4 Ahtaminen

Pakokaasuahdin on merkittävin yksittäinen suuren tehontuoton mahdollistava komponentti tässä Ekotuning Group Oy:n 6068-moottorissa. Ahtimena on

käytetty Holset He851 -turboahdinta 112 mm turbiinisiiven jättöpäällä. Turboahdin on moottorin kokoon nähden verrattain suuri, joten toiminta-alueellaan se tuottaa suuren virtauksen. Nokka-akselin ja turboahtimen toiminnan tulee tukea toistensa toimintaa mahdollistaen mahdollisimman suuri virtaus moottorin läpi.

3 Moottorin suorituskyvyn nostaminen

Moottorin tarkoitus on olla ihmisen työkalu, joka tuottaa halutun työn tekemiseen tarvittavan suorituskyvyn. Moottori on historiansa aikana paitsi korvannut aiempaa tapaa työskennellä myös nostanut sekä suorituskyvyn että työn tuottavuuden kokonaan uudelle tasolle. Voidaan ajatella moottorien suorituskyvyn vaatimusten muodostuneen yhteiskunnallisen tarpeen ohjaamana sitä mukaan, kun toimintaympäristön muutokset ovat asettaneet uusia haasteita.

Merkittäviä vauhdittajia moottorien suorituskyky- ja luotettavuusvaatimuksille ovat olleet kriisitilanteet, joista suurimpana ovat olleet ensimmäinen ja toinen maailmansota - erityisesti näistä jälkimmäinen. Moottorin kehittämisen potentiaali on johtanut huikeaan teknologian kehitykseen. Kun olot ovat vakiintuneet ja yhteiskunnalliset tarpeet on tyydytetty suorituskyvyn suhteen, on ruvettu hakemaan suorituskykyä moottoreihin myös vapaa-aikaan ja urheilutarkoitukseen. Ei ole väärin sanoa autoilun historian alkaneen autokilpailuista, josta se on sitten muuttunut jokapäiväiseksi tavaksi kulkea ja liikkua.

Tämä työ kertoo moottorin hyödyntämisestä urheilukäyttöön, mutta käsite ”tehonnosto” pitää sisällään paljon eri muuttujia ja historiaa, jotka on hyvä käsittää kokonaisuutena suhteessa tämän työn moottoriin. Syy poiketa moottorin tehdasasetuksista voi yksinkertaisesti olla tarve saada lisää tehoa, mutta myös polttoainetalouden parantaminen tai jotkut muut moottorilla tehtävän työn asettamat vaatimukset.

Tässä luvussa käsitellään tehonnoston filosofiaa historian valossa. Aineistona on käytetty muun muassa Koneviestin juttusarjaa polttomoottorin historiasta.

moottoreihin. Tyypillisesti merkittävä osa komponenteista vaatii vahvistusta toimiessaan tehdasmitoitusta korkeammalla tehotasolla.

Tehonnoston kannalta polttoainejärjestelmä ja ahtimen ominaisuudet joutuvat uudelle toiminta-alueelle tehdasmoottoriin verrattuna. Tässä työssä kuvatus John Deere 6068 -moottorin ahdin- ja polttoainejärjestelmien mitoitus poikkeaa originaalista merkittävästi juuri tehontuotannollisista syistä.

Polttoainejärjestelmässä on pystytty hyödyntämään alkuperäislaatuista osia muokattuina käyttötarkoitukseen sopivaksi. Esimerkiksi alkuperäisiä Common Rail -korkeapainepumppuja on yhden sijasta kolme ja suuttimien rungot ovat täysin alkuperäiset.

Kun ahto- ja polttoainejärjestelmä unohdetaan, huomataan raakamoottorin komponenttien olevan lähes kaikkien alkuperäisiä. Öljyjärjestelmä, kampiakseli ja kiertokanget ovat kaikki alkuperäisiä ja niiden kestävyys on hyväksi havaittu. Männät ovat myös alkuperäislaatuista, joskin uudemmasta moottorista. Tämä johtuu osittain moottorin alkuperäisestä luonteesta: suhteellisen uusi, ahdettu ja tehokas työdieselmoottori. Samasta syystä myös alkuperäistä moottorinohjausta (ECU) voidaan käyttää, mihin Ekotuning Group Oy on myös pyrkinyt.

Alkuperäisen ECU:n käyttöön on useita syitä. Ensinnäkin alkuperäisen ECU:n käyttö tukee Ekotuning Group Oy:n omaa tuotekehitystyötä. Dynamometrin tarjoama vakio-olosuhde mahdollistaa nähdä käytännössä ohjelmistomuutosten vaikutukset moottoriin. Toiseksi alkuperäinen ECU mahdollistaa päästöjen hallitsemiseksi syntyneiden kymmenien tuhansien säätöparametrin avulla tarkan moottorin kontrollin, mikä on merkittävä etu moottorin tehonnoston hallinnassa (Koneviesti 2022, 109).

Kolmas merkittävä syy vakio-ohjainlaitteen käyttöön on puutteelliset kilpailevat tuotteet. Kun osaaminen vakio-ohjainlaitteen muokkaamiseen löytyy, tarkoittaa uuden aftermarket-ohjainlaitteen käyttöönotto usein työläistä ja kompromisseja edellyttäviä päätöksiä. Aftermarket ohjainlaitteita on monia, mutta suurin kehitys on todennäköisesti vielä edessä. Ekotuning Group Oy:n kokemuksen mukaan

millään muulla ohjainlaitteella ei toistaiseksi pystytä samankaltaiseen moottorinhallintaan verrattaessa tehdasoriginaaliin.

Moottoriurheilussa on paljon sovelluksia, joissa käytetään vakiokomponentteja. Näitä todennäköisesti tullaan hyödyntämään yhä vain kasvavassa määrin. Moottorien alkuperäisolemus näyttäisi yhä useammin soveltuvan moottoriurheiluun, mistä esimerkkinä mainittakoon drifting. Driftingissä tehot eivät ole rajoitettuja ja tehontarve lajissa on kova, jolloin ahtaminen on muodostunut defacto-standardiksi.

3.1.2 Poiskarsittavat komponentit

Kuten aiemmin on tullut ilmi, alkuperäisiä komponentteja voidaan perustellusti hyödyntää jatkojalostetussa moottorissa. Vastaavasti on koko joukko komponentteja, joille ei ole käyttöä loppurakenteessa. Tällaisia osia voivat olla jotkin apulaitteet ja esimerkiksi pakoputkiston osat.

Usein päästöjen hallintaan liittyvät komponentit, kuten dieselmootoreissa hiukkasloukut, eivät tehoa alentavina sovellu tehontuottosovelluksen yhteyteen. Pienemmissä bensiinimootoreissa apulaitelijnalta karsitaan myös ylimääräiset komponentit pois johtuen niiden suuresta tehontarpeesta, mikä on pois lopullisesta tehontuotosta.

Poiskarsittaviin komponentteihin liittyvät luonnollisesti myös vahvemmillä osilla korvattavat komponentit, kuten tyypillisesti esimerkiksi kiertokanget. Mikäli alun perin vapaasti hengittävä moottori ahdetaan jälkeensä, ovat sen kiertokanget suunniteltu lähtökohtaisesti huomattavasti pienempään sylinteripaineeseen. Tämä kysymys on lähes merkityksetön valmiiksi ahdetuissa moottoreissa.

Aiemmassa kappaleessa, jossa puhuttiin alkuperäiskomponenttien hyödyntämisestä, puhuttiin komponenttien hyödyntämisestä driftingissä. Kuitenkin monet moottoriaihiot, joita lajissa käytetään, ovat ajalta ennen ahtamisen yleistymistä. Käytännössä tämä on johtanut vakiokomponenttien korvaamiseen vahvemmillä ja kestävämmillä osilla. Myös ohjainlaitteina on

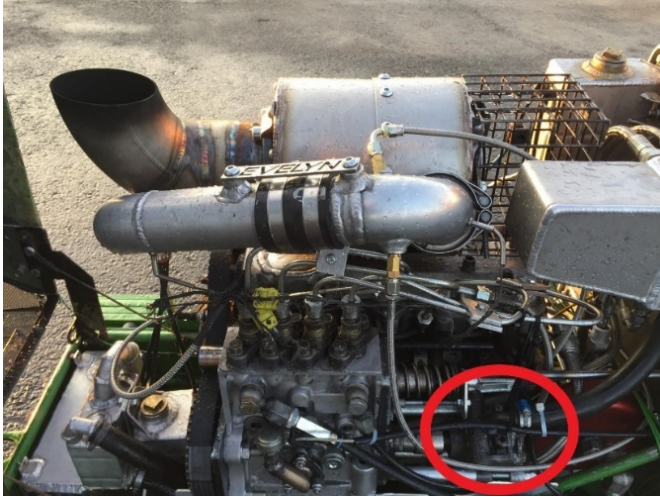
helpompaa käyttää aftermarket-ohjainlaitteita, koska alkuperäisen ohjainlaitteen ominaisuudet eivät vanhasta teknologiasta johtuen riitä.

Suoraruiskutusbensiniinimootoreissa, jotka rakennetaan korkean tehon tuottamiseen sellaisessa käyttötarkoituksessa, jossa tehoa tarvitaan jatkuvasti paljon, korvataan suoraruiskutuslaitteisto usein porttiruiskutusteknologialla. Tällöin polttoaine ruiskutetaan palotilan sijasta imusarjaan. Tähän on monta syytä, mutta esimerkkinä mainittakoon alkuperäisen ohjainlaitteen soveltumattomuus mittavaan muokkaukseen sekä polttoainekomponenttien vaikea muokattavuus. (Papadakis 2019.)

Todennäköisesti ohjainlaitteiden ja suoraruiskutuskomponenttien kehitys voisivat mahdollistaa suoraruiskutuksen paremman hyödyntämisen, jolloin laitteistoa olisi mahdollista käyttää hyväksi myös esimerkiksi nakutuksen hallinnassa. Tämänhetkisten tietojen valossa suoraruiskutusteisten bensiniinimootorien komponenttien hyödyntäminen on rajallista.

3.1.3 Komponenttien uudet käyttötarkoitukset

Toisinaan jotkut vakiokomponentit soveltuvat käytettäväksi uuteen käyttötarkoitukseen. Mielenkiintoinen esimerkki Tractor Pullingissa oli Compact Diesel 600 kg -luokassa, kun eräässä 1,9TDi-moottorissa käytettiin Volkswagenin ohjaustehostimen pumppua vesiruiskuna moottorin jäähdytyksessä. Ohjaustehostimen pumppu näkyy kuvassa 3 ympyröitynä.



Kuva 3. Kuvassa ympyröitynä ohjaustehostimen pumppu.

Esimerkin tapauksessa ahtopaineen noustua tavoiteltuun, pumpun tuottama vesipaine ohjattiin kolmitiehanan avulla imusarjaan sekä turbon edessä oleviin suuttimiin.

Vastaavia sovelluksia nähdään paljon anturitekniikassa moottoriurheilussa. Erilaisia alkuperäisiä valmistajan antureita voidaan hyödyntää johonkin toiseen käyttökohteeseen, jolloin esimerkiksi kilpamoottorin johtosarjan rakentaminen helpottuu. Samalla myös valmiskomponenttien hyödyntämisellä päästään ihanteelliseen varaosatilanteeseen, koska laadukkaita alkuperäisosa on helposti saatavilla paikallisista varaosakaupoista edulliseen hintaan. Kaikki tällainen ”valmis” on kustannuksia alentava ja yleisesti rakentelua helpottava seikka. Myös muiden brändien vakio-osat saattavat tulla kysymykseen.

3.2 Moottoritekniikan kehitys

Moottoritekniikka ja sen kehitys on erittäin mielenkiintoinen aihe, sillä pääperiaatteet hurjaan kehitykseen 2000-luvulta eteenpäin ovat kehittyneet jo paljon aiemmin historiassa. Hyvin keskeinen aikakausi moottoritekniikan kehityksessä on ollut toisen maailmansodan aika. Useita sodan aikana toteutettuja moottoritekniisiä keksintöjä ja oivalluksia on otettu käyttöön moderneissa moottorisovelluksissa.

Moottoritekniikkaa ja sen kehitystä on ohjannut tarve kehittyä. Kehitystä ohjaavista tekijöistä tärkein on epäilemättä ollut tarve lisätä suorituskykyä. 1990-luvulta alkaen ovat päästönormit pakottaneet etsimään päästöjä alentavia ratkaisuja ilman että suorituskyky- tai luotettavuustavoitteissa olisi voinut joutua. Ratkaisuihin on usein voinut hyödyntää aiemmin kokeiltuja tai käytössä olleita ratkaisuja.

3.2.1 Nostaja polttomoottorin historiasta

Polttomoottorin historia alkaa vuodesta 1791 ensimmäisestä kaasuturbiinin periaatekuvauksesta. Tästä eteenpäin pitkin 1800-lukua lukuisat eri insinöörit ja asiasta kiinnostuneet loivat erilaisia ja näköisiä moottorityyppejä, jotka voidaan katsoa olevan polttomoottorin esivaiheita. Nicolaus Otto kehitti vuonna 1876 senhetkisten viritelmien pohjalta nelitahtimoottorin, joka nimettiin hänen mukaansa ottomoottoriksi. (Koneviesti 2022, 87, Heywood 2018, 1-2)

Dieselmoottorin keksijä oli Rudolf Diesel, joka patentoi laitteensa vuonna 1893 ja rakensi 26,2 %:n hyötysuhteeseen kyenneen prototyypin vuonna 1897. Diesel oli varma keksintönsä vallankumouksellisuudesta, minkä aika hyvin voi sanoa toteutuneen. Diesel ei itse ollut tätä todistamassa, koska menehtyi epäselvissä olosuhteissa 1913 ollessaan matkalla Antwerpenistä Harwiciin. (Mollenhauer & Tschöke 2010, 4, 6.)

Polttomoottorille alkoi syntyä käytännön sovelluksia ja tarvetta 1900-luvulle tultaessa autojen ja lentokoneiden nopeasti kehittyessä. Ensimmäisen maailmansodan syttyessä 1914 lentokoneiden hyöty sotakäytössä kävi ilmeiseksi. Vuonna 1916 oli jo varsin suorituskykyisiä ja moottoritekniikaltaan edistyneitä lentokoneita jatkuvassa käytössä.

Ensimmäisen maailmansodan päätyttyä moottorit paranivat autoilun ja lentämisen kehityksen vetämänä. Oma vaikutuksensa moottoreiden suorituskyvyn kehitykselle oli seurausta lento- ja autokilpailuista, jolloin moottoritekniikassa tapahtui merkittävää kehitystä.

Polttomoottori nykyaikaisine ratkaisuineen on käytännössä syntynyt toisen maailmansodan aikana: suoraruiskutteinen, ahdettu, neliventtiilitekniikkaa hyödyntävä, rullakeinuinen ja suuritehoinen bensiinimoottori. Suorituskyvyn kasvattaminen oli luontainen vaatimus, mutta kehityksen rinnalla vaadittiin myös korkeaa luotettavuutta. Hävittäjien huippunopeuksien ja lentokorkeuksien kasvaessa oli pakko kehittää moottoritekniikkaa. Ryhdyttiin hyödyntämään monivaiheista ahtoteknologiaa, tekniikoita ahtoilman jäähdyttämiseksi, neliventtiilitekniikkaa ja polttoainelaatujen parantamista. (Koneviesti 2022, 89, 97.)

Yhdysvallat oli toisen maailmansodan edetessä ahtamisessa muita osapuolia edellä, ensimmäiset laajasti käytetyt turboahdinsovellukset olivat Yhdysvalloilla. Turboahdin toimi yhdessä mekaanisen ahtimen kanssa, jolloin saatiin aikaan kaksivaiheinen ahdinjärjestelmä. Hyvä esimerkki turboahtimen hyödyntämisestä on P-47 Thunderbolt, suurikokoinen yksipaikkainen ja -moottorinen hävittäjä. Koko lentokone oli lähestulkoon rakennettu ahdinjärjestelmän ympärille, jolloin saavutettiin hyvä suorituskyky korkealla ohuessa ilmanalassa. (Koneviesti 2022, 97, 100.)

Polttoainejärjestelmien osalta Saksa oli selvästi kehittynein. Saksan arsenaalista löytyi suoraruiskutteisia bensiinipolttomoottoreita jo ennen sodan alkua. Tämän teknologian kehityksen syynä voidaan pitää Saksan huonoa polttoaineenlaatua. Nakutuksen ehkäisemiseksi oli pakko kehittää sellainen tekniikka, jolla pystyttiin hallitsemaan ennenaikainen polttoaineseoksen syttyminen. (Koneviesti 2022, 87-88.)

Sodan edetessä kaikilla osapuolilla moottoritekniikka kehittyi suurin harppauksin ja tekniikkaa kopioitiin sitä mukaa, kun saatiin vihollisen kalustoa tutkittavaksi. Saksa pitäytyi loppuun saakka pienistä kokeiluista huolimatta mekaanisissa ahtimissa, todennäköisesti materiaaliteknisistä syistä. Toisaalta mekaaniset ahtimet olivat yksinkertaisempia ja helpompia saada toimimaan moottorin kanssa oikein. Kehittyneimmät moottorit Saksalla olivat kuitenkin monivaiheisilla ahtimilla, niiden suorituskyky oli moottoreiden kokoon nähden hyvä. Ahtamisen

ansioista päästiin reilusti yli kymmeneen kilometriin ja tästä yhä korkeammalle ilokaasujärjestelmää hyödyntämällä. (Koneviesti 2022, 97)

Sodan loputtua sotilasilmailussa siirryttiin nopeasti suihkumoottorin käyttöön, jonka potentiaali oli tullut esiin sodan aikana Messerschmitt Me 262 -suihkuhävittäjän myötä. Pitkän matkan matkustajalentokoneissa hyödynnettiin toisen maailmansodan ahdintekniikkaa mäntäpolttomoottoreissa, kunnes suihkumoottorit korvasivat 1950-luvulta alkaen vähitellen mäntämoottorit ennen kaikkea suurempien lentonopeuksien myötä. (Koneviesti 2022, 97, 99)

Polttomoottorin kehitys jatkui tämän jälkeen autoteollisuuden kehityksen tahdittamana, mikä on moottorin kehitykselle antanut hämmentävän vähän uusia innovaatioita ennen 1990-lukua. Moottorien laatu ja luotettavuus ovat toki koko ajan kehittyneet. Toisen maailmansodan aikana syntyneitä moottoritekniikoita ruvettiin käyttämään laajemmin uudestaan 1990-luvulta tultaessa. Tällöin suurimpana syynä kehitykselle oli päästömääräysten tiukentuminen. Bensiinin suoraruiskutteisuus on yleistynyt 2000-luvun puolella, muun muassa BMW, Mercedes ja Volkswagen alkoivat hyödyntämään kyseistä teknologiaa bensiinimoottoreissa. (Koneviesti 2022, 91)

Dieselmoottoreissa moottoritekniikka eteni rinta rinnan bensiinimoottoreiden kehityksen kanssa. Dieselissä ruvettiin hyödyntämään turboahtamista paljon aikaisemmin ajoneuvo- ja työkonekäytössä. 2000-luvulle tultaessa yhteispaineruiskutus eli *Common Rail* oli jo laajasti tunnettu ruiskutustapa, joka päästömääräysten vaikutuksesta yleistyi räjähdysmäisesti. (Koneviesti 2022, 95)

3.2.2 Suorituskyvyn tarve

Suorituskyvyn tarpeeseen on vaikuttanut historian saatossa moni asia, suurimpana yksittäisenä ja merkityksellisimpänä aiemmassakin kappaleessa mainittu toinen maailmansota ja lentokoneet. Moottoreilta vaadittiin hyvää suorituskykyä ja kestävyyttä. Lentokonemoottoreiden teholliset keskipaineet

olivat toisen maailmansodan loppuaikana 15-20 bar:n tienoilla, mitä tuon ajan voitelu- ja polttoainetekniikan näkökulmasta on pidettävä merkittävän suurena.

Vastaaviin teholumppuihin työkäyttömooottoreissa päästiin yleisesti vasta 1990-luvun loppupuolella ja taso ylitettiin 2000-luvun puolella päästömääräysten myötä. Aikaisemmin sodan aiheuttama pakko polttomooottorin kehitykselle muuttui päästömääräysten asettamaksi pakoksi.

Turbohtaminen on monesta eri syystä merkityksellinen työkoneissa.

Ahtaminen nostaa tehoa, hyödyntää muutoin hukkaan menevää pakokaasua ja auttaa samanaikaisesti vähentämään päästöjä. Nyttemmin päästömääräykset ovat pakottaneet valmistajat etenemään siihen suuntaan, ettei turbohtamisella haeta ensisijaisesti tehoa, vaan pyritään saattamaan moottori sellaiseen tilaan, että se saadaan tuottamaan mahdollisimman vähän päästöjä tuottaessaan hyvän tehon.

3.3 Ohjainlaitteet ja ohjelmat

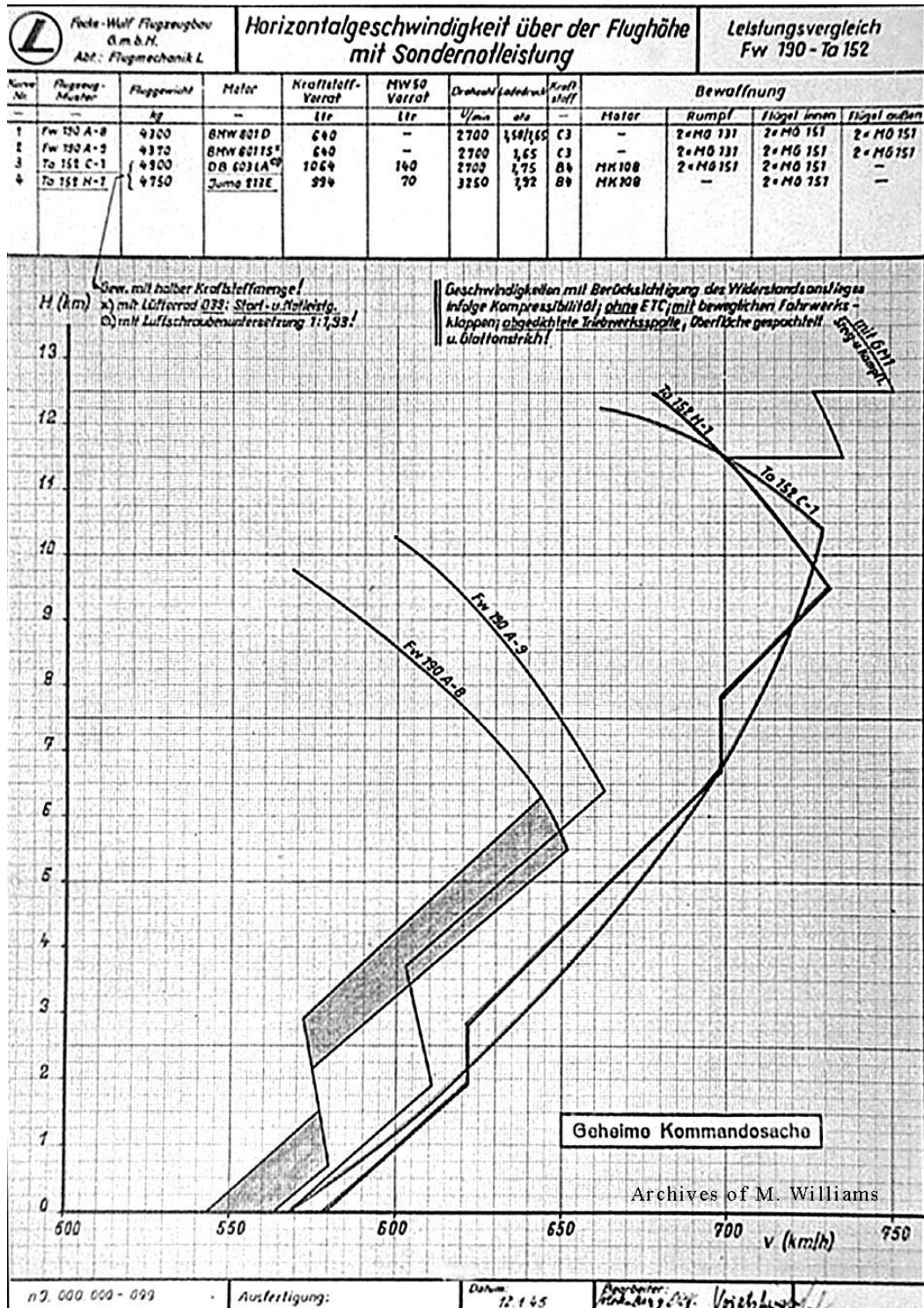
3.3.1 Moottorin toiminnan varmistaminen toisen maailmansodan lentokoneissa

Kun moottoria käytetään töiden tekemiseen, on sen oltava mahdollisimman luotettava tilanteesta riippumatta: oli tämä ”työ” sitten moottoriurheilua tai pellolla traktorilla työskentelyä. Valmistajalla on suuri vastuu siinä, että moottorin käyttö ”opastetaan” ja ohjeistetaan oikein asiakkaalle, jotta moottoria ei rikota käyttäjävirheen vuoksi.

Automaatiolla tarkoitetaan ohjelmoitua itsenäisesti toimivaa laitetta tai järjestelmää (Valmistajat.fi 2024). Automaatiolla kyetään vahvasti vaikuttamaan toiminnan varmistamiseen siten, että käyttäjäperäiset muuttujat ts. inhimillisten virheiden vaikutus luotettavuuteen saadaan minimoitua. Korostetusti tehon ja luotettavuuden yhteensovittamisen esimerkkinä olivat jälleen kerran lentokoneet. Paljon tehoa tuottava moottori piti saada kestäväksi hyvin, koska ilmassa koituneet moottorinmenetykset olivat suurella todennäköisyydellä fataaleja.

Focke-Wulf Fw 190 A -lentokone oli merkityksellinen lentokone monesta erisyystä. Se oli rintamalle vuonna 1941 ilmestyessään maailman paras hävittäjälentokone ja sitä pelättiin sodan loppuun saakka. Siinä oli BMW:n valmistama 801-moottori. Moottori oli kaksirivinen, 14-sylinterinen ja suoraruiskutteinen tähtimoottori. "801" oli teknisesti edistyksellinen, koska sitä hallitsi "mekaaninen ECU", eli kuormantunteva moottorinohjausjärjestelmä. Kyseinen hallintajärjestelmä yksinkertaisti pilotin työtä merkittävästi, sillä se sääti automaattisesti potkurin lapakulman, ahtimen vaihteen, ahtopaineen, sytytysennakon ja seossuhteen. Pilotti määräsi kaasuvivun asennolla vain tehotavoitteen moottorille. (Koneviesti 2022, 106-107)

BMW 801 -moottori oli laadukas, mutta hyvin nopeasti alkoi ilmetä ongelmia moottorin suorituskyvyssä: moottori ei tarjonnut tarpeeksi tehoa korkealla ohuessa ilmanalassa, kuten kuvion A-8 ja A-9 käyrät osoittavat. Ongelma ratkaistiin Fw 190 D -mallissa edeltäjänsä kehittyneemmän ahtamisen sekä vesimetanoliruiskutuksen avulla. Moottoriksi vaihtui Junkersin valmistama 35-litrainen V12, jonka hallintajärjestelmä oli yhtä edistynyt kuin edeltäjässään. Tämä moottori kehittyi edelleen Fw 190 -sarjan seuraajassa Ta-152 H. Kuten aiemmin esitetyssä kuvio 1:ssä näkyy (käyrä H-1), Ta-152 H:ssa oli kaksivaiheinen kolmivaihteinen ahdin, jonka avulla päästiin entistä korkeammalle hyvä tehontuotto säilyttäen.



Kuvio 1. Neljän eri lentokonemallin maksiminopeus eri lentokorkeuksilla (Focke-Wulf Flugzeugbau GmbH 1945).

Huomionarvoinen on erityisesti Ta-152 C-1, jonka käyrä on jatkuva ahtimen välityksen loppumiseen saakka. Tämä johtuu siinä käytetyn Daimler Benz DB-

603 LA -moottorin edistyksellisestä ahtopaineen ohjausteknologiasta, jonka ahtimen säätö oli portaaton. Ahtimen kierrosluku säätyi automaattisesti ulkoisen ilmanpaineen mukaan. Ahtimen tuottama ylipaine pysyi samana ulkoisesta ilmanpaineesta riippumatta.

3.3.2 Päästöjen hallinta

Päästönormien kiristyminen on monimutkaistanut moottorin toiminnan hallintaa. Suorituskyky- ja luotettavuusvaatimukset eivät ole minnekään kadonneet, mutta päästö määräysten tiukentuminen on entisestään lisännyt hallittavia muuttujia. Dieselmoottoria on kyettävä kontrolloimaan todella tarkasti esimerkiksi jakamalla polttoaineen ruiskutus useaan eri osaan, jotta päästöjen muodostuminen ja näkyvä savu kyetään minimoimaan.

Teoriaosuudessa käytiin läpi polttomoottorin yleisimpiä päästöjä. Päästöjen tehokas minimointi johtaa usein toisilleen ristikkäisesti vaikuttaviin tekniikoihin esimerkiksi NO_x- ja hiukkaspäästöjen hallinnassa. Jotta erilaisten päästöjen torjuminen ja minimointi on mahdollista yhdessä polttoainetaloudellisuuden kanssa, tulee moottorinohjauksen kyetä ohjaamaan monimutkaista, vaikkakin loogisesti toimivaa kokonaisuutta reaaliaikaisesti nopeasti muuttuvien kuormitustilanteiden mukaan.

3.4 Virittäminen

Tehonnosto eli virittäminen liitetään usein mopoiluun, tai harrastepohjaisen auton suorituskyvyn muuttamiseen pois alkuperäisestä. Tässä työssä käsiteltävälle moottorille on tehty tehonnosto tehdasvalmistajan mentaliteetilla, toisin sanoen on pyritty ottamaan niitä vastuita valmistuneesta moottorista, mitä moottorinvalmistajatkin joutuvat omista moottoreistaan ottamaan.

Tässä työssä käsiteltävä moottori on pyritty rakentamaan moottorin alkuperäisten vahvuuksien varaan ja säilyttämään sen helppokäyttöisyys. Tehontuotossa koneen on kestävä tavoiteltu tehonnoston määrä. Tavoitteena

on myös ollut säilyttää huoltotöiden ergonomisuus moottorivalmistajan suunnitteleamalla alkuperäisellä tasolla. Jotta tällaisiin tavoitteisiin päästään, on rakennusvaiheessa pidettävä mielessä lopullisen tuotteen käyttötavat ja siihen mahdollisesti matkan varrella tulevat modifikaatiot.

Ekotuning Group Oy on suunnannut toimintaansa ja osaamistaan siten, että diesel-pullingin tulevaisuus Euroopassa olisi savutonta. Dieselille on polttoaineen ominaisuuksista johtuen ominaista tuottaa näkyvää savua ja tämän savun minimointi on Ekotuningin agendalla myös tämän moottorin rakentamisessa. Tämän työn yhteydessä testatun moottorin tarkoitus ei varsinaisesti ole pyrkiä olemaan kaikista savuttomin ja sivistynein moottori. Tällä moottorilla pyritään etsimään niitä raja-arvoja, joissa näkyvää savua ei muodostu, mutta ajamaan samanaikaisesti mahdollisimman suuri teholumina.

Tästä moottorista otetut opit ja kehitysasiat ohjataan valmiina tuloksina Tractor-Pulling Farm-Sport 6000 kg -luokassa kilpailevalle Ekotuning Group Oy:n traktorille. Tämä kyseinen traktori ei ole tehoiltaan sama, kuin työssä pääosin käsiteltävä moottori johtuen kyseisen kilpailuluokan säännöistä, mutta kilpailevan koneen rakentamiseen käytetty oppi on pitkälti tämän dynomoottorin kautta opittua.

4 6068-moottorin tehonmittaukset

4.1 Tehonmittauksen valmistelu

Aiempaan teoriaosuuteen viitaten tehon mittauksessa olennaisimmat suureet ovat moottorin kierrosluku ja vääntömomentti. Vääntömomentin mittaamiseen käytetään dynamometria. Ekotuning Group Oy omistaa Schenckin valmistaman vesijarrudynamometrin, johon on yhdistetty moderni tiedonkeruu (Race Technology) ja tehonmittausohjelmisto (Dynomite).

Ennen mittausten aloittamista varmistetaan moottorin kunto tarkistamalla öljyt, jäähdytinnesteet ja ulkoinen moottorin sekä dynamometrin kunto. Samoin läpikäydään ja varmistetaan kaikki turvallisuuteen liittyvät tekijät, kuten käsisammuttimet ja kuulonsuojaus. Dynamometrin jarrulle menevä mekaaninen voimalinja käydään läpi varmistaen kaikkien pulttien kiinnitys ja ettei mitään ulkoisia häiriötekijöitä ole näkyvissä. Kun tiedonkeruu kytketään päälle, tarkastetaan kaikkien antureiden arvot varmistaen, että näyttämä vastaa lähtötilannetta ja -olosuhteita.

Kun edellä lyhyesti kuvatut yleis- ja turvallisuus- ja anturien kuntotarkastukset on tehty, moottorin voi käynnistää. Heti aluksi on äärimmäisen tärkeää katsoa, että moottorin öljynpaine nousee heti ja moottori kuulostaa normaalilta. Tämän jälkeen aloitetaan moottorin lämmityskäyttö. Moottoria käytetään, kunnes öljyn lämpötila on ylittänyt 70 °C. Lämmityskäyttö voidaan suorittaa joko moottorin pyöriessä hieman joutokäyntiä korkeammilla kierroksilla vapaasti tai laittaa dynamometri jarruttamaan moottoria kevyesti lämminkäytön ajan.

Kun moottori on toimintalämmöissään, voidaan moottorin kierroslukua nostaa korkeammalle ja varmistaa toiminta. Tässä vaiheessa tehdään pieniä koejarrutuksia dynamometrillä, jotta varmistetaan dynamometrin tiedonkeruun ja tehonmittausohjelmiston toiminta.

4.2 Tehonmittaus

Kun tehonmittausta edeltäneet varmistustoimet ja turvallisuustarkastukset on tehty ja moottori on saavuttanut toimintalämmön, voidaan varsinainen tehonmittaus aloittaa. Tehonmittausta varten on ennen valmisteluvaihetta tehty selvä suunnitelma, mitä kulloinkin halutaan kokeilla ja mistä kierrosluvulta tai kierroslukualueelta mittausta suoritetaan. Tyypillisesti kunkin keskenään erilaisen kokoonpanon kokeilu suoritetaan keskenään samoilta kohdilta vertailun helpottamiseksi, esimerkiksi täysi teho täysiltä kierroksilta.

Tämän työn mittaustulokset on otettu Holset He 851 -turboahdinten kokeiluista. Tässä ahtimessa oli 112 mm pakosiiven jättöpää. Kokeessa käytettiin 1850 barin polttoaineen ruiskutuspainetta.

Dynamometrin ja moottorin välissä on keskipakokytkin ja sen jälkeen Fuller-vaihteisto. Kun vaihteistosta on oikea vaihde kytketty, kierroksia voidaan lähteä nostamaan hiljalleen ylöspäin. Kierrosten noustessa dynamometri kytkeytyy keskipakokytkimen välityksellä moottoriin. Moottorin kierroksia on ensiarvoisen tärkeätä nostaa hitaasti tunnustellen samalla moottorin kuormitusta. Siinä vaiheessa, kun dynamometri alkaa pyöriä moottorin kanssa ilman luistoa, voi kierrosten nostoa nopeuttaa.

Huipputehon mittauksessa nostetaan moottorin kierrokset halutulle tasolle, tässä tapauksessa 3000 kierrokseen minuutissa. Kun kierrokset ovat halutulla tasolla, aloitetaan jarruttamaan moottoria dynamometrillä. Jarruttaminen on tehtävä hitaasti ja moottorin kuormitusta tunnustelemalla. Koska pakokaasuahdin on tässä tapauksessa varsin suuri, vaatii ahtimen saattaminen toiminta-alueelleen kärsivällisyyttä ja kokemusta jarruttajalta.

Kun turboahdin on saatu toiminta-alueelleen ja ahtopaine on haluttu, saatetaan jarrun avulla moottori haluttuun kierroslukumäärään koko ajan maksimitehoa vasten jarruttamalla. Kun kierrosluku on oikea ~2800 rpm, kierrokset on onnistuttava pitämään staattisena vähintään kaksi sekuntia, jotta lopullisesta tuloksesta tulee luotettava ilman inertian aiheuttamaa vääristymää. Kun

maksimiteho on saatu stabiilisti pidettyä kaksi sekuntia päällä, jarrutetaan moottoria hiljalleen yhä alemmille kierroksille. Kun turboahdin putoaa pois toiminta-alueeltaan ja ”sakkaa”, päästetään jarru vapaaksi samalla kun kaasua lähdetään vähentämään. Tällä saadaan tehonmittauksen yhteydessä selville turboahdinten eksakti toiminta-alue.

Tällaisen suhteellisen pitkän maksimitehokuormituksen jälkeen on tärkeää jäähdyttää moottoria ja antaa moottorin käydä korotettua käyntiä niin kauan, että pakolämmöt on saatu laskemaan. Pakolämpöjen laskettua kierroksia tiputetaan alemmas hiljalleen tyhjäkäynnin tuntumaan saakka. Tässä välissä on hyvä silmämääräisesti käydä moottori ja dynamometri ulkoisesti läpi, jotta huomataan mahdolliset rikkoutumiset välittömästi. Koko tehonmittauksen ajan ECU:lta tulevaa live-dataa valvotaan ja katsotaan, pysyykö öljynpaine, öljynlämpö ja vedenlämpö oikeissa arvoissaan.

Kun on todettu kaiken olevan kunnossa, tehdään välittömästi tulosten tarkastus. Tulosten perusteella tehdään päätös, jatketaanko moottorimittausta edelleen, vai onko kaikki halutut arvot saatu mitattua. Vain yli kahden sekunnin staattinen teho kelpaa Ekotuning Group Oy:n standardiksi, jolloin tuloksia voi pitää keskenään vertailukelpoisina. Mikäli kaikki halutut lukemat on saatu, pudotetaan moottori kokonaisuudessaan tyhjäkäynnille. Odotetaan vielä pakolämmön laskemista mahdollisimman alas, ennen kuin moottori sammutetaan.

Moottorin ollessa sammunut, on tärkeää käydä läheltä tarkastamassa mahdollisia vaurioita ja kiinnittää huomio erityisesti turboahtimeen. Kun lämpötilat ovat laskeneet, ahtimen akselia on hyvä kokeilla ja todeta sen kunto.

Kuvassa 4 on meneillään täyden tehon mittausta, kuva on otettu juuri ennen ahtimen tippumista pois toiminta-alueeltaan.

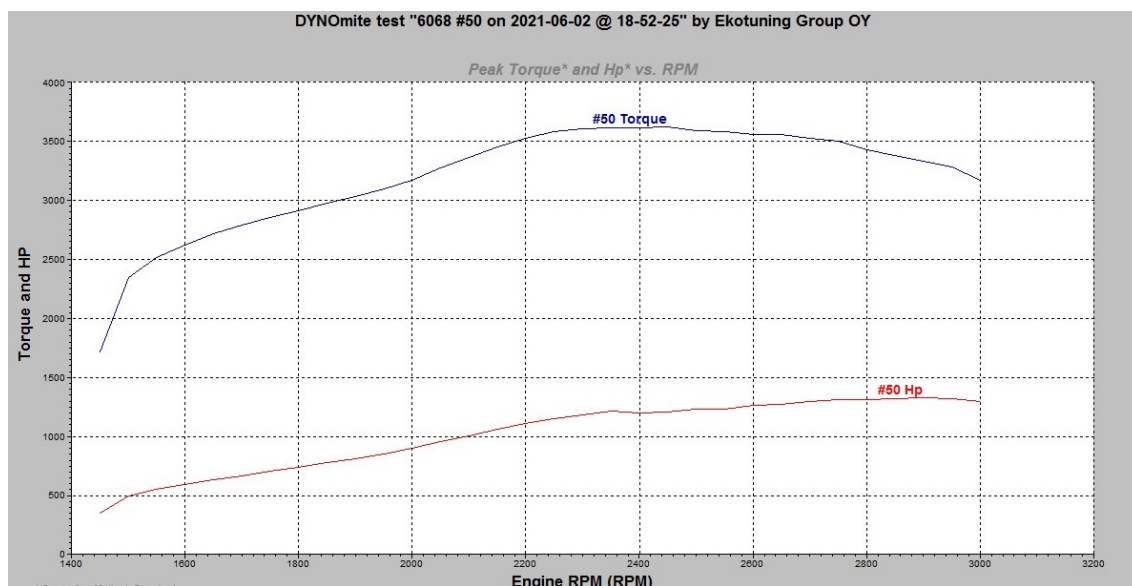


Kuva 4. Täyden tehon mittaus talviaikaan.

4.3 Tulokset ja analysointi

Kun tehonmittaus on suoritettu ja tulokset ovat luettavissa, verrataan tuloksia edellisen kokoonpanon tuloksiin ja niiden pohjalta luodaan karkeat raamit seuraavalle mittaussessiolle. Tehollisten keskipaineiden selvitys sekä maksimiteholla että maksimiväännöllä ovat analysoinnin kannalta tärkeitä.

Kuviosta 2 poimitaan tehon ja väännön maksimilukemien kierroslukualueet.



Kuvio 2. Tehonmittauksen jälkeinen teho- ja vääntömomenttikäyrä.

Kuvion perusteella maksimiteho toteutuu kierroslukualueella 2720-2800 rpm ja maksimivääntö vastaavasti noin 2300-2400 rpm alueella. Mitattu maksimiteho oli 1307 hevosvoimaa, eli 975 kW. Maksimivääntömomentti oli 3605 Nm ja vääntömomentti maksimitehon kohdalla oli 3488 Nm.

Ahto- ja pakopaine on ilmoitettu ylipaineella, eli -1 bar aktuaalista painetta:

Taulukko 3. Mittaussuureiden arvot halutuissa toimintapisteissä.

Mittaussuure	Maksimiteho 975 kW	Maksimivääntö 3605 Nm
Ahtopaine	5,4 bar	4,5 bar
Ahtolämpö	22 °C	28 °C
Pakopaine	2,7 bar	1,8 bar
Pakolämpö	955 °C	854 °C
Lambda	1,03	0,83

Alla on esitetty laskelmat tehollisesta keskipaineesta edellä kuvatuissa toimintapisteissä. Tehollinen keskipaine on yleisesti käytetty tunnusluku arvioitaessa moottorin viritystasetta. Laskemalla keskipaine edellä mitatuista pisteistä saadaan informaatiota moottorin luonteesta kovan kuormituksen alaisessa työssä.

Seuraavassa tehollinen keskipaine laskettuna kaavan 3 mukaan maksimitehon kohdalta:

$$P_e = \frac{PJ}{V_h * N} = \frac{975000 \text{ W} * 2}{6,79 \text{ dm}^3 * (2800 \div 60) \text{ r/s}} = 6154 \text{ kPa} \sim 61,5 \text{ bar}$$

Ja maksimiväännön kohdalla:

$$P_e = \frac{864000 \text{ W} * 2}{6,79 \text{ dm}^3 * (2300 \div 60) \text{ r/s}} = 6638 \text{ kPa} \sim 66,4 \text{ bar}$$

Suurimman tehon kohdalla tehollinen keskipaine on väännön avulla laskettuna kaavalla 2:

$$P_e = \frac{2\pi * J * M}{V_h * n} = \frac{2\pi * 2 * 3488 Nm}{6,79 dm^3} = 6455 kPa \sim 64,6 bar$$

Kaavan 2 mukaan suurimmaksi teholliseksi keskipaineeksi saadaan:

$$P_e = \frac{2\pi * 2 * 3605 Nm}{6,79 dm^3} = 6671 kPa \sim 66,7 bar$$

Vääntömomentin avulla lasketut teholliset keskipaineet (Kaava 2) ovat hieman tehon kautta laskettuja (Kaava 3) lukuja suurempia. Tämä voi johtua esimerkiksi mitattaessa tapahtuneista pienistä inertiaipikeistä, jolloin esimerkiksi jarrutus ei ole ollut täysin tasainen. Joka tapauksessa jokainen laskemalla saatu tehollinen keskipaine on yli 60 baria. Tämä kertoo moottorin viritystason olevan erittäin korkea. Eri kaavoilla laskettujen keskipaineiden keskinäisten erojen pienehköä vaihtelua voi pitää myös tulosten absoluuttisen tason oikeellisuutta vahvistavana.

Tuloksista ja mittaussuureista huotaan, ettei moottori sovellu pitkäaikaiseen maksimaaliseen tehontuottoon, vaan se on suunniteltu kestämaan täyttä tehoa Tractor Pulling -vetosuorituksen ajan. Tässä tarkoituksessaan se onkin kestänyt erittäin ansiokkaasti. Käytetty tehonmittaus oli peräti viideskymmenes tehonmittausohjelmiston vaihdon jälkeen. Tätä ennen moottorilla on ajettu arviolta 170 mittausvetoa ilman moottorin sisäisiä vaurioita tai muita ongelmia.

Vastaavia tehollisia keskipaineita voidaan löytää muistakin viritetyistä moottoreista, joissa on kova teho verrattain pienellä pyörintänopeudella. Kun tämän moottorin lukemat suhteutetaan tyyppillisiin tehollisiin keskipaineisiin auto- ja työkonemaailmassa, huomataan lukujen olevan noin kolminkertaiset tehdasviritteisiin moottoreihin verrattuna. Suurimmat sarjatuotantomoottoreiden maksimitehon aikaiset teholliset keskipaineet löytyvät laivojen dieselmootoreista, missä tehollinen keskipaine on korkeimmillaan 30 barin tienoilla. Täältä pohjalta tämän työn koestuksessa saavutettuja arvoja voi pitää erittäin kovatasoisina.

Polttoaineen ominaiskulutuksesta pystytään jälkikäteen suorittamaan vain karkeita arvioita. Tutkimuksen pääpaino oli edellä esitetystä tehollisen

keskipaineen ja virityksasteen selvittämisessä. Tiedossa on, että polttoaineen ruiskutusmäärä on 565 mm³ sylinteriä kohden yhdellä työkierröksellä 1300 barin ruiskutusaineella. Tässä käytettiin 1850 barin ruiskutusaineetta, jolloin laskennallinen ruiskutusmäärä on vahvistamattoman arvion mukaan noin 23 % edellä mainittua suurempi, toisin sanoen noin 700 mm³ vastaavasti.

Tuotettuun tehoon nähden polttoaineen kulutus näyttäisi olevan lievästi vakiomoottoria suurempi, joskaan tarkalleen vastaavan tehdasmoottorin tarkkoja vakiosuorituskykyarvoja ei ollut saatavissa. Asian selvittämiseksi ja mittaamiseksi tulisi suorittaa tarkempi koeajo mittauksineen.

5 Lopuksi

Työn tavoitteena oli tutustua polttomoottorin tehonnoston taustalla vaikuttaviin tekijöihin, käytännön mittauksiin, niissä syntyneeseen dataan ja sen analysointiin. Tämä työ toimii työkaluna ja dokumenttina Ekotuning Group Oy:lle aikaisemmin tehdyistä, mutta analysoimatta jääneistä John Deere 6068 -moottorin tehonmittauksista ja moottoriteknisistä tunnusluvuista.

Polttomoottorin tehontuotannon ja tehonnoston historia on tärkeä ymmärtää ja sisäistää pohdittaessa nykyaikaisen teknologian mahdollisuuksia suhteessa tehonnostoon. Toisen maailmansodan lentokonemoottoreiden tehonnoston ideologiassa ja ratkaisutavoissa on hyvin paljon aivan samoja tekijöitä kuin tämän työn moottorin tehonnostossa.

Teoriaosuudessa läpikäyty päästövaihe ei suoranaisesti liity tämän työn moottoriin, mutta erilaisten päästöjen läpikäynti on ollut taustoittamassa ja lisäämässä ymmärrystä nykyaikaisen polttomoottorin valmistukseen liittyvistä haasteista. Samalla päästöjen hallintaratkaisujen avulla on pystytty avaamaan moottorinohjauksen vaikutusta lopputulokseen ja perustelemaan ohjauksen kehityksen taustalla olevia syitä.

Teoriapohjan tarkoituksena on ollut antaa kokonaiskuva ja pohjatiedot tämän työn lopputulosten arvioimiseksi. Suoritetut mittaukset ja näiden tulosten pohjalta lasketut tehollisen keskipaineen tulokset ovat arvoiltaan todella kovia. Tulosten kova taso antaa hyvän pohjan mahdollisille jatkokehityksille.

Lähteet

Autotuojat ja -teollisuus 2024. Pakokaasupäästöjä koskevat normit EU:ssa. Viitattu 10.5.2024.

https://www.autotuojat.fi/uutishuone/autoalan_termistoa/euro-paastoluokat

Euroopan komissio 2024. CO₂ emission performance standards for cars and vans. Viitattu 16.5.2024.

https://climate.ec.europa.eu/eu-action/transport/road-transport-reducing-co2-emissions-vehicles/co2-emission-performance-standards-cars-and-vans_en

Focke-Wulf Flugzeugbau GmbH 1945. Archives of M. Williams. Viitattu 22.5.2024.

<http://www.wwiiaircraftperformance.org/fw190/fw190-a8-12jan45.jpg>

Heywood, J. 2018. Internal Combustion Engine Fundamentals. New York: Mc Graw Hill Education.

Ikonen, M. 2022. Moottoritekniikan opintojakson oppimateriaali. Turku: Turun ammattikorkeakoulu.

Koneviesti 2022. Moottoritekniikan kehittyminen. Joensuu: Viestimedia Oy/Koneviesti.

Mollenhauer, K. & Tschoeke, H. 2010. Handbook of Diesel Engines. Heidelberg: Springer.

NASA 2024. Carbon Dioxide. Viitattu 18.5.2024.

<https://climate.nasa.gov/vital-signs/carbon-dioxide/?intent=121>

Papadakis, S. 2019. 2020 Supra 1000 HP Engine Assembly - Start to Finish. Viitattu 20.5.2024.

<https://www.youtube.com/watch?v=eT8ZRb1Out8>

Scania 2024a. V8 Truck Range. Viitattu 5.5.2024.

<https://www.scania.com/group/en/home/products-and-services/trucks/v8.html>

Scania 2024b. Teollisuuden erillismoottorit. Viitattu 5.5.2024.

<https://www.scania.com/fi/fi/home/products/power-solutions/industrial-power-solutions.html>

TractorData 2023. John Deere 6190R Engine. Viitattu 16.5.2024.
<https://www.tractordata.com/farm-tractors/007/1/5/7151-john-deere-6190r-engine.html>

Valmistajat.fi 2024. Automaatio ja automaatiojärjestelmät. Viitattu 22.5.2024.
<https://valmistajat.fi/menetelmat/elektroniikka/automaatio-ja-automaatiojarjestelmat>