

Opinnäytetyö (AMK)

Ajoneuvo- ja kuljetustekniikka

2024

Riku Hirvonen

Polttomoottorin kaasunvaihdon kehittäminen



Opinnäytetyö (AMK) | Tiivistelmä

Turun ammattikorkeakoulu

Ajoneuvo- ja kuljetustekniikka

Kesäkuu 2024 | 32 sivua

Riku Hirvonen

Polttomoottorin kaasunvaihdon kehittäminen

Opinnäytetyöni tavoitteena oli selvittää simulointiohjelman avulla kehitysehdotus polttomoottorin kaasunvaihdon parantamiseksi. Työssä keskitytään nokka-akselin profiiliin ja puristussuhteen muutosten vaikutuksiin moottorin suorituskyvyssä. Työn tarkoituksena oli löytää ratkaisu kyseiseen moottoriin, sekä havainnollistaa miten erilaiset muutokset moottorin kaasunvaihdon osalta vaikuttavat sen suorituskykyyn.

Opinnäytetyö toteutettiin henkilökohtaisena työnä. Työn mittausosuus perustuu omiin mittauksiin. Työssä käytettävä moottori on opinnäytetyön tekijän omistuksessa. Opinnäytetyön mallinnusosuus toteutettiin erillisellä mallinnusohjelmalla.

Lopputuloksena on mallinnettu moottori, jonka nokka-akseliprofiili ja puristussuhde on voitu optimoida halutun mallinnuksen pohjalta. Mallinnuksen pohjalta tehdään päätös parannusehdotuksesta nokka-akselin ja puristussuhteen muuttamiselle moottorin suorituskyvyn parantamiseksi.

Asiasanat:

Moottorin mallinnus, nokka-akseli, puristussuhde

Bachelor's Thesis | Abstract

Turku University of Applied Sciences

Automotive and Transportation Engineering

June 2024 | 32 pages

Riku Hirvonen

Gas exchange reform for combustion engine

The goal for my bachelor's thesis was to sort out using a separate simulation program to figure out an improvement proposal of gas exchange on an internal combustion engine. The work is focused on how changing the camshaft geometry and compression ratio affects the engine performance. The purpose of this work was to sort out a solution for the engine and to illustrate how different changes at gas exchange affect the engines performance.

The thesis was conducted as a personal work. The measuring part of the work is based on personal measurement. The engine used in this work is owned by the author of this thesis. The modeling part of this thesis was carried out by a separate modeling program.

The result is a modeled engine which camshaft geometry and compression ratio have been optimized to desired result based on the modeling. Based on the modeling, a decision is made on the improvement proposal of camshaft and compression ratio, to improve engine's performance.

Keywords:

Engine modelling, camshaft, compression ratio

Sisältö

Käytetyt lyhenteet tai sanasto	6
1 Johdanto	7
2 Teoria	8
2.1 Puristussuhde	8
2.2 Nokka-akseli	10
2.3 Vääntömomentti ja teho	13
3 Moottorin ominaisuudet	14
3.1 Moottorin yleiset tiedot	14
3.2 Venttiilikoneisto	15
3.3 Imu- ja pakosarja	16
4 Moottorin mallintaminen	18
4.1 Valmistelu	18
4.2 Nokka-akselin mittaus	18
4.3 Mallinnuksen aloittaminen	20
5 Tulosten analysointi	22
5.1 Lähtötilanne	22
5.2 Muutokset mallinnuksessa	23
5.3 Yhteenveto	28
6 Lopuksi	30
Lähteet	31
 Kuvat	
Kuva 1. Nokka-akseli (CompCams)	10
Kuva 2. Imusarja	17
Kuva 3. Nokka-akselin profiilit mitattuna	19

Kuva 4. Mallinnusohjelma DynoSim6	20
Kuva 5. Vääntömomentti ja teho	23
Kuva 6. Imunokan duraatio kasvatettuna	24
Kuva 7. Compression Ratio Calculator	25
Kuva 8. Korotettu puristussuhde	26
Kuva 9. Alhaisempi puristussuhde	26
Kuva 10. Nokka-akselin ajoituksen aikaistus 2°	27

Taulukot

Taulukko 1. Nokka-akselin avautumis- ja sulkukohtat.	15
Taulukko 2. Duraatiot asteina.	16

Käytetyt lyhenteet tai sanasto

AFR	Air/ Fuel Ratio
CID	Cubic-Inches Displacement
Overlap	Imu- ja pakventtiin yhtäaikainen aukiolo
OHV	Overhead valve engine
PSI	Pounds per square inch
SBC	Chevrolet small-block engine
YKK	Yläkuolokohta

1 Johdanto

Polttomoottoreiden kaasunvaihdon kehitystä on tutkittu vuosikymmeniä. Parannusehdotuksia sekä menetelmiä on erilaisin tavoin kehitetty historiassa monia. Huolimatta lukuisista kokeiluista vuosikymmenten saatossa löytyy aina jostain näkökulmasta parempi ratkaisu edelliseen verrattuna. Polttomoottoreiden suorituskyky on noussut huimasti vuosien saatossa.

Opinnäytetyössä keskitytään miten nokka-akselin valinnalla ja puristussuhteen muutoksella on vaikutus polttomoottorin kaasunvaihtoon. Työn teoriaosa pohjautuu kirjallisuuteen ja verkkolähteisiin. Työssä käsitellään puristussuhteen ja nokka-akselin geometrian teoriaa ja näiden muuttamisen vaikutusta moottorin suorituskykyyn.

Työn tarkoituksena oli löytää suorituskyvyn kannalta optimaalinen puristussuhteen ja nokka-akseliprofiilin yhdistelmä. Mallinnustyö tehdään erillisellä mallinnusohjelmalla DynoSim6, johon syötetään mitatut ja tiedossa olevat arvot.

2 Teoria

Tässä luvussa käsitellään nokka-akselin ja puristussuhteen vaikutusta polttomoottorin suorituskykyyn. Luvussa myös esitetään vääntömomentin ja tehon määritelmät.

2.1 Puristussuhde

Puristussuhde lasketaan puristustilavuuden ja iskutilavuuden summan suhteesta iskutilavuuteen. Iskutilavuus lasketaan männän poikkipinta-alan ja iskupituuden tulona. Puristustilavuus on tilavuus, joka jää männän ja palotilan väliin männän ollessa yläkuolokohdassa. Puristussuhde ilmoitetaan muodossa $\epsilon:1$, jossa ϵ on puristussuhde ja numero 1 on suhdeluku.

Puristussuhde lasketaan kaavan (Bosch, R. 2003, 457) mukaisesti:

$$\epsilon = \frac{V_h + v_c}{v_c}, \quad (1)$$

jossa

ϵ on puristussuhde

V_h on iskutilavuus (cm^3)

V_c on puristustilavuus (cm^3).

Moottorin puristussuhdetta nostamalla kasvatetaan moottorin tehollista keskipainetta ja suorituskykyä koko kierrosalueella. Liiallinen puristussuhteen nostaminen lisää moottorivaurion ja nakutuksen riskiä. Moottorin mekaanisten osien kestävyys tulee myös kysymykseen, jos puristussuhdetta nostetaan liikaa.

Detonointi

Detonointi eli haitallinen nakutus on ennenaikaista syttymistä, joka voi olla normaalin kipinäsytytteisen palotapahtuman tai puristussytyttämisen johdannainen. Detonointia voi tapahtua tilanteessa, jossa palotilan toisessa reunassa syttyy puristuksen ja korkean lämpötilan johdannaisten toinen liekkirintama, moottorin normaalin kipinän lisäksi. (Szabo, J. 2019 Enginelabs)

Nakutus on yleensä kuultavissa ihmiskorvalla. Nakutusta voidaan ehkäistä käyttämällä korkea oktaanilukuista polttoainetta ottomoottorissa, jolloin nakutuskestävyys paranee. Puristussuhdetta nostattaessa nakutusriski kasvaa. (Bosch, R. 2003, 536 –537)

Dynaaminen puristussuhde

Dynaaminen puristussuhde on määräävänä tekijänä, kun mietitään kaasunvaihtoa laajemmin. Staattinen puristussuhde kertoo moottorin laskennallisen puristussuhteen kaikilla pyörintänopeuksilla. Dynaamisen puristussuhteen arvoon vaikuttaa merkittävästi millä hetkellä imuventtiili suljetaan. Dynaaminen puristussuhde vaikuttaa myös siihen, että kuinka suuren oktaaniluvun omaavaa polttoainetta moottorissa tulee käyttää. Staattinen puristussuhde on aina täten korkeampi kuin dynaaminen puristussuhde.

Dynaamista puristussuhdetta muokataan imuventtiilin sulkemisajankohtaa muuttamalla. Imuventtiilin sulkeminen aikaisemmin saa dynaamisen puristussuhteen nousemaan, kun taas sulkemalla imuventtiili myöhemmin dynaaminen puristussuhde laskee. Imuventtiilin sulkeminen aikaisemmin lisää matalilla kierroksilla vääntömomenttia, mutta leikkaa korkeammilla kierroksilla vääntömomenttia. Myöhäisellä imuventtiilin sulkemisella vältytään usein nakutukselta alhaisimmilla kierrosluvuilla. Dynaaminen puristussuhteeseen vaikuttaa imunokka-akselin ajoitus, sillä imuventtiilin sulkemiskohdan muokkauksella vaikutetaan dynaamisen puristussuhteen alkamiseen. Imuventtiilin ollessa auki ei puristusta tapahdu. Laskenta määräytyy juuri

imuventtiin sulkemiskohdan ja todellisen puristusmatkan mukaisesti. (Hot Rod Engine Tech, Dynamic Compression)

2.2 Nokka-akseli

Nokka-akseli on moottorin mekaaninen komponentti, jonka tarkoituksena on ohjata venttiilien avautumista ja sulkemista. Nokka-akseli voidaan jakaa neljään eri osaan. Nokka-akseli pyörii oman perusympyrän suhteen. Nokka-akselin kärki on alue, jossa venttiin maksiminosto tapahtuu. Kärjen sivuilla sijaitsevat nokka-akselin kyljet. Perusympyrän ja kylkien välissä on esinokka-alue, jonka tarkoituksena on poistaa nokan ja nostajan välinen välys. Näin venttiiliä avataan hillityllä kiihtyvyydellä. (Hot Rod Engine Tech, Camshaft)



Kuva 1. Nokka-akseli (CompCams)

Nokka-akselin ajoitus

Tutkimuskohteena olevan moottorin kaasunvaihto tapahtuu kiinteällä venttiiliajoituksella. Tämän tyyppisellä ajoitustavalla joudutaan tekemään päätös, parannetaanko ala- vai yläkierrosalueen ominaisuuksia.

Vapaastihengittävän polttomoottorin tehon huippuarvo sijoittuu tyypillisesti korkeammille kierroksille, kun vääntömomentin huippuarvo on alemmilla kierrosnopeuksilla. Yleisesti katuliikenteeseen tarkoitetuissa moottoreissa käyttöalue on alhaisimmilla pyörintänopeuksilla. Kilpamoottoreiden käyttötarkoituksen vuoksi voidaan panostaa suurien pyörintänopeuksien tehon ja vääntömomentin ominaisuuksiin. (Mauno 1990, 30)

Kaasupatsaan hitaus on merkittävä tekijä nokka-akselin ajoituksen kannalta. Aikaistamalla imuventtiilin aukeamista on mahdollista lisätä vääntömomenttia alakierroksilla, kun myöhästyksellä imuventtiilin sulkemista kasvaa vääntömomentin huippu korkeammalle kierrosalueelle. Johtuen kaasupatsaan hitaudesta, alakuolokohdan jälkeen imuventtiili voi olla avattuna hetken ennen kuin imuilman virtaus kääntyy pois päin sylinteristä. Tämä mahdollistaa pidemmän ajan imuilmalle virrata sylinteriin tietyllä pyörimisnopeudella.

Duraatio

Duraatio on kampiakselinasteina ilmoitettava vaihe, jolloin nokka-akselin nokka avaa ja sulkee venttiiliä eli kerrotaan, kuinka pitkään venttiili on auki. Monet valmistajat ilmoittavat mille pyörimisnopeusalueelle nokka-akselit ovat suunniteltu, joka perustuu pitkälti duraatioihin. Duraatiot ovat monesti luettavissa valmistajien teknisistä tiedoista. Duraatio on mahdollista todentaa myös työkaluja käyttäen, jos varmaa tietoa ei ole saatavilla. Duraatioiden määrällä on yleensä vaikutus myös imu- ja pakoventtiilin yhteiseen aukioloaikaan. (Summit, Duration)

Overlap

Overlapilla tarkoitetaan imu- sekä pakoventtiilin yhtäaikaista aukioloa pakotahdin lopusta, imutahdin alkuun. Overlap lasketaan siis imuventtiilin avautumiskohdasta eykk, pakoventtiilin sulkemiskohtaan jykk. (Summit, Overlap)

Pyrittäessä parhaaseen mahdolliseen sylinterintäytökseen tulisi imuventtiilin aueta ennen imutahdin alkua. Tämä johtuu kaasupatsaan hitaudesta, jota sylinteriin sisään ja ulos virtaavalla seoksella on. Liikkeen jatkuvuuden lain mukaan muutokset eivät ole äkillisiä, joten imuventtiili on oltava auki ennen männän saapumista yläkuolokohtaan. Tämä takaa paremman sylinterin täytöksen. Imuventtiilin liian aikaisella avaamisella on kuitenkin olemassa haittapuolia. Liian aikainen imuventtiilin avaaminen saa aikaan pakotahdin lopussa olevan pakokaasun pakenemaan imuventtiilin ohitse. Toisaalta aikainen imuventtiilin avaaminen lisää riskiä imuventtiilin ja männän kosketukselle. (Mauno 1990, 30)

Pakoventtiiliä pyritään avaamaan ennen männän saavutettua alakuolokohtaa, jotta paineen huippu ei nousu liian korkeaksi. Pakoventtiilin avaaminen riittävän aikaisessa vaiheessa vähentää männän tekemää työtä pakotahdin alussa. Pakoventtiili pyritään sulkemaan vasta yläkuolokohdan jälkeen, sillä sylinteristä poistuvan pakokaasun liikkeen hitaus imee sylinterin mahdollisimman hyvin tyhjäksi. (Mauno 1990, 30)

Yksi nokka-akselin valintaan liittyvä asia on Lobe centerline angle (LCA), jolla tarkoitetaan imu- ja pakonokan keskilinjojen välistä kulmaa. Valmistajat voivat ilmoittaa saman kulman eri termillä, Lobe separation angle (LSA).

Sylinterin täytös

Sylinterin täytöksellä tarkoitetaan, kuinka paljon polttoaineilmaseosta sylinteriin saadaan imutahdin aikana syötettyä. Sylinterin täytöstä voitaisiin parantaa suurentamalla imu- sekä pakoventtiilien kokoa, mutta tämä ei välttämättä ole aina mahdollista venttiilikoneiston fyysisten mittojen vuoksi. Täytöstä on mahdollista parantaa sulkemalla imuventtiili mahdollisimman myöhään. Liian

myöhäisellä imuventtiilin sulkemisella sylinterissä vallitseva paine voittaa imusarjan paineen, saaden aikaan heikomman täytöksen. Imuventtiilin sulkeminen myöhemmin nostaa korkeilla kierroksilla tehoa, mutta heikentää alhaisilla kierrosalueilla moottorin suorituskykyä. (Smith 1972, 194–195)

2.3 Vääntömomentti ja teho

Polttomoottorin vääntömomenttia ja tehoa pystytään lisäämään muutamalla tai vaihtamalla moottorin osia tai muokkaamalla käytössä olevia osia. Näillä toimilla pyritään parantamaan joko moottorin hyötysuhdetta tai sylinteriin virtaavan polttoaineen ja ilman seoksen määrää. Vääntömomentti ja teho ovat mitattavissa kampiakselilta. Kummatkin ovat laskettavissa, kun tiedetään toinen ja mitattavalta hetkeltä moottorin pyörintänopeus. (Mauno 1990, 6)

Vääntömomentti ja teho lasketaan kaavan (Mauno 1990, 6) mukaisesti:

$$P = M \cdot 2 \cdot \pi \cdot n \quad (2)$$

jossa

P on teho (W)

M on vääntömomentti (Nm)

n on moottorin pyörintänopeus ($1/s$).

3 Moottorin ominaisuudet

3.1 Moottorin yleiset tiedot

Opinnäytetyössäni moottorina on 4-tahtinen V8 ottomoottori. Moottorin tilavuudeksi on ilmoitettu 400 (cid) kuutiotuumaa eli 6554cc. Moottori pohjautuu General Motorsin valmistamaan SBC-moottoriryhmään, jonka ensimmäiset versiot ovat valmistettu jo 1970-luvulla. Työssä käytetty sylinteriryhmä on tarvikemallinen, joka pohjautuu alkuperäisen sylinteriryhmän mittoihin.

Moottorissa on kärjetön sytytysjärjestelmä. Virranjakajan kanteen on integroituna sytytyspuola. Järjestelmän toiminta perustuu keskinäisinduktioon, jossa sytytyspuolan ensikäämin läpi kulkeva virta indusoituu magneettikentän romahtamisen jälkeen toisiokäämille saaden syntyneen korkeajännitteen kulkeutumaan virranjakajan pyörijän kautta sytytysvuorossa olevalle tulpalle. (Mauno 1990, 107)

Polttoainejärjestelmänä moottorissa on yksi imusarjan yläpuoleinen kiinteä nelikurkkuinen vaihekaasutin. Toisiopuolen kaasuläpät aukeavat vasta moottorin suuremmilla kierroksilla. Polttoaineen syöttöpaine kaasuttimelle on rajoitettu kaikilla kierrosalueilla noin 0,4 bar:n paineeseen. Moottoriin syötettävän ilman määrää säädetään mekaanisesti vaijeriyhteydellä, joka saa läppiä avaamalla ilmaa ja polttoainetta virtaamaan enemmän moottoriin kaasuttimen toimintaperiaatteen mukaisesti. (Mauno 1990, 47)

Puristussuhde

Puristussuhteen laskentaan on käytetty puristustilavuutta $v_p = 79,2 \text{ cm}^3$, ja isku- ja puristustilavuus on laskettu erikseen mallinnusohjelman avulla. Puristussuhde on laskettuna tutkimuskohteesta 11,37:1. Moottorin puristussuhde on suhteellisen matala verrattuna nykyaikaisiin moottoreihin.

$$\varepsilon = \frac{V_h + v_p}{v_p} = \frac{821,19\text{cm}^3 + 79,2\text{cm}^3}{79,2\text{cm}^3} = 11,37$$

3.2 Venttiilikoneisto

Moottorin venttiilikoneisto on OHV-tyyppinen. Tästä moottorityypistä käytetään myös nimitystä työntötankomoottori. Nokka-akseli sijaitsee moottorilohkossa, kampiakselin yläpuolella. Nokka-akseli on vasten nostajia, joka välittää voiman työntötankojen välityksellä keinuvivulle. Keinuvipu painaa venttiiliä alaspäin, joka saa venttiilin avautumaan vipusuhteen vaikutuksesta. Etuina tämäntyyppisellä rakenteella on sen yksinkertainen rakenne.

Nokka-akseli

Nokka-akselina tässä työssä on valittuna nokka-akseli, jonka kanssa käytetään rullalaakeroituja venttiilinnostimia. Moottorissa on nokka-akseleita yksi kappale. Yhteys nokka-akselin ja kampiakselin välillä on toteutettu ketjulla. Nokka-akseli on symmetrinen eli sen nouseva ja laskeva kylki ovat identtiset. Nokka-akselista on olemassa ilmoitetut mitat, mutta työtä varten päätettiin mitata imu- sekä pakonokan profiilit venttiilikoneistosta käsin.

Nokka-akselin aukeamiskohdat ovat luettu valmistajan ilmoittamien tietojen perusteella Taulukon 1. mukaisesti. Valmistaja on ilmoittanut aukioloajat 0.050" venttiilinnostolla. (CompCams)

Taulukko 1. Nokka-akselin avautumis- ja sulkukohdat.

	Avautuu	Sulkeutuu
Imu	37° EYKK	69° JAKK
Pako	80° EAKK	32° JYKK

Tässä nokka-akselissa overlap on $37^\circ + 32^\circ = 69^\circ$.

Valmistaja on ilmoittanut duraatiot 0.050” venttiilin nostolla. Duraatiot ovat luettu nokkakortilta, jotka ovat lueteltu Taulukon 2. mukaisesti. (CompCams)

Taulukko 2. Duraatiot asteina.

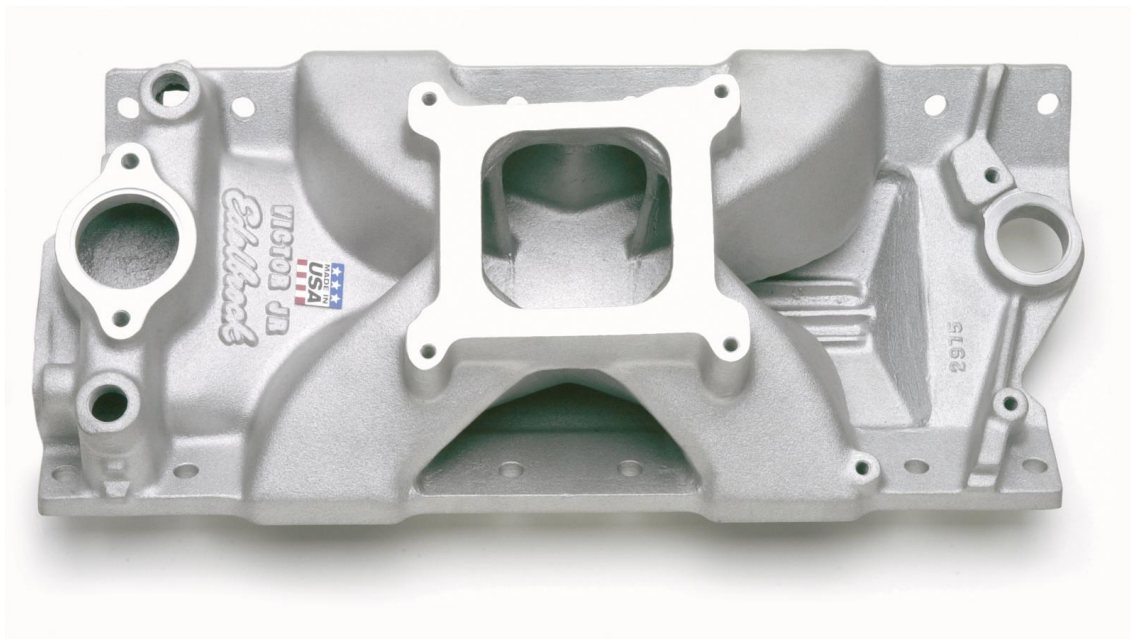
	Standard	Advertised
Imu	248°	286°
Pako	254°	292°

Valmistaja on ilmoittanut nokka-akselille nokkien välisen kulman olevan 110°. Nokka-akselin maksimi nostot ilmoitetaan joko milleinä tai tuumina. Tässä työssä käytettävän nokka-akselin maksimi nostot imu- ja pakonokalta ovat luettavissa nokkakortilta. Maksiminosto imunokalla on 0.576” eli 14,63 mm ja pakonokalla 0.582” eli 14,78 mm.

Todellinen nosto venttiilillä riippuu vipusuhteesta. Moottorissa on asennettu keinuvivut, joiden vipusuhteeksi on ilmoitettu 1,52. Vipusuhte kerrotaan valmistajan ilmoittaman maksiminoston arvoilla, jonka tuloksena saadaan todelliset venttiilinnostot. Vipusuhdetta muokkaamalla on siis merkittävä vaikutus sylinterintäytökseen.

3.3 Imu- ja pakosarja

Imusarja on sijoitettu rakenteellisista syistä moottorilohkon yläpuolelle. Polttoaine-ilmaseos jakautuu imusarjan läpi sylintereihin. Imusarja on avoin tyyppinen eli ns. yksitasoinen, jonka ideana on virtauksen tasaisempi jakautuminen kaikkiin kahdeksaan sylinteriin. Tämän tyyppinen imusarja soveltuu paremmin kilpakäyttöön. Jos haluttaisiin alemmille kierrosalueille enemmän vääntömomenttia, olisi kaksitasoinen imusarja parempi vaihtoehto. (Holley)



Kuva 2. Imusarja

Pakosarjat

Pakosarjat ovat erillään toisistaan, kun kyseessä on V-moottori. Pakosarjat ovat 4-1 tyyppiset. Primaariputken ulkohalkaisijaksi on ilmoitettu 1 3/4". Kollektorin halkaisijaksi valmistaja on ilmoittanut 3". Valmistaja ei ole ilmoittanut pakosarjan pituutta. Vasemman ja oikean puolen pakokaasut eivät ole kosketuksissa toisiinsa, joten impulssit eivät häiritse kummankaan puolen toimintaa vaan ovat täysin itsenäisiä.

4 Moottorin mallintaminen

4.1 Valmistelu

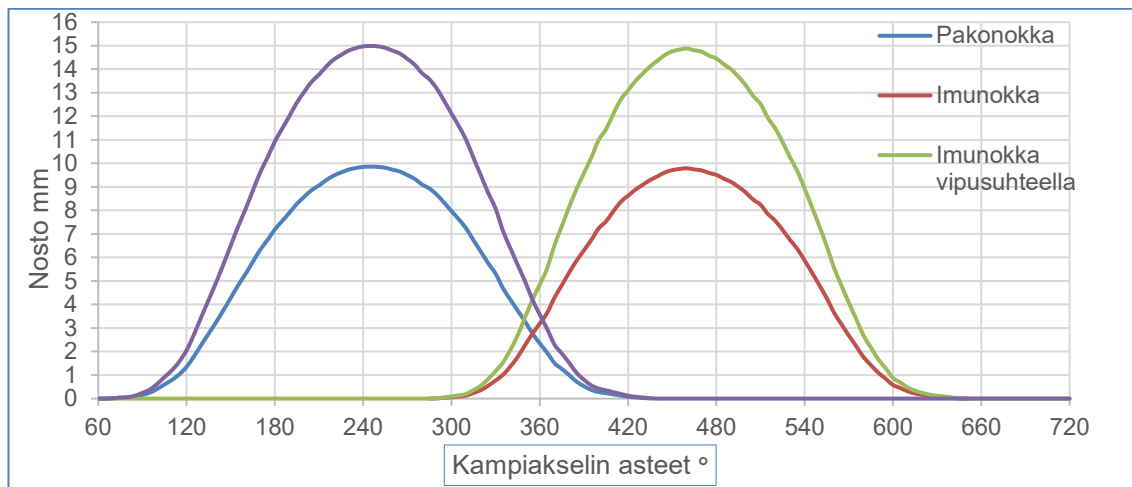
Tutkimuskohteesta on mitattu moottoridynamometrillä vääntömomentti ja teho toukokuussa 2023. Tämän tiedon pohjalta verrattiin mallinnusohjelman piirtämää kuvaajaa mitattuun tietoon. Simulointiohjelmaan syötettiin silloin vallitsevat ympäristötiedot, jotta tulosten vertailu olisi mahdollisimman todenmukaista. Vallitsevan ilmanpaineen sekä -lämpötilan lisäksi kerrotaan ohjelmalle ilmankosteus ja mittauspaikan korkeus merenpinnasta. Ohjelma laskee näiden arvojen perusteella korjauskertoimen, jota käytettiin simulointiohjelmassa.

Moottori mallinettiin Dynosim6 -ohjelman avulla. Ohjelmaan on mahdollista syöttää valmiita arvoja esimerkiksi venttiilikansien viritysasteista, pakosarjojen pituuksia ja imusarjan virtauksia. Tässä työssä kaikkia osa-alueita ei mitattu erikseen vaan arvioitiin lähelle todellista oletettua arvoa.

4.2 Nokka-akselin mittaus

Nokka-akselin mittaus tapahtui moottorin ollessa ajoneuvossa paikallaan. Mittaus tapahtui AKK Motorsportin ohjeita soveltaen. Nokka-akselia ei irrotettu moottorista työn aikana, joten peruskehää ja nokan kärkeä ei mitattu tätä työtä varten. Mittausta varten moottorista irrotettiin kuljettajan puolen venttiilikoppa ja mittaus tehtiin ensimmäiseltä sylinteriltä. Kampiakselin hihnapyörän päähän asetettiin astelevy, joka kalibroitiin yläkuolokohtaan, työkalun avulla näyttämään oikein. Yläkuolokohdan määrittämisen jälkeen tapahtui mittaus. Työkaluina mittauksessa käytettiin astelevyä, mittakelloa ja muistiinpanovälineitä. (AKK Motorsport: Nokka-akselin mittaus, 2014)

Profiilit päätettiin mitata 5° välein, jotta kuvaajista tulisi sulavat ja nokan maksiminosto löytyisi tarkemmin.



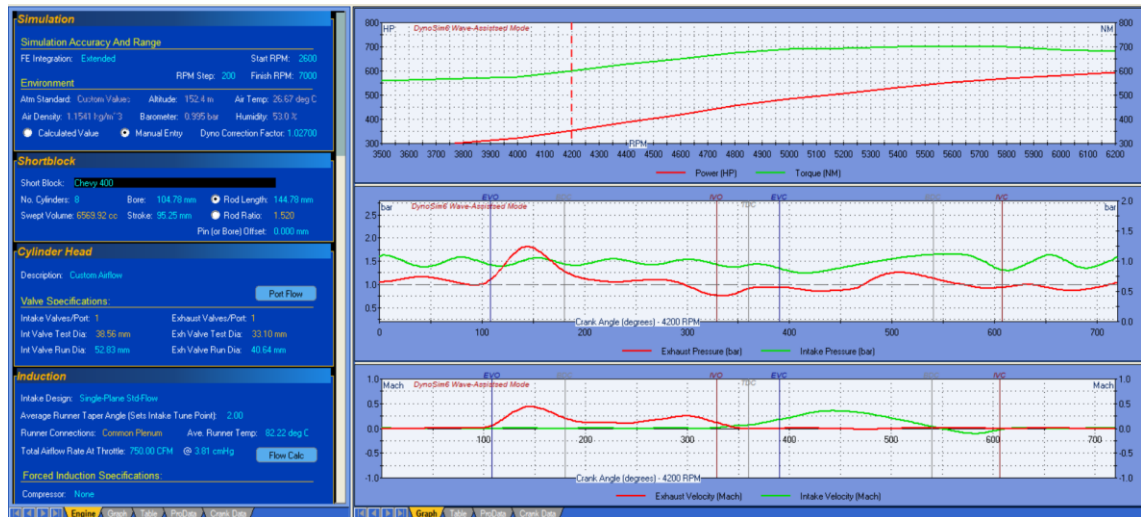
Kuva 3. Nokka-akselin profiilit mitattuna

Nokka-akselin maksimi nosto on mitattuna 0,2 mm enemmän mitä valmistaja on ilmoittanut. Tämän ero tulee osin valmistajan tavasta ilmoittaa maksiminosto, sekä mittatarkkuudesta ja käytetyistä mittausvälineistä Tutkimiskohteessa käytettävät keinuviivut ovat 1,52 vipusuhteella, kun valmistaja ilmoittaa maksiminoston 1,5 vipusuhteella. Mitattu maksiminosto imuventtiililtä oli valmistajan ilmoittavalla tavalla 14,68 mm eli 0,578" ja pakoventtiililtä 14,79 mm eli (0,582"). Eli mitattu maksiminosto eroaa valmistajan ilmoittamasta, imupuolella 0,05 mm ja pakopuolella 0,01 mm. Todelliseen maksiminostoon vaikuttaa myös venttiilinvälitys.

Mallinnusohjelmaa varten tarkastettiin moottorista nokka-akselin ajoitus, joka on 0-asennossa, eli nokka-akselia ei ole suhteessa kampiakselin asteisiin muutettu aikaisemmalle tai myöhäisemmälle mitatusta. 0-kohta määritetään 1 sylinterin männän ollessa yläkuolokohdassa, jonka mukaan mitataan imuventtiilin avautuma millein. Nokka-akselin ajoitusta on mahdollista säätää tutkimuskohteessa 2° välein.

4.3 Mallinnuksen aloittaminen

Mallintaminen aloitetaan luomalla uusi työ ohjelmaan. Ohjelmaan syötetään pakolliset tiedot kenttiin, jotka ovat pakollisia lopputuloksen kannalta. Tämän työn osalta tiedossa ovat moottorin mekaaniset mitat.



Kuva 4. Mallinnusohjelma DynoSim6

Nokka-akseliin profiilit ilmoitettiin 10-piste mittauksena ohjelmaan. Määritetyt arvot syötetään erillisen välilehden kautta ohjelmaan ja ohjelma automaattisesti muokkaa kuvaajat annettujen tietojen mukaan. Työssä käytettiin mitattuja arvoja nokka-akselilta. Ohjelma vaatii toimiakseen 0.050" sekä 0.006" nokan nostolla duraatiot.

Simulointiohjelma vaatii toimiakseen moottorin fyysisiä mittoja ja arvoja, jotka lopputuloksen kannalta ovat oleellisia työn tarkkuuden osalta. Oletetut arvot valittiin vastaamaan mahdollisimman todellista. Ohjelma tarjoaa muutamia vaihtoehtoja imu- sekä pakosarjojen osalta. Imusarja valittiin virtausominaisuuksiltaan vastaamaan käytössä olevaa, termillä "standard flow". Pakosarjojen osalta tehtiin sama oletus niiden ominaisuuksien perusteella.

Sylinterikansien virtausominaisuuksia ei ole mitattu erikseen, mutta valmistajan sivuilta on saatavilla heidän mittaamat virtaukset imu- sekä pakokanavien osalta. Virtaukset ovat ilmoitettu valmistajan toimesta 0.1" noston välein, jotka

syötettiin ohjelmassa pyydettyyn kohtaan. Ohjelma kysyy myös virtausten lisäksi myös venttiilien halkaisijan ja kappalemäärän. Palotilan muoto ilmoitetaan samalle välilehdelle.

5 Tulosten analysointi

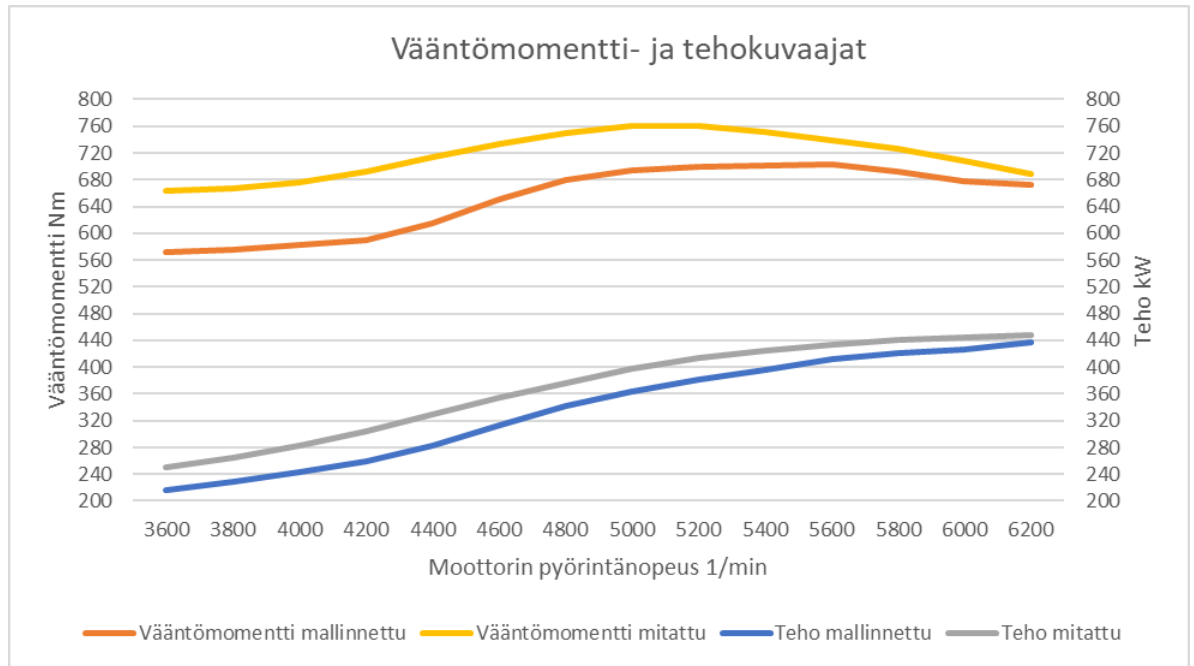
5.1 Lähtötilanne

Työn tavoitteena oli löytää parannusehdotus kyseiselle tutkimuskohteena olevalle moottorille. Ideana oli saada mallinnettua mahdollisimman tarkasti simulointiohjelmaan olemassa oleva moottori. Moottorin mekaaniset mitat olivat jo tiedossa, mutta työn kannalta tiedossa ei ollut nokka-akselin tarkasti mitattua profiilia. Moottorin puristussuhde on laskettuna mallinnusohjelman avulla, kuten myös tässä työssä esillä.

Simulointiohjelman avulla pystyttiin todentamaan miten eri osa-alueet polttomoottorin kaasunvaihdossa vaikuttavat suorituskyykyyn.

Moottorin nykyinen maksimi teho ja vääntömomentti on mitattu moottoridynamometrillä apulaitteiden kanssa. Maksimitehoksi on saatu 6200 1/min kohdalla lukemaksi 447,80 kW. Maksimi vääntömomentti on saatu 5100 1/min kohdalla lukemaksi 762,04 Nm. Lähtötilanne vääntömomentin ja tehon osalta on esitetty Kuvassa 5.

Kuvaajista nähdään niiden yhdenmuotoisuus. Vääntömomentin osalta mallinnetun ja mitatun välillä on heittoa prosentuaalisesti noin 14 % 3600 1/min, kun taas 6200 1/min eroa on noin 2 %. Tämän eron osittain selittänee tiedon puute imusarjan ja pakosarjan virtauksista sekä tarkkasytytysennakko jokaisella kierrosalueella. Toisaalta teoreettinen pohjautuu aina annettuihin arvoihin, jolla ohjelma laskee. Mitattu teho- ja vääntömomenttikuvaaja voi sisältää poikkeamia absoluuttisista arvoista.



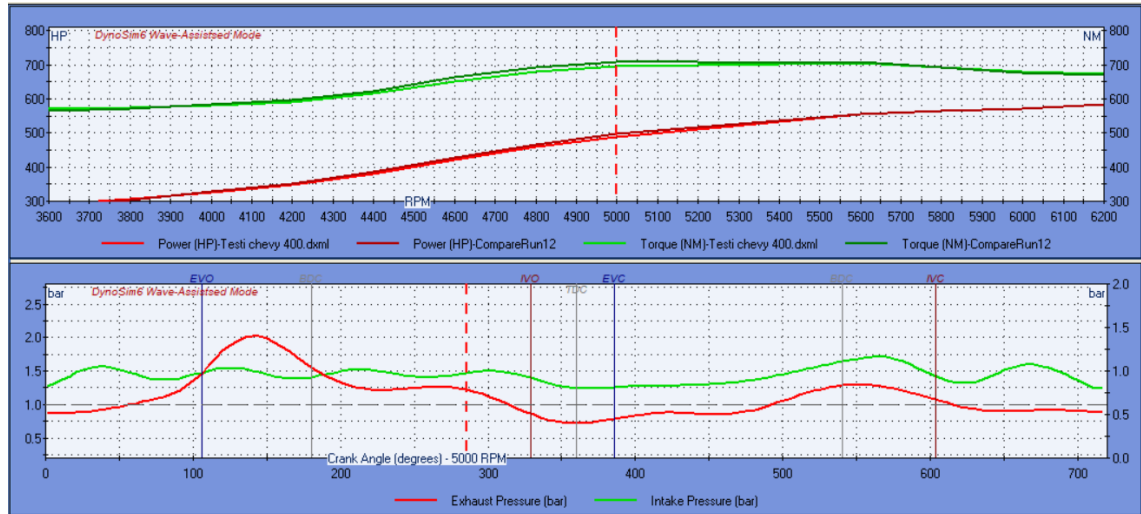
Kuva 5. Vääntömomentti ja teho

5.2 Muutokset mallinnuksessa

Moottorin mallintamisen avulla selvitettiin muutamia eri vaihtoehtoja tulevista vaihtoehtoista.

Duraation muutos

Duraation osalta päätettiin avata imuventtiiliä 5° aikaisemmin ja selvittää sen aiheuttamat muutokset. Kuvasta 6. nähdään miten duraation lisääminen parantaa suorituskykyä hieman, mutta vain keskimmaisella kierrosalueella, on myös maksimivääntömomentti. Maksimivääntömomentti kasvaa aikaisemmalla imuventtiilin ajoituksella. Voidaan siis todeta, että jos pelkkää imunokan avautumista muokkaisu, ei sillä olisi suurta vaikutusta suorituskykyyn ylä- eikä alakierrosalueilla tutkimuskohteessa. Kuitenkaan missään pyörimisnopeusalueella vääntömomentti ei huonone tällä muutoksella.



Kuva 6. Imunokan duraatio kasvatettuna

Duraation muutosta toiseen suuntaan eli myöhästymällä imuventtiilin aukeamista parannettiin ainoastaan alhaisten kierrosnopeuden vääntömomenttia muutamia yksiköitä. Tämä johtuu huonommasta sylinterin täytöksestä korkeammilla kierroksilla.

Puristussuhteen muutos

Puristussuhteen muuttamisella vaikutetaan polttomoottorin suorituskykyyn. Liiallinen puristussuhteen nosto lisää moottorivaurion riskiä, mutta parantaa suorituskykyä. Puristussuhteen lasku heikentää suorituskykyä, mutta moottorivaurion riski vähenee. Käytettäessä 98 oktaanilukuista bensiiniä, liian korkean puristussuhteen kanssa haitallista nakutusta voi jo esiintyä. Oktaanilukua nostamalla voidaan kompensoida tätä tapahtuma, mutta se ei aina ole mahdollista eikä polttoainekustannusten kannalta suotuisaa.

Puristussuhteen muutokseen on olemassa erilaisia vaihtoehtoja. Pelkän kansitiivisteiden vaihtaminen vaikuttaa jo yksin puristussuhteeseen. Ohuemmalla kansitiivisteellä saavutetaan suurempi puristussuhde, kun kasvattamalla tiivisteiden paksuutta lasketaan puristussuhdetta. Palotilan tilavuuden kasvattaminen laskee puristussuhdetta. Vastaavasti palotilan tilavuuden

pienentäminen nostaa puristussuhdetta. Puristustilavuuden muuttamisella on suora vaikutus puristussuhteeseen. Puristustilavuuden muokkaamiseen voidaan vaikuttaa palotilan tilavuudella, kannen tiivisteiden paksuudella ja männän laen tilavuudella.

Näitä muutoksia on mahdollista havainnoida simulointiohjelman avulla. Muutoksia on mahdollista muokata Compression Ratio Calculator-välilehdeltä. Välilehden muutoskohdat ja selitykset ovat nähtävillä numeroituna Kuvassa 6. Välilehdelle muokkaamalla nähdään automaattisesti, miten puristussuhde muuttuu, jos pyydettyjä arvoja muokataan. Tutkimuskohteen puristussuhteeksi ohjelma on laskenut annetuilla tiedoilla 11.38:1. Tätä arvoa on käytetty vertailuna esitettyihin muutoksiin.

Compression Ratio Calculator

Current Engine Specs

Bore: 104.78 mm	Cylinder Vol: 821.24 cc	Total Vol: 6569.92 cc
Stroke: 95.25 mm	Combustion Vol: 79.15 cc	Compression Ratio: 11.38

Apply

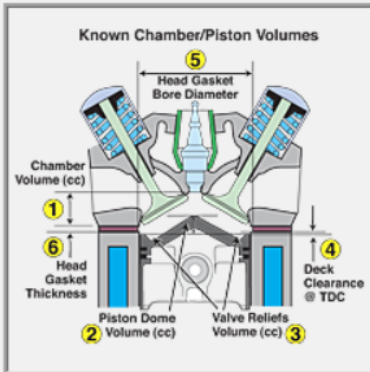
Cancel

Compression Ratio Volumes

Select Method of Compression Ratio Calculation:

Piston Dome/Deck/Relief Specs Known

Measure Piston Dome/Reliefs With Burette



① Head Chamber Volume: 65.00 cc

② Dome Volume: 5.00 cc

③ Valve Relief (Dish) Volume: 10.00 cc

④ Deck Clearance @ TDC: 0.000 mm

Calculated Deck Volume @ TDC: 5.00 cc

⑤ Head Gasket Bore: 105.79 mm

Head Gasket Thickness: 1.041 mm

Head Gasket Volume: 9.15 cc

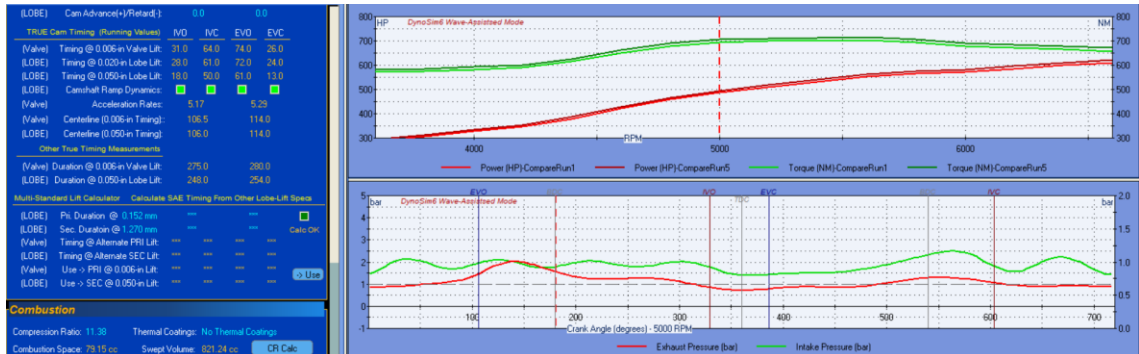
Calculated New Compression Ratio

Swept Cylinder Vol: 821.24 cc	Total Combustion Vol: 79.15 cc	Compression Ratio: 11.38
-------------------------------	--------------------------------	--------------------------

Kuva 7. Compression Ratio Calculator

Kuvassa 8. on esitelty miten pelkän puristussuhteen nosto tutkimuskohteessa vaikuttaa suorituskykyyn. Vertailuna käytettiin puristussuhdetta 12.00:1 suhteessa nykyiseen. Kuvasta nähtävissä on kaksi päällekkäistä viivaa, joista

ylempänä olevat kuvaavat vääntömomenttia. Pelkän puristussuhteen nosto 0.62 yksikköä korkeammalle ei tuo suurta tehonlisäystä.

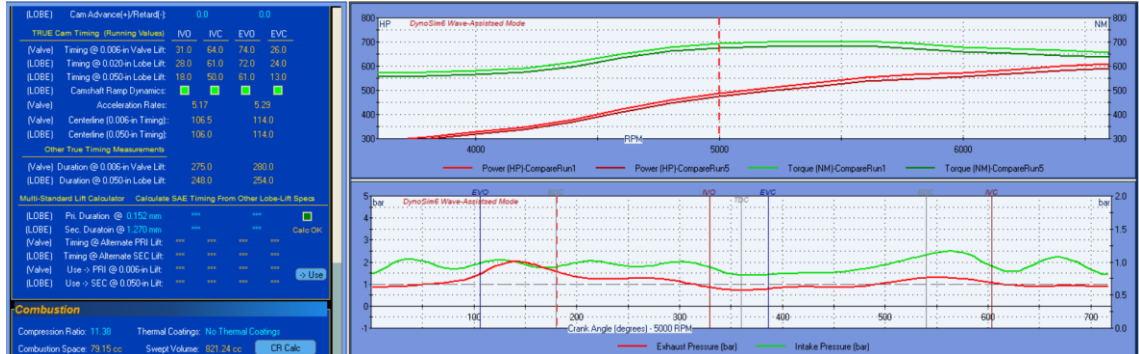


Kuva 8. Korotettu puristussuhde

Kuvassa 9. on esitelty miten puristussuhteen lasku vaikuttaa suorituskyykyyn.

Vertailuna käytettiin puristussuhdetta 10.50:1 suhteessa nykyiseen.

Puristussuhteen lasku 0.88 yksikköä näkyy selvemmin kuvaajissa alentuneena suorituskyykyinä. Muutos nähtävissä selvästi kaikilla pyörintänopeuksilla.



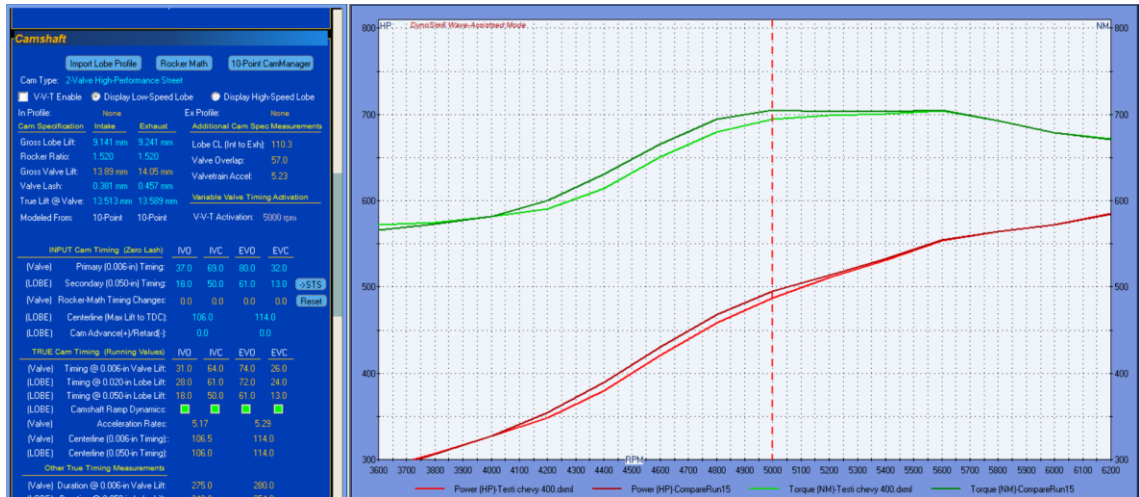
Kuva 9. Alhaisempi puristussuhde

Nokka-akselin ajoituksen muutos

Nokka-akselin ajoituksen muuttaminen tehdään suhteessa kampaakselin asteisiin. Muutokset asteina eivät ole suuria, mutta sen aiheuttama vaikutus on nähtävissä vääntömomentti- ja tehokuvaajassa. Kuvasta 10. on nähtävillä, miten 2° ennako nokka-akselilla vaikuttaa vääntömomenttiin positiivisesti.

Vääntömomentti kasvasi moottorin pyörimisnopeusalueella 4100-5000 1/min, mutta yleisellä kierrosalueella muutos ei olisi merkittävä.

Muutokset ovat tehty samalla sytytysennakolla, jota tutkimuskohteesta on ilmoitettu. Sytytysennakko tulee määrittää uudelleen ajoituksen muuttamisen jälkeen optimaalisen palotapahtuman vuoksi.



Kuva 10. Nokka-akselin ajoituksen aikaistus 2°

Nokka-akselin maksiminosto

Nokka-akselin nostoa muokkaamalla on vaikutus sen geometriaan.

Simulointiohjelman avulla on todettavissa sama ilmiö. Liian jyrkkä nousu tai lasku saa aikaan liian suuren kiihtyvyyden seuraajalle, jonka johdannaisena voi olla venttiilien leijuminen. Simulointiohjelman avulla on mahdollista todentaa, missä arviolta voisi kulkea kunkin nokka-akselin maksiminosto. Maksiminoston rajoituksia on toki olemassa muitakin kuin sen geometria. Monesti nähdään valmistajien ilmoittavan maksimin venttiilinnoston tuotetiedoissa. Tämä voi perustua venttiilijousien ominaisuuksiin. Venttiilijousi ei saa olla puristuneena kasaan missään kohdassa, joten siksi aina venttiilijouset tulee valita nokka-akselin maksiminoston mukaisesti. Toinen asia tarkastettavana venttiilikoneistosta nokan ollessa maksiminostossa on venttiilinjousilautasen ja venttiiliohjaimen välinen välys. Näiden osien välille on jäätävä välystä, jotta vältytään vaurioilta.

Suuremmalla nostolla saavutetaan suurempi virtaus sylinteriin imu- ja pakopuolella. Kuitenkaan aina liiallinen nosto ei ole suorituskykyä parantava tekijä. Suuremman määrää polttoainetta ja ilmaa sylintereihin virratessa tulisi sen myös poistua vapaasti. Moottorin hyötysuhde putoaa, jos sylinteriin jää palamatonta polttoainetta. Myös venttiilin virtauspinta-ala voi rajoittaa maksiminostoa.

Suorituskyvyn kannalta optimaalinen venttiilin nosto tutkimuskohteessa tuli samoilla duraatioilla vastaan noin 11 mm nokan maksiminoston kohdalla nykyisellä keinuvipusuhteella. Suorituskyky ei teoreettisesti noussut nykyisellä keinuvipusuhteella enempää nykyisestä. Tiedossa myös on tutkimuskohteen fyysiset rajoittavat tekijät, jotka estävät suuremman venttiilinnoston. Venttiilikoneiston valmistaja on ilmoittanut suurimman venttiilinnoston 0.710" eli 18,03 mm kohdalle heidän komponenteilla.

5.3 Yhteenveto

Mallinnuksesta saatujen havaintojen perusteella simulointiin muutamia eri variaatioita tutkimuskohteen suorituskyvyn parantamiseksi. Suorituskyvyn kannalta parhaaksi vaihtoehdoksi päädyttiin puristussuhteen nostamiseen nykyisestä hieman ylöspäin, kuitenkin alle 12.00:1. Tämä päätös perustuu tutkimuskohteen ajatuksena käyttää vielä 98 oktaanilukuista bensiiniä, eikä siirtyä korkeampi oktaanisiin polttoaineisiin. Puristussuhdetta voitaisiin nostaa vielä enemmän, mutta tässä tilanteessa olisi todennäköisesti syytä siirtyä käyttämään esimerkiksi etanolipohjaista polttoainetta. Tämän jälkeen tulisi suuria muutoksia ainankin polttoainejärjestelmään.

Nokka-akselin osalta nykyinen voisi olla vielä käytössä, mutta korkeammalla nostolla ja laajemmalla imuventtiilin duraatiolla oleva akseli olisi kokeilemisen arvoinen vaihtoehto. Nykyistä nokka-akselia käytettäessä olisi simulaatioon perustuen hyvä aikaistaa 2° perustuen saatuihin tuloksiin työn aikana. Tässä yhteydessä tulisi tutkimuskohteesta tarkastaa alkuun männän ja venttiililautasen

välinen välys. Jos päätyisi vaihtamaan nokka-akselin korkeammilla nostoilla, jousipaineiden tarkastus ja niiden nosto tulevat aiheelliseksi.

Tutkimuskohteen kaikkia osa-alueita ei tässä opinnäytetyössä käsitelty, jotka liittyvät työn aiheeseen. Parantamalla kaasunvaihtoa, on myös taattava imu- sekä pakosarjojen riittävä virtaus ja moottorin mekaanisten osien kestävyys.

6 Lopuksi

Moottorin optimaaliseen polttoaineseoksen saavuttamiseksi tulisi kaasutin korvata suihkutusrjestelmällä. Tällä tavalla saataisiin eri pyörimisnopeuksille ja kuormitusalueille optimaalinen määrä polttoainetta. Nykyisen polttoaineen syöttötavalla ei polttoaineenseos ole tarkka. Optimaalinen seossuhde auttaa myös polttoainetaloudellisuudessa ja moottorin hyötysuhteen parantamisessa.

Moottorin imu- sekä pakosarjat tulisi muokata käyttötarkoituksen mukaisesti. Niiden virtausmittaaminen olisi välttämätöntä optimaalisemman lopputuloksen kannalta.

Sytytysennakon säätäminen moottoridynamometrillä tapahtui vain tietyllä kierrosalueella, joka on säädetty moottorin tehonmittauksen yhteydessä. Tämän säätö näkyy selvästi vääntömomenttikäyrässä. Tehon kannalta optimaalisen sytytysennakon säätö olisi mahdollista, mutta vaatisi moottorinohjauksen päivityksen.

Jotta kyseisen moottorin kaasunvaihdosta parannettaisiin, yhden osa-alueen parantaminen ei välttämättä paranna toista. Moottorin kaasunvaihdon parannusta tulisi miettiä isommassa kuvassa, eikä keskittyä vain yhden osa-alueen muutoksiin. Puristussuhteen ja nokka-akselin profiilin muokkaamisella saadaan aikaan varmasti lisää suorituskykyä moottoriin, mutta mahdollisesti heikennetään sen muita toivottuja ominaisuuksia, kuten alipaineen muodostamista jarrujärjestelmää varten. Nykyistä kokonaisuutta tulisi parantaa kaikilta osa-alueilta, jotta suorituskyky paranisi merkittävästi, pelkän nokka-akselin vaihtaminen ei välttämättä toisi haluttuja muutoksia. Reilumpi nosto puristussuhteissa johtaisi käyttämään korkea oktaanisia bensiinejä nakutuksen varalta ja toisaalta moottorista tulisi alttiimpi moottorivaurioille. Puristussuhdetta voitaisiin vielä nostaa lievästi, mutta haitallista detonointia voisi esiintyä, jos polttoaineen oktaanilukua ei nostettaisi tai muokattaisi palotilan muotoa.

Lähteet

AKK Motorsport: Nokka-akselin mittaus, 2014. Viitattu 24.4.

https://www.autourheilu.fi/site/assets/files/1395/nokka-akselin_mittaus_2014.pdf

Bosch, R. 2003. Autoteknillinen taskukirja 6. painos. Jyväskylä: Gummerus Oy

CompCams Viitattu 28.4. <https://www.compcams.com/xtreme-energy-248-254-solid-roller-cam-for-chevrolet-small-block.html>

Holley Viitattu 27.5. https://www.holley.com/support/intake_manifold/

Hot Rod Engine Tech, Camshaft. Viitattu 26.5.

<https://hotrodenginetechnology.com/camshaft-basics/>

Hot Rod Engine Tech, Dynamic Compression. Viitattu 26.5.

<https://hotrodenginetechnology.com/dynamic-compression-stroke-length/>

Mauno, E. 1994. Virittäjän käsikirja 1: Nelitahtimoottorit. 3. painos. Helsinki: Alfamer Oy

Szabo, J. 2019. Misunderstood Causes of Detonation in High Performance Applications. Enginelabs <https://www.enginelabs.com/engine-tech/misunderstood-causes-of-detonation-in-high-performance-application>

Summit, Duration. Viitattu 9.5.

<https://help.summitracing.com/knowledgebase/article/SR-04700/en-us>

Summit, Ovelap Viitattu 4.4.

<https://help.summitracing.com/knowledgebase/article/SR-04703/en-us>

Smith, P. & Morrison, J. 1972 Scientific desing of exhaust and intake systems. 3.painos

