

Karri Jääskeläinen

HARRASTEAJONEUVON VOIMALINJAN PÄIVITYS

HARRASTEAJONEUVON VOIMALINJAN PÄIVITYS

Karri Jääskeläinen
Opinnäytetyö
Kevät 2021
Konetekniikan tutkinto-ohjelma
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Konetekniikan tutkinto-ohjelman, auto- ja kuljetustekniikka

Tekijä: Karri Jääskeläinen

Opinnäytetyön nimi: Harrasteajoneuvon voimalinjan päivitys

Työn ohjaaja: lehtori Annukka Tyni

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: kevät 2021

Sivumäärä: 51 + 3 liitettä

Opinnäytetyössä tavoitteena oli suunnitella harrasteajoneuvon voimalinjan päivitys. Ajoneuvo oli Nissan Skyline R34 GT-T. Voimalinjassa on monta osa-aluetta: moottori, kytkin, vaihteisto, kardaaniksi, taseuspyörästö, vetoakselit sekä pyörän ripustus että itse rengas, jonka välityksellä voima välittyy tiehen. Opinnäytetyö rajattiin keskittymään ajoneuvon RB25DET NEO -moottorin suorituskyvyn parantamiseen. Taustana opinnäytetyölle oli halu parantaa moottorin suorituskykyä vakiosta ja samalla parantaa ajoneuvon suorituskykyä moottoriradalla. Opinnäytetyön tavoite oli parantaa moottorin teho- ja vääntöominaisuuksia suunnitteleamalla vakio moottori uudelleen markkinoilta saatavilla osilla. Opinnäytetyössä käytettiin vakio moottoria suunnittelun lähtökohtana.

Opinnäytetyön tavoite oli parantaa harrasteajoneuvon kierrosaikaa moottoriradalla parantamalla moottorin suorituskykyä. Kierrosajan parannusta ei pystytty toteamaan tämän opinnäytetyön puitteissa, koska opinnäytetyön aikana ei ollut rahallista mahdollisuutta rakentaa valmista moottoria. Opinnäytetyössä tehtiin valmis suunnitelma moottorin uudelleen rakentamiseksi markkinoilta saatavilla osilla, joilla moottorin suorituskyky paranee. Suunnittelun lähtökohtana oli moottorille asetettu suorituskykytavoite: 500 kW, 680 hp, ja 600 Nm vääntöä. Suunnitellun moottorin suorituskykyä ja osien toimivuutta ei päästy testaamaan, koska moottoria ei budjetin puitteissa rakennettu.

Suunnittelun tavoite oli luoda dokumentti, josta löytyvät tilattavat osat moottorin päivityksen tekemiseen. Tätä varten selvitettiin useilta eri valmistajilta osien saatavuus ja soveltuvuus RB25DET NEO -moottoriin. Tilauslista muodostettiin osien vertailun perusteella ja listan osat on valittu markkinoilta saatavista osista suunnittelun aikana.

Asiasanat: ajoneuvo, polttomoottori, päivitys

ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences
Degree Programme in Mechanical Engineering, Option of Vehicle and Transportation Engineering

Author: Karri Jääskeläinen
Title of thesis: Recreational vehicle powertrain upgrade
Supervisor: Annukka Tyni
Term and year when the thesis was submitted: Spring 2021
Number of pages: 51 + 3 appendices

The purpose of the thesis was to design a power line upgrade for a recreational vehicle. The vehicle was a Nissan Skyline R34 GT-T. The project focused on improving the performance of the vehicle's RB25DET NEO engine. The background to the project was the desire to improve the performance of the engine from standard and at the same time improve the performance of the vehicle on the racetrack. The aim of the project was to improve the power and torque characteristics of the engine by redesigning the standard engine with parts available on the market. The project used the standard engine as the starting point for the design.

The aim of the project was to improve the lap time of a recreational vehicle on a motor track by improving the performance of the engine. The project produced a complete plan to rebuild the engine with commercially available parts to improve engine performance. The design was based on a performance target for the engine: 500 kW, 680 hp, and 600 Nm of torque. It was not possible to test the performance of the planned engine because it was not built within the budget.

The objective of the design was to create a document containing the parts to be ordered to upgrade the engine. An order list was generated and the parts on the list were selected from parts available on the market during the design process.

Keywords: vehicle, combustion engine, upgrade

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	6
2	MÄNTÄMOOTTORINEN POLTTOMOOTTORI.....	7
2.1	Sylinterintäytös.....	10
2.2	Ahtaminen	12
2.2.1	Mekaaninen ahdin.....	12
2.2.2	Pakokaasuahdin	12
2.3	Polttoaine ja sen ominaisuudet.....	16
2.4	Sytytys.....	19
2.5	Moottorinmassat ja massatasapaino	19
2.6	Puristussuhde.....	20
3	RB25DET NEO -MOOTTORI	22
3.1	Moottorin perustiedot.....	22
3.2	Kaasunvaihtojärjestelmä	25
3.3	Seoksenmuodostus.....	26
4	OSIEN VALINTA.....	28
4.1	Moottorilohkoon liittyvät osat	28
4.2	Sylinterikanteen liittyvät osat	32
4.3	Pakojärjestelmään liittyvät osat	34
4.4	Imujärjestelmään liittyvät osat	36
4.5	Moottorinohjaus ja sytytysjärjestelmään liittyvät osat	40
4.6	Jäähdytykseen liittyvät osat.....	41
4.7	Anturit.....	42
5	YHTEENVETO VOIMALINJAN PÄIVITYKSESTÄ.....	43
6	POHDINTA	45
	LÄHTEET.....	46
	LIITTEET	53
	Liite 1 Bensinin teoreettinen ilmantarve	
	Liite 2 Etanolin teoreettinen ilmantarve	
	Liite 3 Moottorin massatasapainotuksen tarve	

1 JOHDANTO

Opinnäytetyössä suunnitellaan harrasteajoneuvon voimalinjan päivitystä. Ajoneuvo on Nissan Skyline R34 GT-T. Taustana opinnäytetyölle on halu parantaa auton suorituskykyä vakioista, koska auto on tällä hetkellä vakio eli tehdaskuntoinen. Voimalinjassa on monta osa-aluetta: moottori, kytkin, vaihteisto, kardaani, tasauspyörästö, vetoakselit sekä pyörän ripustus että itse rengas, jonka välityksellä voima välittyy tiehen. Opinnäytetyön rajauksena on, että keskitytään yhteen osa-alueeseen, ja se on moottorin suorituskyvyn parantamiseen. Opinnäytetyössä pyritään parantamaan moottorin teho- ja vääntöominaisuuksia suunnittelemalla vakio moottori uudelleen markkinoilta saatavilla osilla. Opinnäytetyössä käytetään vakio moottoria suunnittelun lähtökohtana ja käytetään vakio moottorin pääosia eli sylinterilohkoa, sylinterikannta ja kampiakselia.

Opinnäytetyön tavoite on parantaa harrasteajoneuvon kierrosaikaa moottoriradalla. Tässä opinnäytetyössä keskitytään moottorin suorituskyvyn parantamiseen, joten tämän opinnäytetyön pää-tavoite on tehdä valmis suunnitelma moottorin uudelleen rakentamiseksi osilla, joilla moottorin suorituskyky paranee. Moottorin suorituskyvyn paraneminen parantaa myös auton suorituskykyä rata-kierroksella. Opinnäytetyön aikana ei ole rahallista mahdollisuutta rakentaa valmista moottoria. Moottorin suorituskyky tavoite on 500 kilowattia, noin 700 hevosvoimaa ja 600 newtonmetria vääntöä. Tehtaan ilmoittama vakiosuorituskyky moottorille on 204 kilowattia, 280 hevosvoimaa ja 362 newtonmetria vääntöä. Tavoite on luoda dokumentti, josta löytyvät tilattavat osat moottorin päivitykseen.

Opinnäytetyön oppimistavoite on, että opinnäytetyön tekijä ymmärtää lisää polttomoottorin mekaniikasta ja siihen liittyvästä suunnittelusta. Lisäksi tavoitteena on ymmärtää taloudelliset näkökulmat moottorin suunnittelussa sekä ymmärtää jälkimarkkinaosien valmistajien omien standardien arviointi ja vertailu keskenään.

2 MÄNTÄMOOTTORINEN POLTTOMOOTTORI

Tässä työssä tarkastellaan mäntämoottorisen polttomoottorin toimintaa. Mäntämoottoreilla on erilaisia rakenneratkaisuja: yksisylinterinen, rivimoottori, v-moottori, w-moottori, boxer-moottori, tähti-moottori ja wankel-moottori (1, s. 19). Tässä työssä keskitytään rivimoottoriin, koska muokattava moottori on rivimoottori. Polttomoottorin peruseriaate on sylinterilohko, jossa on laakeroitu kampiakseli, joka pyörii, ja sylinterit, joissa männät liikkuvat edestakaisin. Polttomoottorin tarkoitus on muuttaa polttoaineen sisältämä kemiallinen energia liike-energiaksi. Tämä saadaan aikaiseksi, kun polttoaineen ja ilman seos palaa sylinterin palotilassa luoden palotilaan painetta, jolla liikutetaan mäntää. Mäntä on yhdistetty kiertokangella kampiakseliin. Männän ja kiertokangen edestakainen liike saa kampiakselin pyörimään ja tekemään työtä. (1, s. 82.)

Toistaiseksi polttomoottori on ollut paras voimanlähde ajoneuvoihin, koska polttomoottorin tarvitsee kuljettaa vain polttoaine mukana, sillä palamisen toinen osa, happi, saadaan ilmasta. Polttoaineella on suuri energiatiheys verrattuna akkuihin. Lisäksi moottorit ovat kompaktin kokoisia. (1, s. 11.)

Moottorin toimintaan vaikuttaa valittu polttoaine, bensiini vai diesel. Bensiini eli ottomoottorissa polttoaine sytytetään ulkopuolisella kipinällä, kun taas dieselmoottorissa polttoaine on itsestään syttyvä paineen alaisuudessa. (1, s. 25.) Tässä työssä tarkastellaan ottomoottoria eli bensiinimoottoria.

Rivimoottorit ovat yleisimpiä mäntämoottoreita. Moottorista löytyy sylintereitä kahdesta kuuteentoista. Moottorissa on aina sylinterilohko ja erillinen sylinterikansi. Ajoneuvo käytössä neljän sylinterin rivimoottori on yleisin, mutta nykyään kolmisylinterisetrivimoottorit ovat yleistyneet. Henkilöautoissa yleensä rivimoottorin enimmäissylinteri määrä on kuusi, koska tämän kokoinen moottori on vielä helppo mahduttaa henkilöautoihin. (1, s. 20.)

Polttomoottorissa on kaksi erilaista kaasunvaihtomenetelmää: kaksitahti- ja nelitahtimoottori. Kaksitahtimoottorilla työkierron pituus on yksi moottorin kierros. Kaksitahdissa on kaksi vaihetta: paisuntavaihe ja puristusvaihe. Kaasunvaihto tapahtuu paisuntavaiheen lopussa ja puristusvaiheen alussa. (1, s. 78.) Nelitahtimoottorissa on nimensä mukaisesti neljä tahtia: imutahti, puristustahti, työtahti ja poistotahti. Nelitahtimoottorissa yksi työkierto kestää kaksi moottorin kierrosta. (1, s. 82.) Imutahdin aikana mäntä liikkuu yläkuolokohdasta alaspäin, jolloin imuventtiili aukeaa ja sylinteriin imetään tai ahdetaan palamiseen tarvittava ilmamäärä. Polttoaine annostellaan imutahdin aikana.

(1, s. 83.) Imutahdin jälkeen tulee puristustahti, jolloin mäntä liikkuu alakuolokohdasta takaisin yläkuolokohtaan. Tällöin imuventtiili sulkeutuu ja mäntä puristaa ilma-polttoaineseosta. (1, s. 84.) Ennen kuin puristustahti tulee loppuun, paineistettu ilma-polttoaineseos sytytetään suurienergisellä kipinällä ennen yläkuolokohtaa. Palamisen alkaessa palotilan paine ja lämpötila kasvavat voimakkaasti. Oikea-aikaisella sytytyksellä painehuippu saadaan hieman yläkuolokohdan jälkeen. Työkampiakselilla tehdään männän päällä olevan paineen vaikutuksesta. Työtahdi kestää siihen saakka, kunnes mäntä saavuttaa alakuolokohdan. (1, s. 85.) Työtahdin jälkeen alkaa poistotahti ja pakuventtiili aukeaa. Alakuolokohdan jälkeen mäntä lähtee kohti yläkuolokohtaa. Samalla mäntä työntää pakokaasut ulos sylinteristä pakuventtiilin kautta. Poistotahdin jälkeen työkierto alkaa alusta eli yläkuolokohdan jälkeen alkaa imutahti. (1, s. 86.)

Kaasunvaihtojärjestelmään tarvittavia imu- ja pakuventtiilejä käytetään nokka-akselin ja nokan seuraajamekanismien välityksellä. Nokka-akseli voi olla sijoitettu sylinterilohkoon tai sylinterikanteen. Nokka-akseleita voi olla myös useampi, jolloin nokka-akselit sijaitsevat sylinterikannessa. Nokka-akselin seuraajaeliminä käytetään työntötankoja, laahain- tai heiluriohjausta, keinuviipu- ja nostinohjausta. Seuraajaelimet käyttävät venttiileitä ja venttiilit on sijoitettu sylinteri kanteen. (1, s. 155; 2, s. 71.)

Nykyaikaisilla venttiilin ohjausjärjestelmillä voidaan muuttaa venttiilien ajoitusta tai muuttaa venttiilien nostoa. Muuttuva venttiilinen ajoitus rakennetaan yleensä siten, että nokka-akselin käyttöratat yhteyteen rakennetaan säätösystemi, jolla nokka-akselin asentoa voidaan muuttaa suhteessa kampiakselin asentoon. Tällä systeemillä saavutetaan optimaalinen täytös ja moottorin toiminta laajalla kierrosnopeusalueella. (1, s. 158.) Venttiilien muuttuva nosto voidaan toteuttaa muutamalla eri tavalla. Venttiilien muuttuva nosto voidaan toteuttaa valvetronic-menetelmällä tai nokka-akselissa voi olla kaksi eri venttiilien nostoprofiilia. Venttiileitä aukaistaan vain sen verran kuin polttomoottorissa halutaan ilmaa imutahdin aikana moottoriin. (1, s. 160.)

Nokka-akseleita käytetään hammaspyörä-hammasketjumekanismeilla. Nokka-akseleita käytetään myös hammaspyörä-hammasihnamekanismeilla. Ketjujen ja hammaspyörien materiaaleina käytetään terästä ja keinomateriaaleja. Ketjukäyttö hyvin toteutettuna on huoltovapaa ratkaisu. Uudet ketjut ovat erittäin hiljaisia ja lujia, jolloin voidaan käyttää yksirivistä ketjua. (2, s. 73; 1, s. 161–162.)

Nokka-akseleita voidaan käyttää myös hammasrattailla, minkä myötä koneisto on erittäin luotettava ja kestävä rakenne. Hammasrataskäytön haittoina ovat kallis toteutus sekä osien välille vaaditaan tarkat sovitukset. Lisäksi sylinterikannen asennus on haasteellista, jotta hammasvälykset saadaan oikeiksi. (1, s. 163.)

Moottorin toimintaa voidaan muokata nokka-akselien profiililla. Nokka-akselin profiililla voidaan vaikuttaa venttiilien nostoon, avautumisnopeuteen ja aukioloaikaan. Nokka-akselien profiilit ja ajoitus ovat aina moottorikohtaiset. Samat muutokset nokka-akseleissa eivät toimi samalla tavalla kaikissa moottoreissa. Nokka-akselien suunnittelussa tulee huomioida, että venttiilien nopeus ja kiihtyvyys tulee olla riittävän alhaiset, jotta venttiilit pysyvät nokka-akselin mukana. (1, s. 164, 167, 168.)

Polttomoottori tarvitsee voitelujärjestelmän toimiakseen, jotta metalliset osat eivät hankaudu toisiansa vasten ja hitsaudu kiinni toisiinsa. Nelitahtimoottoreissa voideltavina kohteina ovat suuri määrä liukulaakereita, sylinterit ja männät, nokka-akselit ja nokka-akselien nokat sekä muut moottorissa liikkuvat osat. Tällöin järjestelmä vaatii öljypumpun, jotta kaikkiin tarvittaviin paikkoihin saataisiin öljyä voitelemaan. Öljyn perusvaatimuksena on taata hyvä voitelevuus vaihtelevissa olosuhteissa. (1, s. 170.)

Öljyn varastointiin on olemassa kaksi ratkaisua: märkäsumppu tai kuivasumppu. Märkäsumppussa öljyvarastona toimii öljypohja, josta öljypumppu imee öljyn kiertoon. Kuivasumppussa on erillinen öljysäiliö, jonne öljy pumpataan öljypohjasta. Kuivasumpun öljysäiliöstä öljy imetään takaisin kiertoon. Kuivasumppua käytetään ajoneuvoissa, joissa halutaan varmistaa, että kallisteluista tai muista auton liikkeistä huolimatta öljypumppu ei voi missään tilanteessa imaista ilmaa järjestelmään ja öljynkierto. (1, s. 171.)

Polttomoottori tuottaa palamisen takia lämpöä, joten moottoria tulee jäähdyttää. Moottorin jäähdytys on tärkeä osa nykyaikaisen polttomoottorin toiminnan kannalta. Nestejäähdytys on yleisin moottorien jäähdytysmenetelmä. Nestekierto on suunniteltu tietokoneella ja simulaatio-ohjelmien avulla, jolloin on voitu tarkastella, että jokaisella osalla on tarpeellinen jäähdytys. Nestejäähdytyksessä yleinen väliaine on vesi-glykoliseos. Pelkkä vesi välittäjäaineena aiheuttaisi moottorin sisäistä korroosiota. Glykoliseos suojaa korroosiolta sekä estää veden jäätymisen pakkasella. Nykyisissä autoissa moottorin lämpötilan hallinta hoidetaan sähköisillä termostaateilla, sähköisellä vesipumpulla ja sähköisillä tuulettimilla. Sähköisiä osia voidaan ohjata tarkemmin ja saadaan aikaan haluttuja

ominaisuuksia sekä parannetaan mekaanista hyötysuhdetta, kun tarvittavaa käyttövoimaa ei oteta kampaiksi. (1, s. 174, 176, 177, 178.)

Polttomoottori tarvitsee erilaisia apulaitteita toimiakseen. Osa apulaitteista on välttämättömiä. Imusarja ja imuilmahajaus ovat tarvittavat järjestelmät, jotta ilma saadaan sylinteriin. Kun moottori tuottaa pakokaasuja, tulee kaasut poistaa pakosarjan ja pakoputkiston avulla. Polttomoottori tuottaa lämpöä ja ylimääräisestä lämmöstä tulee päästä eroon. Tästä syystä tarvitaan jäähdytysjärjestelmä ja vesipumppu kierrättämään nestettä moottorissa. Moottorissa käytetään sähköisiä osia, jolloin pelkkä akku ei riitä ylläpitämään kaikkia toimintoja. Tällöin moottori tarvitsee generaattorin. Generaattorilla ylläpidetään sähköjärjestelmää toiminnassa. (1, s. 179.)

2.1 Sylinterintäytös

Sylinteritäytökseen tarvitaan kaksi asiaa: ilma ja polttoaine. Sylinteriin pyritään saamaan optimaalinen ilman ja polttoaineen seos, jotta palaminen olisi mahdollisimman hallittua ja palotapahtuman hyötysuhde olisi mahdollisimman hyvä. Sylinteriin saadaan ilmaa kahdella tapaa: vapaasti hengittävänä tai ahdettuna. Vapaasti hengittävässä moottorissa imuilma imetään sylinteriin pienellä alipaineella, jonka männän liike synnyttää. Vapaasti hengittävän moottorin sylinteritäytöstä voidaan auttaa imusarjan resonanssitajuuksilla. Imusarjan pituudella voidaan vaikuttaa resonanssitajuteen, jolloin ilma on venttiilin päällä menossa sylinterin suuntaan. Haettaessa hyvää sylinteritäytöstä matalalla kierrosalueella valitaan pääsääntöisesti pitkillä kanavilla varustettu imusarja. Yläkierrosalueella hyvä hengittävyys saavutetaan yleensä lyhyellä imusarjalla, jossa virtausvastukset ovat pienet. (1, s. 137.)

Lisäksi ilma voidaan ahtaa sylinteriin eli puskea ylipaineella ilmaa sylinteriin. Moottorin ahtaminen lisää sylinteritäytöstä. Ahtopaineella vaikutetaan, kuinka paljon ilmaa pusketaan sylinteriin. Suurimpana erona ahtamisessa verrattuna vapaasti hengittävään moottoriin on, että ahtopaineella tapahtuvan huuhtelun johdosta huuhtelu on tehokasta ja koko sylinteritilavuus hyödynnetään. (1, s. 144; 2, s. 76.)

Ilman lisäksi tarvitaan polttoainetta palotapahtumaan. Ilma-polttoaineseos voidaan muodostaa ulkoisesti ennen sylinteriä. Tällöin ilma-polttoaineseos on homogeeninen. Tällaisia menetelmiä ovat imusarjaruiskutus ja kaasutin. Kaasutin on mekaaninen toimilaite, joka sekoittaa polttoaineen ja

ilman. Kaasutinta ei ohjata moottorinohjaimella. Kaasuttimella on huono säädettävyys, joten se nostaa päästöarvoja. Imusarjaruiskutuksessa polttoaine ruiskutetaan ruiskutussuuttimilla imusarjaan ja ruiskutustapahtumaa ohjataan moottorinohjaimella. Imusarjaruiskutuksessa polttoaine ehtii sekoittua ilman kanssa ennen kuin seos menee sylinteriin. (1, s. 46–49.)

Ilma-polttoaineseos voidaan muodostaa myös sisäisesti eli seos muodostetaan sylinterissä. Tätä kutsutaan suorasuihkutukseksi. Tässä menetelmässä polttoaine suihkutetaan suoraan sylinteriin. Suorasuihkutuksessa ilma-polttoaineseos ei välttämättä ehdi sekoittua ennen palamisen aloitusta ja seos jää heterogeeniseksi. Suorasuihkutuksessa polttoaineen paine nousee moninkertaiseksi verrattuna imusarjaruiskutukseen. Suorasuihkutus vaatii tarkan ohjauksen, mutta mahdollistaa tarkemman ruiskutuksen. (1, s. 46, 50; 2, s. 53.)

Moottoriin menevää ilmamassaa tulee mitata, jotta sylinteritäytös saadaan halutuksi. Moottorinohjaus tarvitsee ilmamassa tiedon, jotta se osaa annostella moottoriin oikean määrän polttoainetta. Ilmamassaa mitataan nykyään yleisesti kuumalanka-anturin avulla. Kuumalankamittarissa kuumalangan lämpötilaa pidetään vakiona, jolloin virtaavan ilman seurauksena kuumalanka jäähtyy, jolloin langan läpi kulkevaa virtaa pitää lisätä. Sähkövirran perusteella voidaan laskea mittarin läpi kulkevan ilman ilmamäärä. Lisäksi imusarjasta voidaan mitata ilman lämpötila, joka auttaa parantamaan ilmanmäärän tietoa. (1, s. 141; 2, s. 47.)

Palamisen lopputulosta eli pakokaasua tarkkaillaan, jotta sylinteritäytös olisi haluttu. Pakokaasua pakosarjasta tarkkaillaan lambda-anturilla eli jäännösilma-anturilla. Lambda-anturi kertoo, onko palotapahtuma ollut haluttu. Lambda-anturi kertoo, onko mitattuun ilmamäärään ruiskutettu oikea määrä polttoainetta. Lambda-anturilla säädetään ilma-polttoaineseosta sylinterissä. Tavallinen lambda-anturi toimii hyvin kapealla lambda-alueella, lähellä lambda arvoa yksi. Haluttaessa moottorille suurempi lambda säätöalue, tulisi käyttää laajakaistalambda-anturia, jolla on suurempi lambda mittausalue. Laajakaistalambda-anturi on rakenteeltaan monimutkaisempi kuin normaali lambda-anturi. (1, s. 41; 2, s. 49.)

2.2 Ahtaminen

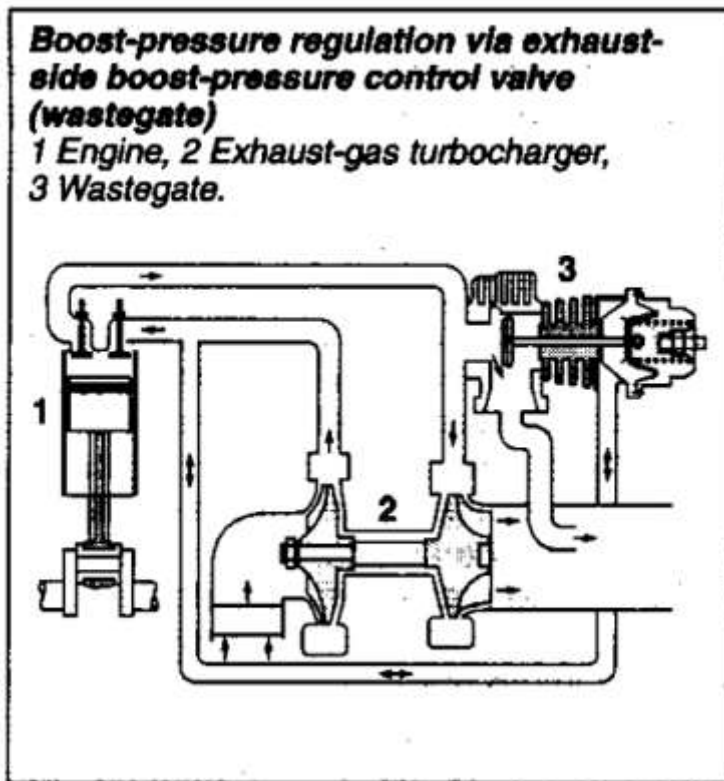
Moottorin ahtamisen tavoitteena on suurentaa sylinteritehoa ja maksimitehoa. Ahtamisen tavoitteena on myös pienentää polttoaineen ominaiskulutusta ja pakokaasupäästöjä. Ahtaminen parantaa moottorin sylinteritäyttöä. Maksimitehon kasvaessa palamisilman määrä kasvaa, jolloin sylinteriin syötettävän polttoaineen määrän pitää kasvaa. Ahdetun moottorin polttoainetalouden parantuminen on seurausta täydellisemmästä palamisesta verrattuna ahtamattomaan moottoriin. Palamisen ollessa täydellisempää moottorin lämpöhyötysuhde paranee. Mekaanisten ja suurten lämpökuormitusten takia ahdetun moottorin puristussuhteen on oltava pienempi kuin ahtamattomassa moottorissa. Tämä huonontaa moottorin lämpöhyötysuhdetta. Hyvin toteutettuna ahdetun moottorin kokonaishyötysuhde on parempi kuin ahtamattomalla moottorilla. (1, s. 144; 2, s. 76.)

2.2.1 Mekaaninen ahdin

Mekaanista ahdinta pyöritetään mekaanisesti. Mekaaninen ahdin saa käyttövoimansa yleensä moottorin kampiakselilta hihnavälityksellä. Ahtimen käytön välityssuhde on kiinteä tai säädettävä. Yleensä ahtimella on rajoitettu maksimipyörintänopeus. Ahtimen tilavuusvirta riippuu lineaarisesti moottorin kierrosluvusta. Ahdin ahtaa jo matalilta kierroksilta eikä ahtimessa ole viivettä. Mekaanisen ahtimen etu on hyvä reagointi kuormitusmuutoksiin pienin viivein. Mekaanisen ahtimen haittana on kampiakselin työn kulutus eli se kuluttaa moottorin energiaa ja tämän seurauksena polttoaineen kulutus kasvaa. (2, s. 77; 1, s. 153.)

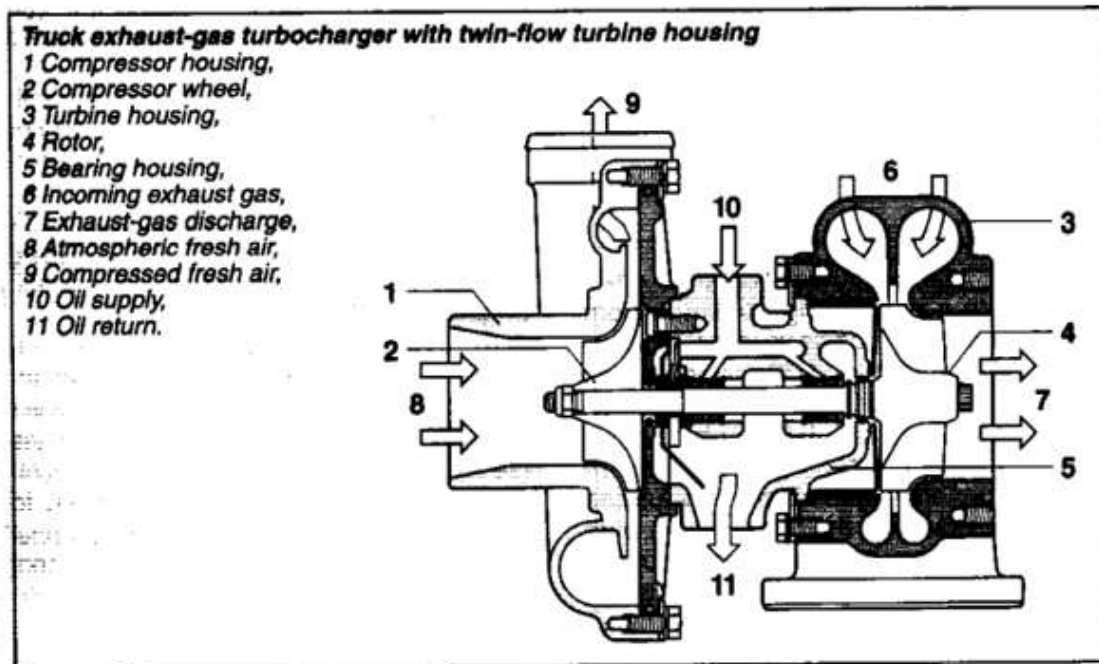
2.2.2 Pakokaasuahdin

Pakokaasuahdin eli turbo saa käyttövoimansa poistuvista pakokaasuista. Pakokaasut pyörittävät turbon turbiinia, joka on akselilla yhdistetty turbon kompressoriin. Turbiini pyörittää kompressoria. Kompressori imee ilman ilmansuodattimen läpi ja ahtaa ilmaa rajalliseen tilaan, johon ahtopaineen nousu perustuu. Turbon ahtaman ilman määrä ja ahtopaineen liiallinen nousu pitää rajata, joko hukkaportilla tai jollakin muulla systeemillä. Hukkaportti ohjaa pakokaasut pois turbiinilta. Kuvassa 1 on esitetty turbon kytkentä moottoriin. (1, s. 147; 2, s. 77.)



KUVA 1. Turboahimen kytkentä moottorin imu- ja pakojärjestelmään sekä hukkaportti (2, s. 80)

Halkaistu turbo on esitetty kuvassa 2, josta nähdään turbon sisärakenne ja kaasujen kulkeminen turbon sisällä. Ahtimen pitää olla pakopuolelta riittävän virtaava, jotta moottorin hengittävyys pysyy hyvänä ja pakokaasut virtaavat sylinteristä esteettömästi. Lisäksi hyvin virtaava turbon pakopuoli auttaa helpottamaan lämpökuormaa ja pitämään lämpötilan riittävän alhaisena. (1, s. 147; 2, s. 77.)



KUVA 2. Kuorma-auton turbon halkaisukuva (2, s. 80)

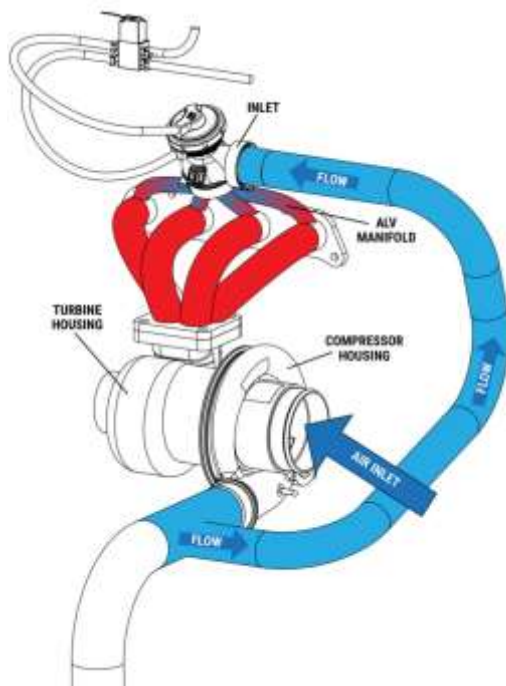
Turbon toimintaan vaikuttavat siipipyörien halkaisijat ja muodot sekä siipiesien muodot. Turbon toimintaan moottorin yhteydessä voidaan vaikuttaa myös muuttuvageometrisellä ahtimella, usealla ahtimella tai twin-scroll-toiminnolla. Muuttuvageometrisessä turbossa turbiinipuolella säädetään siipikulmia. Tämä auttaa vähentämään reagoitiongelmia pienillä pyörintänopeuksilla. Lisäksi se voi poistaa hukkaportin tarpeen. Twin-scroll-ahtimessa turbiinipuoli on kaksiosainen, jolloin turbiinissa on kaksi eri pakokaasun sisääntuloa. Toinen sisääntulo on alhaisille kierroksille ja toinen korkeille. Useammalla turbolla haetaan hyvää ahtovaikutusta erittäin laajalla pyörintänopeusalueella. Ahtimet voivat olla joko sarjaan- tai rinnankytkettynä. Tällöin pienille kierroksille riittää yksi pieni ahdin ja korkeammille kierroksille yksi iso ahdin. (1, s. 149, 150, 151, 152.)

Turbon etuja ovat moottorin tilavuustehon kasvaminen, hyvä vääntömomenttikuvaaja koko moottorin pyörimisnopeus alueella, polttoaineen ominaiskulutuksen ja pakokaasupäästöjen aleneminen sekä turbo ei vie tehoa pois kampiakselilta. Turbon haittapuolia puolestaan ovat kuluvien osien lisääntyminen, kuumakestävien materiaalien käyttö, moottorin lämpörasitusten lisääntyminen, puristussuhteen pienentäminen, turbon ja välijäähdyttimen tilan tarpeet, huono vääntömomentti moottorin alhaisilla pyörintänopeuksilla, hidas reagointi kuormitusmuutoksiin ja pitkät toimintaviiveet. (2, s. 77; 1, s. 148.)

Toimintaviivettä voidaan pienentää ahtimen sovituksella sekä pyörittää ahdinta tietyllä pyörintänopeudella eri tekniikoilla, jotta ahdin reagoisi nopeammin ja ahtoviive jäisi pieneksi. Anti-lag-systeemiä käytetään, kun kaasu on nostettu ja moottoria ei kuormiteta sillä hetkellä. Yleisiä anti-lag-tekniikoita turbon pyörittämiseksi ovat throttle bypass -systeemi, fresh air -systeemi sekä sähkömoottorin käyttäminen pyörittämään turboa.

Throttle bypass -systeemissä syötetään ilma-polttoaineseosta sylinteriin, kun kaasu on nostettu. Lisäksi käytetään jälkisytytystä, jolloin turboa pyörittämään syntyy pakokaasuja, mutta jotka eivät tuota tehoa kampiakselille. Throttle bypass -systeemissä syntyvä lämpökuorma on todella korkea ja synnyttää ylimääräistä painetta sekä jännitteitä eri moottorin osiin, mitkä eivät ole pitkällä ajalla hyväksi moottorille ja turbolle. (3; 4; 5.)

Fresh air -systeemissä turbon kompressorin ahtamaa ilmaa syötetään pakosarjaan, jolloin ahdetulla ilmalla pyöritetään ahdinta. Tätä toimintaa ohjataan omalla venttiilillä moottorinohjaksen välityksellä. Tämän systeemin etu verrattuna throttle bypass -systeemin on, ettei tämä tuota ylimääräistä lämpökuormaa. Kuvassa 3 on esitetty fresh air -systeemin toimintaa. (6; 5.)



KUVA 3. Fresh air -systeemi (6)

Viimeisin anti-lag-systeemi on sähkömoottori, joka pyörittää turboa kaasun ollessa nostettu. Tämä systeemi poistaa turbo viiveen kokonaan ja turbon pyörintää pystytään hallitsemaan hyvin tarkasti. Tämä systeemi on kehitetty Formula 1:ä varten, kun formuloissa siirryttiin turbotettuihin 1,6-litraisiin

kuusisylinterisiin v-moottoreihin. Haittoja tässä systeemissä on hinta, koska ensimmäiset kuluttajille suunnatut vaihtoehdot on julkaistu vuonna 2019. Lisäksi suuret autovalmistajat eivät ole vielä julkaisseet omia moottoreita, jotka hyödyntävät tätä teknologiaa kuluttajille suunnatuissa tuotteissa. Haittana on myös, että turbo tarvitsee toimiakseen 48 voltin sähköjärjestelmän, mikä tuo myös lisää kuluja, koska ajoneuvon sähköjärjestelmää pitää päivittää toimimaan 48 voltilla (7; 8). Etuja tällä systeemillä ovat, että turboviive pystytään poistamaan kokonaan, pystytään hallitsemaan turbon pyörintää sekä keräämään energiaa pakokaasujen pyörittäessä turboa (7; 8).

Ilma lämpenee termodynamiikan lakien mukaan turbon paineistaessa ilmaa. Lämmin ilma ei ole yhtä tiheää, jolloin se sisältää vähemmän happea kuin kylmä ilma. Ilmaa tulee jäähdyttää, jotta ilma olisi kylmempää ja tiheämpää mennessään sylinteriin. Ilmaa jäähdytetään välijäähdyttimellä. Välijäähdytin jäähdyttää ahtoilmaa sylinteritäytöksen parantamiseksi ja moottorin lämpökuorman pienentämiseksi. Henkilöautoissa on yleensä ilma-ilmatyypinen välijäähdytin, mutta voidaan käyttää myös ilma-nestetyyppistä jäähdytintä. Ilma-nestevälijäähdyttimessä jäähdyttäminen hoidetaan jäähdytinnesteen avulla. Yleensä jäähdytinneste on melko lämmintä, jolloin ahtoilman lämpötila jää jäähdytyksen jälkeenkin melko korkeaksi. Ilma-ilmatyypinen välijäähdytin on yleensä sijoitettu ajoneuvon keulalle ensimmäiseksi jäähdyttimeksi, jolloin voidaan hyödyntää ulkoilman ja ajoviiman koko hyöty jäähdytettäessä ahtoilmaa. Välijäähdyttimen tehokkuuden merkitys korostuu maksimitenhoja hyödynnettäessä. Viileämmäksi jäähdytetty ilma on tiheämpää, jolloin sylinteritäytös parane. (1, s. 139.)

2.3 Polttoaine ja sen ominaisuudet

Tässä työssä tarkastellaan bensiiniä ja etanolia, koska ne käyttäytyvät samalla tavalla. Polttoaineiden erot löytyvät kemiallisista kaavoista, lämpöarvoista, teoreettisesta palamisilman tarpeesta ja puristuskestävyydestä, mutta palaminen ja kuljettaminen on samanlaista. Etanolin ja bensiinin tiheyksissä ei ole eroa, joten kuljettaminen ja polttoaineiden painot ovat samanlaisia. Lisäksi saatavilla on muita polttoaineita kuten diesel, maakaasu ja biokaasu. Polttoaineen lämpöarvo kertoo kuinka paljon energiaa polttoaine sisältää. Polttoaineen lämpöarvo lasketaan kaavalla 1. Kaavaan lisätään polttoaineen sisältämien alkuaineiden massaosuudet. (1, s. 34.)

$$h_f = 35,17 * C + 94,21 * H + 10,47 * (S - O)$$

KAAVA 1

C = hiilen massaosuus (kg/kg)

H = vedyn massaosuus (kg/kg)

O = hapen massaosuus (kg/kg)

S = rikin massaosuus (kg/kg)

Kuvassa 4 on esitetty bensiinin lämpöarvolaskenta ja tulokseksi on saatu 43,4 MJ/kg. Kuvassa 5 on esitetty etanolin lämpöarvolaskenta ja tulokseksi on saatu 26,9 MJ/kg. Vertailtaessa bensiiniä ja etanolia toisiinsa bensiinillä on suurempi lämpöarvo, joten kilosta bensiiniä saa enemmän energiaa kuin kilosta etanolia. (1, s. 34.)

Lämpöarvo		
Bensiinin massaosuudet	$C = 86\%$	$H = 14\%$
$h_f = 35.17 \cdot C + 94.21 \cdot H + 10.47 \cdot (S - 0)$		
$h_f := 35.17 \cdot 0.86 + 94.21 \cdot 0.14 + 10.47 \cdot (0 - 0) = 43.436$		
		$\frac{MJ}{kg}$

KUVA 4. Bensiinin lämpöarvo

Lämpöarvo			
Etanolin massaosuudet	$C = 52\%$	$H = 13\%$	$O := 35\%$
$h_f = 35.17 \cdot C + 94.21 \cdot H + 10.47 \cdot (S - 0)$			
$h_f := 35.17 \cdot 0.52 + 94.21 \cdot 0.13 + 10.47 \cdot (0 - 0.35) = 26.871$			
			$\frac{MJ}{kg}$

KUVA 5. Etanolin lämpöarvo

Polttoaineen palamiseen tarvittava teoreettinen ilmantarve kertoo, kuinka paljon yksi kilogramma polttoainetta tarvitsee ilmaa palaakseen puhtaasti. Ilmakerroin määritellään lambda-arvon avulla. Teoreettinen seossuhde on lambda yksi. Tällöin polttoaine on palanut puhtaasti. Paras teho ottomoottorissa saavutetaan lambda arvolla 0,8–0,9. Tällöin polttoainetta on enemmän kuin ilmaa palotapahtumassa, ilma-alimäärä, kutsutaan tätä käymistä rikkaalla. Paras polttoainetalous saavutetaan lambda arvolla 1,2–1,3 eli polttoainetta on vähemmän kuin ilmaa palotapahtumassa, ilmaylimäärä, kutsutaan käymistä laihaalla. Liitteessä 1 on laskettu bensiinin teoreettinen ilmantarve, joka on 14,9 kilogrammaa. Jotta yksi kilogramma bensiiniä palaa puhtaasti, palaminen tarvitsee 14,9 kilogrammaa ilmaa. Liitteessä 2 on laskettu etanolin teoreettinen ilmantarve, joka on 8,9 kilogrammaa. Jotta yksi kilogramma etanolia palaa puhtaasti, palaminen tarvitsee 8,9 kilogrammaa ilmaa.

Tämä tieto vaikuttaa siihen, että samalla ilmamäärällä voidaan polttaa enemmän etanolia kuin bensiiniä. Tällä tavalla saadaan kompensoitua etanolin pienempi lämpöarvo, mutta etanolia kuluu taas enemmän kuin bensiiniä samaan ilmamäärään. Kun sylinterissä on sama ilmamäärä, ilmamäärä tarvitsee enemmän etanolia palaakseen täydellisesti. Tällöin sylinteriin pitää ruiskuttaa enemmän etanolia. Tästä syystä tarvitaan suuremmat suuttimet, jotta suuttimet pysyvät etanolitarpeen pe-
rässä. (1, s. 39; 2, s. 24.)

Alkoholien käyttö asettaa huomattavan korkeat vaatimukset materiaalien valinnalle polttoaineen siirto- ja ruiskutulaitteille muun muassa polttoaineen sisältämän veden, happojen ja liima-aineiden aiheuttaman korroosion ja syövyttävyyden suhteen. Etanolin alhaisesta lämpöarvosta seuraa puolitoistakertainen kulutus, jolloin vastaavassa suhteessa tulee suurentaa polttoaineen ruiskutusventtiilin massavirtaa ja tankin tilavuutta. (2, s. 30.)

Polttoaineen palamisessa saattaa syntyä nakutusta. Nakuttavassa palamisessa polttoaine syttyy itseksensä ja synnyttää epätasaista palamista, joka luo epätasaisia painehuippuja. Nakuttaessa palamispaineen huippu nousee liian korkealle. Tämä epätasainen palaminen ja epätasaiset painehiiput ovat haitallisia moottorille. Nakutusta seurataan nakutusanturilla. Nakutusta voidaan estää käyttämällä korkeampi oktaanista polttoainetta, rikastamalla seosta eli ilma-alimäärällä, alentamalla maksimi painetta sylinterissä, alentamalla moottorin kuormaa ja myöhäistämällä sytytystä. (1, s. 52–53; 2, s. 59–60.)

Ottomoottorin polttoaineille, eri bensalaaduille, määritetään puristuskestävyys oktaanilukuun perustuen. Polttoaineen puristuskestävyys määritetään koemoottorissa palamisen aikana nakutusmittauksilla (2, s. 35). Oktaaniluku kertoo iso-oktaanin ja n-heptaanin tilavuussuhteen lukuarvona. Oktaaniluku voi olla yli 100. Suomen polttoaineasemilla ilmoitetaan oktaaniluku RON-arvoilla. RON-research octane number on tutkimalla selvitetty oktaaniluku. RON-arvo kuvastaa polttonesteen nakutuskestävyyttä kiihdytystilanteessa. (1, s. 26.) Etanoli kestää paremmin nakutusta, koska puhtaassa alkoholikäytössä alkoholin osuus on noin 90 %. Alkoholien korkean puristuskestävyyden ansiosta niillä on parempi ja korkeampi oktaaniluku. Tämän etanolin korkeamman oktaaniluvun johdosta on mahdollista nostaa moottorin puristussuhdetta ja suurentaa moottorin kokonaishyötysuhdetta. (2, s. 31.)

2.4 Sytytys

Ottomootorin kipinän aikaansaamiseksi tarvitaan ajoneuvoon sytytysjärjestelmä. Nykyaikaiseen sytytysjärjestelmään kuuluu useita komponentteja: puolat, moottorinohjain, antureita, akku, laturi ja sytytystulpat. Elektroninen sytytys toimii paljon paremmin ja tarkemmin kuin mekaaninen sytytys. Elektronisessa sytytyksessä sytytysennakkoa voidaan säätää moottorin kuormituksen mukaan. Ilma-polttoaineseos sytytetään sytytystulpan kipinällä. Sytytystulppa saa virtansa puolalta ja puola käskyn virran kulusta moottorinohjaimelta. Nykypäivänä puolaa ohjataan moottorinohjaimella. (1, s. 56.)

Sytytystulpan tarkoitus on siirtää ilma-polttoaineseoksen sytyttämiseen tarvittava sähköenergia pailtilaan. Sytytystulpalla tulee olla riittävä lämmönjohtavuus ja oikea lämpöarvo kyseessä olevaan moottoriin. Lämpöarvon tulee olla sellainen, että tulpan käyttölämpötila on matalillakin kuormilla riittävän korkea, mutta täyskuormalla riittävän matala tulpan kestoiän kannalta. Oikealla lämpöarvolla on suuri vaikutus tulpan käyttölämpötilaan ja kestävyYTEEN. (1, s. 57; 2, s. 64.)

Polttomootorin sytytysennakko on oltava oikea parhaan hyötysuhteen saavuttamiseksi. Myöhäinen sytytys siirtää palamispainehuipun liian myöhäiseksi yläkuolokohdasta. Tämä vähentää paisuntatyötä huomattavasti. Liian aikainen sytytysennakko aiheuttaa nakutusta, epätasaista palamista sekä myös epätasaista painekäytöstä. Sytytysennakon pitää muuttua moottorin pyörintänopeuden mukaan, jotta palamispainehuippu olisi aina hieman yläkuolokohdan jälkeen. Moottorin paras hyötysuhde saavutetaan yleensä mahdollisimman suurella sytytysennakolla ilman, että moottorissa ilmenee nakutusta. Nakutusrajalla pystytään ajamaan nakutustunnistimen avulla. Nakutustunnistimen tunnistessa nakutusta, tunnistin käskää moottorinohjaimen myöhäistää sytytystä, kunnes nakutus loppuu. Tämän jälkeen moottorinohjain alkaa mahdollisesti aikaistamaan sytytysennakkoa ja siirtymään lähelle nakutusrajaa. (1, s. 54–55; 2, s. 52.)

2.5 Moottorinmassat ja massatasapaino

Moottorin eri komponenteilla on omat massansa. Massat vaikuttavat moottorin toimintaan hitausmomenteilla. Hitausmomentit tarkoittavat esineen kykyä vastustaa liikkeen muutosta. Mitä pie-

nempi hitausmomentti sitä paremmin esine reagoi liikkeen muutokseen. Männällä ja osalla kiertokangesta hitausmomentti on pitkittäistä. Kampiakselilla, loppuosalla kiertokankea, vauhtipyörällä, nokka-akseleilla ja muilla pyörivillä osilla hitausmomentit ovat pyöriviä. (9.)

Vauhtipyörän massa on tärkeä tekijä moottorin käyntiin. Painavalla vauhtipyörällä saadaan moottori käymään tasaisesti, mutta se on huonompi reagoimaan moottorin toimintoihin. Esimerkiksi kaasua nostettaessa, moottorin kierrosnopeus laskee hitaammin kuin kevyemmällä vauhtipyörällä. Kevyemmällä vauhtipyörällä moottori muuttuu herkemmäksi reagoimaan muutoksiin. Samalla käynti muuttuu epätasaisemmaksi, koska ei ole samanlaista massaa tasoittamaan moottorin käyntiä. Nämä ovat selitettävissä hitausmomenteilla. (9.)

Kampikoneiston vapaat massavoimat ja massamomentit voidaan tasapainottaa osittain tai kokonaan. Moottori voi olla ulkoisesti täysin tasapainossa. Tällöin voi kuitenkin esiintyä moottorin sisäisiä voimia ja momenteja, jotka aiheuttavat muodonmuutoksia ja värähtelyjä. Moottorissa esiintyessä sisäisiä voimia ja momenteja, moottori täytyy tasapainottaa. Monisyylinterisen moottorin tasapainotuksessa oletetaan kaikkien sylinterien olevan samanlaisia ja sylinterivälien vakioita. Sytytysvälit voivat olla tasaisia tai epätasaisia, jolloin tasataan vääntövärähtelyjä. Massavoiimien tasapainotuksessa otetaan huomioon pyörivät massavoimat, ensimmäisen ja toisen kertaluvun edestakaisin liikkuvat massavoimat, pyörivien massavoiimien momentit ja ensimmäisen ja toisen kertaluvun edestakaisin liikkuvien massavoiimien momentit. (9.)

Liitteessä 3 on esitetty kuusisyylinterisen rivimoottorin tasapainotuksen laskenta. Laskennan perusteella työssä modifioitava rivikuusimoottori on luontaisesti tasapainossa, koska laskennassa kaikki lasketut arvot ovat nolliä. Tämä rivikuusimoottorin luontainen tasapaino oli tiedossa Polttomoottori 2 -kurssin luentojen perusteella. (9.)

2.6 Puristussuhde

Puristussuhde on moottorin rakennevakio. Puristussuhde kuvaa sylinterin kokonaistilavuuden ja puristustilavuuden suhdetta. Puristussuhde vaikuttaa moottorin työkierron lämpöhyötysuhteeseen sekä moottorin konstruktion. Korkeammalla puristussuhteella saadaan polttoaineen ominaiskulutus pienemmäksi ja kokonaishyötysuhdetta parannettua. Puristussuhteen valintaan vaikuttaa käytettävän polttoaineen nakutuskestävyys. Alkoholeilla on korkeampi itsesyttymislämpötila, jolloin

voidaan käyttää korkeampaa puristussuhdetta. Ahtaminen kohottaa työkierron palamis- ja lämpötilatasoja, jolloin joudutaan valitsemaan pienempi puristussuhde. Puristussuhde on moottorin rakennevakio, jonka suuruus vaikuttaa työkierron lämpöhyötysuhteeseen. (2, s. 103; 1, s. 101, 103.)

3 RB25DET NEO -MOOTTORI

Tässä luvussa tutustutaan Nissanin RB25DET NEO -moottoriin, jota tässä työssä modifioidaan. Nissan esitteli RB25DET-moottorin vuonna 1989 R32 Skyline -mallissa. Moottori esiintyy jokaisessa Skyline-malleissa vuoteen 2002 saakka. Moottori on saanut pieniä päivityksiä koko elinikänsä ajan. Vuonna 1993 moottori päivitettiin muuttuvalla venttiilien ajoitusysteemillä, joka oli käytössä imunokalla. Suurin päivitys tuli vuonna 1998, jolloin moottori sai NEO-sylinterikansi päivityksen. NEO-sylinterikannessa on jäykät venttiilin nostimet hydraulisten nostimien sijaan, uudelleen suunnitellut nokka-akselit, paranneltu venttiilien ajoituksen säätö, korkealämpoisempi termostaatti, paremmilla puolilla sekä uudelleen suunnitellulla imusarjalla. Imusarjaa muokattiin pienentäen sisääntuloreikää 5 millimetriä 50 millimetristä 45 millimetriin. Tällä reiän pienennyksellä pyrittiin lisäämään ilman virtausta imusarjassa. Nissan on käyttänyt moottoria myös muissa malleissa. (10, linkit RB25; 11; 12.)

Kirjaimet RB25DET merkitsevät eri asioita ja kertovat moottorista. RB on Nissanin moottoriperhe vuosina 1985–2004. 25 tarkoittaa kokonaistilavuutta. D ilmaisee Dual overhead cams eli kahta ylipuolista nokka-akselia. E on merkki elektroniselle polttoaineen suihkutukselle. T tarkoittaa turboahdettua moottoria. (10, linkit RB25; 11; 12.)

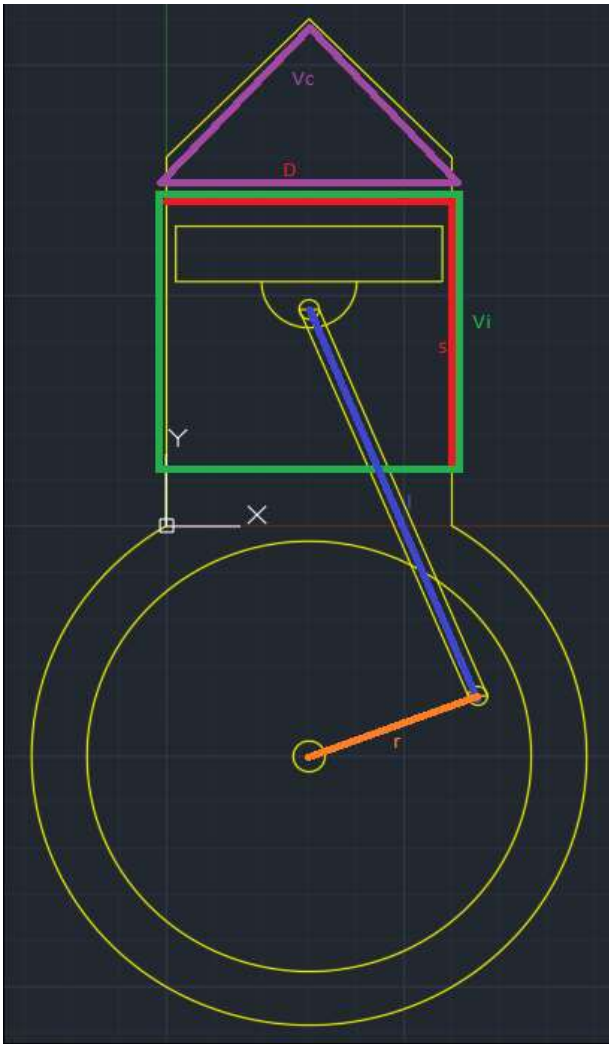
3.1 Moottorin perustiedot

Moottorin päämitoituksen tarkoituksen on laskea moottorin rakennearvoja, joiden perusteella voidaan vertailla eri moottoreita keskenään. Yleisimmät päämitat, kuten sylinterin halkaisija ja iskunpituus, ovat moottorin yleistietoja, jotka moottorin valmistaja ilmoittaa. Taulukossa 1 esitetään RB25DET NEO -moottorin perustiedot sekä päämitoitustiedot. (1, s. 105.)

TAULUKKO 1. Moottorin perustiedot (13)

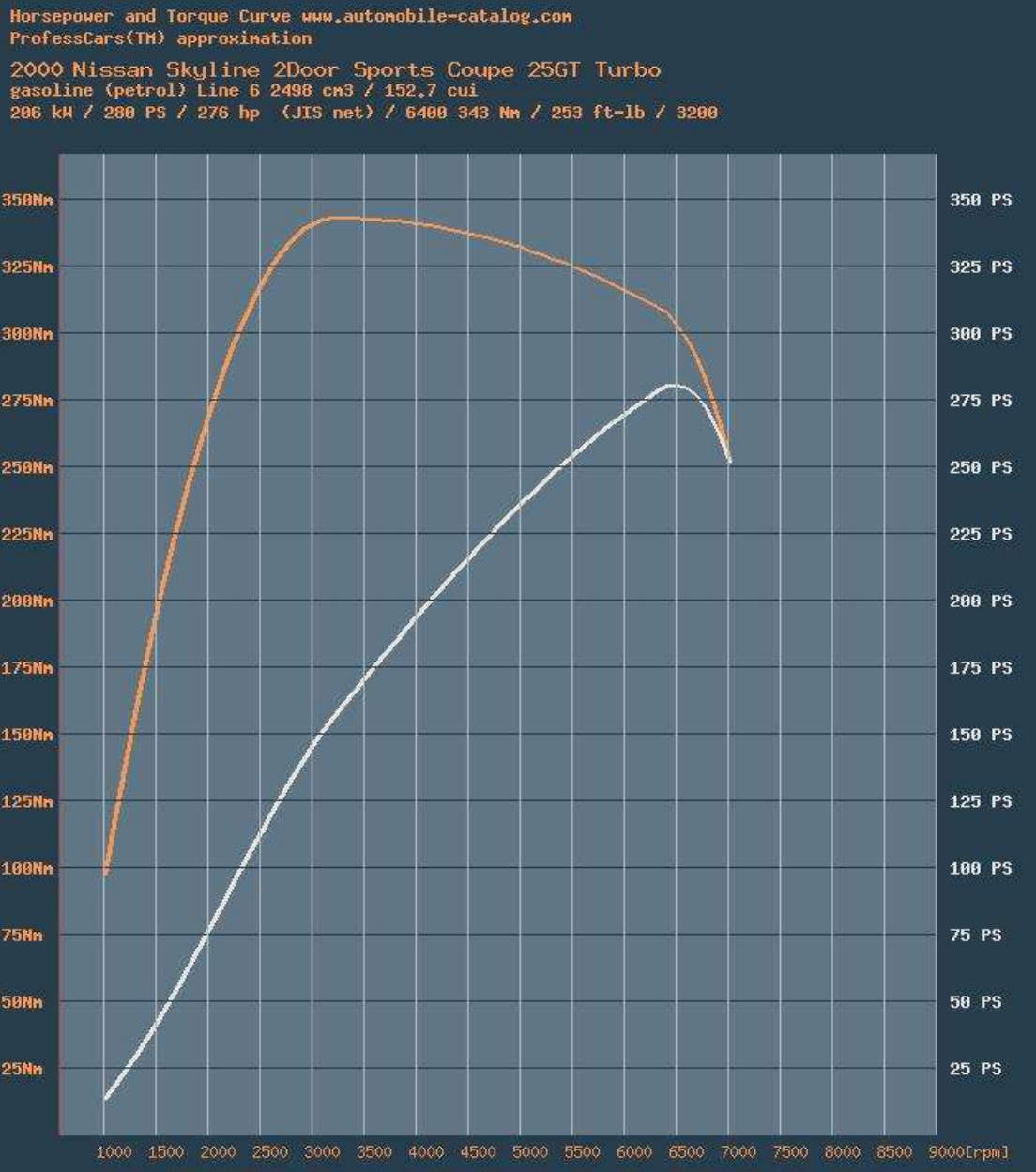
Sylinterin halkaisija	D	86,00 mm
Iskunpituus	S	71,70 mm
Iskusuhde	S/D	0,834
Iskutilavuus	V_i	2498 cc
Puristustilavuus	V_c	312 cc
Kokonaistilavuus	V_k	2810 cc
Puristussuhde	ε	9,0: 1
Palotilan muoto		Harjakatto
Sylinteriluku	i	6
Moottorin rakennemuoto		Rivimoottori
Kammensäde	r	35,85 mm
Kiertokangen pituus	l	121,50mm
Moottorin massa	m	260 kg
Maksimiteho	P_e	206 kW @ 6400 rpm
Maksimivääntömomentti	T_e	362 Nm @ 3200 rpm
Tehollinen keskipaine	p_e	15,5 bar
Männän keskinopeus	C_m	15,3 m/s
Tilavuusteho	P_e/V_i	82,5 kW/l
Tilavuusvääntö	T_e/V_i	144,9 Nm/l
Ominaiskulutus	b	332 g/kWh
Kokonaishyötysuhde	η_e	0,235

Kuvassa 6 on esitetty yksinkertaistettuna moottorin poikkileikkaus. Kuvasta käy ilmi moottorin perusmitat: sylinterin halkaisija D , iskunpituus S , iskutilavuus V_i , puristustilavuus V_c , kiertokangen pituus L , kammensäde r ja harjakatto palotilan muoto.



KUVA 6. Moottorin poikkileikkaus

Kuvassa 7 on RB25DET NEO -vakiomoottorin teho- ja vääntömomenttikuvaaja. Tästä saadaan käsitys, kuinka vakiomoottori on toiminut tehollisesti ja väännöllisesti.



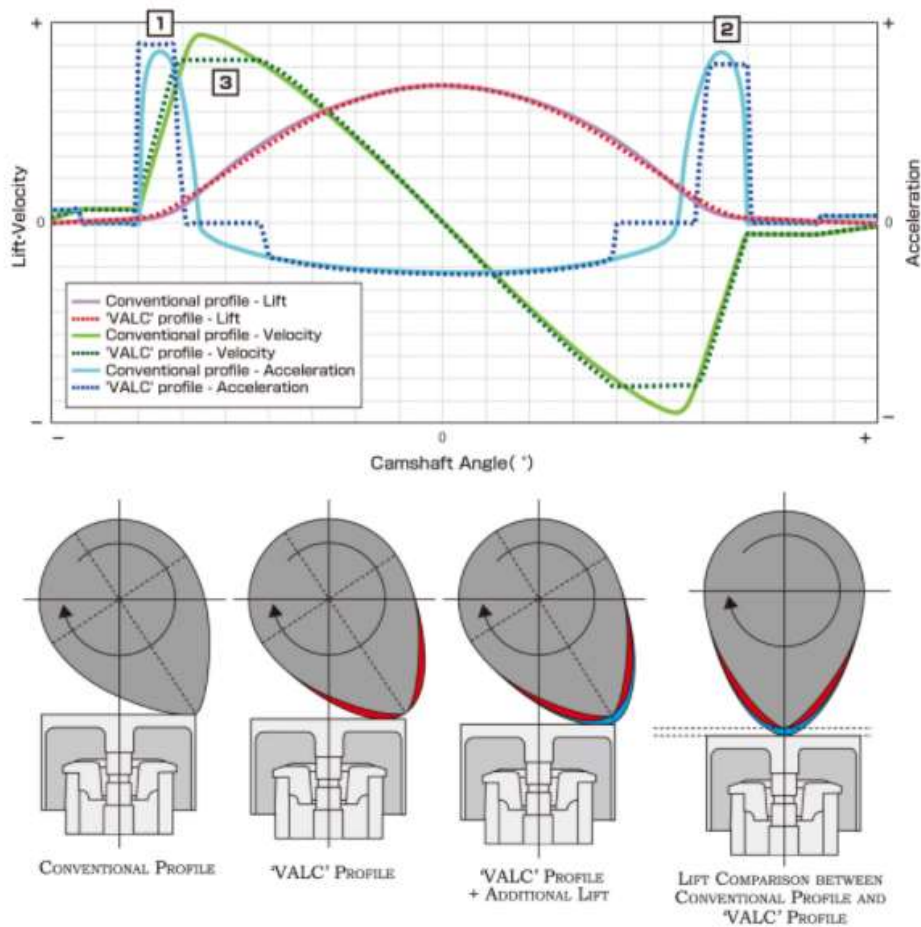
KUVA 7. RB25DET NEO -moottorin teho- ja vääntökuvaaja (14)

3.2 Kaasunvaihtojärjestelmä

Moottorissa käytetään kahta yläpuolista nokka-akselia. Nokka-akseleita käytetään hihnalla. Jokaiselle sylinterille on neljä venttiiliä, joten kokonaisventtiili määrä kuusisylinterisessä moottorissa on 24 venttiiliä. RB25DET NEO -moottorissa käytetään muuttuvaa venttiilien ajoitusta, mutta ei enää hydraulisia nostimia vaan jäykkiä nostimia. Tämä muutos tuli NEO-sylinterikannen päivityksessä

(10, linkit RB25; 11; 12). Imupuolennosto on 8,4 millimetriä ja venttiilin halkaisija on 34,15 millimetriä. Pakupuolennosto on 8,7 millimetriä ja venttiilin halkaisija 29,65 millimetriä. Lähteessä on myös mainittu venttiilien aukioloaika, imupuolelle 236° ja pakupuolelle 232°. (15; 12.)

Kuvassa 8 on esitetty nokka-akselinprofiili vakiona conventional profile -kohdassa. Alkuperäistä nokka-akselin muotoa verrataan viritysnokkaan. Nousu-, nopeus- ja kiihtyvyyssiagrammissa on alkuperäisen nokan kuvaajat, joita verrataan viritysnokkaan. Kuvassa ei näy muita arvoja kuin nollakohdat.



KUVA 8. Nousu-, nopeus- ja kiihtyvyyssiagrammi ja nokka-akselin profiili (16)

3.3 Seoksenmuodostus

Ilmamassa mitataan MAF-anturilla. MAF-anturi perustuu kuumalankatekniikkaan. Kuumalankatekniikassa mitataan virran kulutusta lankaa lämmitettäessä. Lanka viilenee ilmanmäärän ja lämpötilan takia, jolloin lankaa joutuu lämmittämään. Ilma paineistetaan turboahtimella paremman sylinteritäytöksen saamiseksi. Oikeanlaisen seoksen takaamiseksi moottori tarvitsee lambda-anturin, joka

valvoo jäännöshappea pakosarjan jälkeen ennen katalysaattoria. Moottori käyttää ulkoista seoksenmuodostusta. Tällöin polttoaine suihkutetaan ruiskutussuuttimilta imukanaviin, jossa muodostuu ilman ja polttoaineen seos. Moottorinohjainlaite lukee edellä mainittujen antureiden tietoja ja vertaa niitä ohjainlaitteen oletuskarttaan ja tekee tarvittavia säätötoimenpiteitä suihkutusajan, ilmassan, sytytyshetken ja käyntinopeuden perusteella. Näin saadaan muodostettua moottorin toiminnan kannalta sopiva ilma-polttoaineseos.

4 OSIEN VALINTA

Moottorin päivityksen lähtökohtana ovat RB25DET NEO -moottorin vakio moottorinlohko, kampiakseli ja sylinterikansi. Nämä osat tulee tarkastaa, jotta näitä osia voidaan käyttää. Mikäli osat eivät läpäise tarkastusta, yritetään tilata vakio-osat tilalle.

4.1 Moottorilohkoon liittyvät osat

Ennen moottorin kokoamista lohko tulee tarkastaa, puhdistaa ja koneistaa kaikki tasopinnat suoriksi. Tarkastuksessa tarkistetaan lohko halkeamien varalta, sylinteriseinämien paksuus, sylinterien halkaisijat, sylinterien kunto ja laakeripesien koko. Sylinterien halkaisija ja niiden kunto ovat oleellinen tieto. Niistä saadaan tietää, tarvitseeko sylinteriputkia koneistaa sekä tieto tilattavien mäntien koosta. Jos sylinteriputkia tarvitsee koneistaa putkien huonon kunnon takia, esimerkiksi sylinteriputkessa on naarmu, tulee moottoriin tilata isommat männät. Tällöin välykset pysyvät sopivina. Lohkon puhdistuksessa puhdistetaan kaikki sisäiset kanavat ja kaikki pinnat, jotta moottorin sisälle ei jää mitään lika- tai roskajäämiä. Nämä voisivat vahingoittaa moottorin sisäisiä osia.

Kun moottorista otetaan enemmän tehoa irti kuin vakiona, sylinterin tuottamaa painetta lisätään. Näin moottorin sylintereihin ja lohkoon kohdistuu suurempi rasitus. Tällöin lohkoa voidaan vahvistaa lohkon pohjaan kiinnitettävällä moottorikorsetilla. Korsetti auttaa jäykistämään lohkoa kiinnittämällä kampiakselin kiinnikkeet tukevammin moottorilohkoon sekä auttaa pitämään lohkon muodossa. Nissanin RB-moottoriperheeseen on saatavilla valmiita korsetteja Platinum Racing Productsilta, joka on tuotekehittänyt sopivan korsetin RB-moottoriperheeseen. Tämä RB-korsetti on esitetty kuvassa 9 ja hinnaltaan noin 1 000 euroa. (17.) Välttämättä tässä modifiointityössä ei korsettiä tarvitsisi suunniteltavien voimien puolesta, mutta korsetti hankitaan ennaltaehkäisemään ja auttamaan lohkoa kestämään tulevia rasituksia. Jos joskus moottorista halutaan enemmän suorituskykyä ottaa irti, korsetti on valmiina auttamassa moottoria kestämään lisääntyneen suorituskyvyn.

Kiertokanget ovat tärkein osa palamisesta syntyvän paineen siirtämisessä kampiakselille. Kiertokankien tulee kestää hyvin suuria paineita ollessaan eri asennoissa kiertokangon kulmien muuttuessa verrattuna mäntään edestakaisen liikkeen aikana. Kiertokankia valmistetaan eri materiaaleista, jolloin saadaan erilaisia ominaisuuksia.

RB25- ja RB26-moottoreissa käytetään samanlaisia kiertokankia, jolloin voidaan etsiä eri moottorikodeilla kiertokankia modifioitavaan moottoriin. RB25-moottoriin löytyy kiertokankia eri valmistajilta. Eroja eri valmistajien välillä löytyy valmistusmenetelmistä ja käytettävästä materiaalista. Eagle-kiertokankivalmistaja lupaa 4340-teräskiertokangilleen 1 500 hevosvoiman keston, mikä on paras samaa terästä käyttävistä valmistajista (20, Nissan-RB26; 21). Lisäksi Eagle-kiertokanget ovat samaa hintaluokkaa muiden 4340-terästä käyttävien valmistajien kanssa. Eagle-kiertokankisarjan hinta suomalaisessa verkkokaupassa 780 euroa (22). Tämän hinnan jälkeen kiertokankien hinta nousee lähemmäksi 2 000 euroa sekä kiertokankien valmistusmateriaalit muuttuvat. Valmistusmateriaalit muuttuvat erikoislujuksiteräksiksi, joiden valmistus on vaativampaa ja materiaalin hinta on korkeampaa. Tämä selittää hinnan nousun kiertokangissa. Käytettäessä erikoislujuateräksiä kiertokanget kestävät paremmin suurempia voimia ja ovat kevyempiä pienentäen moottorin sisäisiä massoja. Tähän työhön Eagle-kiertokanget ovat riittävät ja ovat vielä järkihintaiset. Eagle-kiertokankisarja sisältää suomalaisella jälleenmyyjällä myös kiertokankien kiinnityspultit (22).

Seuraavaksi moottori tarvitsee männät. Vakiomännät eivät kestä lisääntyvää rasitusta, koska ne on suunniteltu vakioitehoille. Männät tulee päivittää jälkimarkkinoilta saataviin kestävimpiin mäntiin. RB25-moottoriin löytyy useilta mäntävalmistajilta mäntiä, mutta tässä työssä rajoittavaksi tekijäksi muodostuu NEO-sylinterikansi. RB25DET NEO -moottorissa on NEO-sylinterikansi, jossa on erilainen palotila kuin muissa RB25DET-moottoreiden sylinterikansissa. NEO-sylinterikanteen sopivia mäntiä suoraan hyllyyn tekee ainoastaan CP-Carrillo (23, s. 90). CP-Carrillolla on kolmea kokoa männän halkaisijaksi, riippuen tarvitseeko sylinteriputkia koneistaa. CP-Carrillon mäntien hinnat suomalaisella jälleenmyyjällä ovat noin 1 300 euroa. Mäntäsarja sisältää tällöin männät, männänrenkaat ja männäntapit.

RB-moottoreissa on ongelmia öljyjen virtaamisessa sekä öljypumpun käytössä (11). Tehtaalta tullessa RB-moottorin öljypumppu ottaa voimansa kampiakselilta. Kampiakselilla öljypumpun kohdalla on kaulus, jossa kaksi sivua on jyrskitty tasaiseksi ja näillä kahdella tasaisella kohdalla käytetään öljypumppua. Kuvassa 10 on havainnollistava kuva RB-moottoreiden öljypumpusta. Korke-

ammilla kierroksilla kampiakselin ja öljypumpun sovitus saattaa luistaa sekä muuttaa muotoa, jolloin öljypumppu ei toimi normaalisti ja öljyn virtaus sekä paine huononee. Maailmalla tämä ongelma on ratkaistu rakentamalla kampiakselille booritus, jolla käytetään öljypumppua. Tällöin korkeammilla kierroksilla kampiakseli ei pääse luistamaan suhteessa öljypumpun rattaaseen, koska enemmän hampaita on kosketuksessa koko ajan. Supertec Racingillä on tarjolla sarja, jolla muutetaan Nissanin oma korkeavirtauksellinen N1-öljypumppu toimimaan boorituksen avulla (24). Muutossetin hinta on 700 euroa (24). Tämä tarkoittaa, että vakio öljypumppu tulee vaihtaa Nissanin omaan suurempituottoiseen N1-öljypumppuun. Kuvassa 10 on N1-öljypumppu. N1-öljypumpun hinta on 430 euroa (25). Öljypumppu uusittaisiin joka tapauksessa, koska ikää alkuperäisellä öljypumpulla on jo yli 20 vuotta. Modifioitava moottori on vuodelta 2000 sekä öljypumpussa on käytön tuomaa kulumaa.



KUVA 10. N1-öljypumppu (25)

Öljyn virtausmäärää suurennettaessa vakioöljymäärä saattaa jäädä vähäiseksi ja öljypumppu saattaa imaista ilmaa. Tämä on huono asia öljyvoitelun kannalta. Tähän neuvoksi on öljypohjan öljytillavuuden isontaminen, jolloin öljynmäärä kasvaa. Tällä varmistetaan, ettei öljypumppu pääse imaisemaan ilmaa öljyjärjestelmään. Lisäksi RB-moottoreissa on ongelmana öljyn pakkautuminen sylinterikanteen eikä se palaudu riittävän nopeasti takaisin öljypohjaan (11.). Tätä ongelmaa voidaan korjata asettamalla moottorilohkon sylinterikanteen vieviin öljykanaviin öljynvirtauksen rajoittimet, jotka rajoittavat öljynvirtausta sylinterikanteen ja samalla öljymäärä kannessa. Öljynrajoittimia on

saatavalla useammilta valmistajilta eri kokoisina noin 10 euron hintaan (26; 27). Lisäksi öljynpakautumisongelmaa voidaan auttaa ylimääräisellä ulkoisella öljykanavalla, joka auttaa kuljettamaan öljyä sylinterikannesta takaisin öljypohjaan.

Kampiakselille asennetaan myös hihnapyörä, joka käyttää apulaitteita. Apulaitteita ovat laturi, vesipumppu, ohjaustehostin ja ilmastoinnin kompressori. Hihnapyörä on samalla myös harmoninen tasapainottaja, joka on kriittinen osa moottorin eliniän ja suorituskyvyn kannalta. Harmonisella tasapainottajalla ei tasapainoteta moottorin pyöriä massoja, vaan sen tehtävä on vaimentaa ja tasapainottaa kampiakselin värinöitä sekä resonansseja. Harmoninen tasapainottaja asennetaan sekä mukavuussyistä että moottorin ja muidenkin osien keston kannalta. (28.)

Harmoninen tasapainottaja suunnitellaan moottorikohtaisesti moottorin suorituskyvyn ja moottorin käytön mukaan. RB-moottoreihin on saatavilla jälkimarkkinoilla kahdelta valmistajalta, Ross Performance Partsilta ja ATI Performance Productsilta, harmonisia tasapainottajia, jotka on suunniteltu RB-moottoreiden suorituskykyparannuksiin. Tähän työhön sopii paremmin Ross Performancen Race-tasapainottaja sen lisäosien ansiosta. Sen yksi variantti on myös suunniteltu NEO-moottorimallille. Ross Performancen tasapainottajaan on liitetty kampiakselin asentotunnistimen tarvitsema tunnistinlevy. Hinta Ross Performancen Race-tasapainottajalla on 550 euroa (29).

4.2 Sylinterikanteen liittyvät osat

Sylinterikansi on tärkeä osa moottorin toiminnan kannalta, sillä se sulkee palotilan sekä auttaa sylinterin palotilaa kaasujenvaihdossa. Tärkeimmät osat sylinterikannessa muodostettaessa sylinterikannen kaasujenvaihtojärjestelmää ovat venttiilit ja nokka-akselit. Ne tulee päivittää suuremmalle suorituskyvylle suunniteltuihin, jotta sylinterien kaasunvaihto toimisi paremmin moottorin suorituskykyä kasvattaessa.

NEO-sylinterikanteen suunnitellut uudet venttiilit löytyvät Ferrea-venttiilivalmistajan valikoimasta. Ferrean valikoimasta löytyy NEO-sylinterikanteen vakiokokoiset venttiilit sekä yhden millimetrin ylikokoiset venttiilit. Tässä työssä pyritään parantamaan moottorin suorituskykyä, jolloin venttiileiksi valitaan ylikokoiset venttiilit. Ne parantavat sylinterien kaasunvaihtoa kasvatettaessa pinta-alaa, jossa kaasut voivat kulkea. Ferrea-venttiilisetin hinta on noin 700 euroa. (30.)

Samalla kannattaa päivittää venttiilien palautusjouset, sillä niihin kohdistuu suuri rasitus. Edelliset jouset ovat jo 20 vuotta vanhat ja ne ovat kuluneet käytössä. Kelford Cams -valmistajalta löytyy sopivat palautinjouset Ferrea-venttiilisetiin. Lisäksi Kelfordin jousisetti on jäykempi kuin alkuperäinen jousisetti. Jäykemmät jouset kestävät lisääntyneen rasituksen paremmin, kun moottorin suorituskykyä lisätään. Kelford Camsin jousisetin hinta on noin 700 euroa. (31.)

Venttiilien ja palautinjousien päivittämisen jälkeen kannattaa päivittää nokka-akselit. Monesti viritettäessä turbomoottoreita kohotetaan pelkästään ahtopaineita suurten tehojen toivossa eikä mietitä sylinterikannen virtauskykyä. Parantamalla sylinterikannen virtauskykyä saadaan monikerroin parempia tuloksia väkisin pakottamisen sijaan. Nokka-akselia voidaan pitää moottorin kapellimestarina. Nokka-akseli ohjaa venttiilien tahtia. Ne päästävät ilma-polttoaineseoksen sisään sylinteriin sekä pakokaasut sieltä ulos. Nokka-akseli määrittää, miten tehokkaasti tämä kaasunvaihto tapahtuu. Nokka-akselin ajoituksilla määritetään pitkälti moottorin luonne ja tehoalue. Jälkimarkkinoilta saatavissa viritysnokissa on venttiilin nostoa enemmän kuin vakio nokka-akselissa, jolloin venttiilin avautuessa enemmän myös kaasujen virtaus on tehokkaampaa. (32.)

RB25DET NEO -moottoriin on saatavilla viritysnokka-akseleita muutamalta valmistajalta, Kelford Camsilta, HKS:ltä ja Tomeilta. Valmistajilla on useampi malli RB25DET NEO -moottoriin sopivia nokka-akseleita. Mallien erot löytyvät venttiilien aukioloajoista sekä venttiilien nostosta. Vertaillen saatavilla olevia nokka-akseleita päädyttiin valitsemaan Tomein nokka-akselit niistä saatavilla olevien tietojen perusteella. Tomein nokkien profiili on maltillisempi kuin kilpailijoiden. Maltillisemmalla nokka-akselin profiililla haetaan laajempaa moottorin käyttöaluetta kuin radikaalimmilla nokka-akselin profiileilla. Radikaalilla nokka-akselilla parannetaan moottorin kaasunvaihtoa ja suorituskykyä moottorin kierrosalueen yläpäässä. Työssä haetaan moottorille suurempaa käyttöaluetta, jolloin Tomein maltilliset nokat ovat hyvä vaihtoehto parantaa sylinterin kaasunvaihtoa verrattuna vakioihin nokka-akseleihin. Tomein sarjassa venttiilin aukioloaikaa kasvatetaan vakiosta 236 asteesta 252 asteeseen ja nostoa parannetaan 0,3 millimetriä (33). Tomein nokka-akselisarjan hinta on noin 700 euroa (34).

RB-moottoriperheessä nokka-akseleita käytetään jakohihnalla. Jakohihna tulee tietyn ajoin vaihtaa uuteen, koska hihna kuluu. Liian kulunut hihna saattaa katketa. Viritetyissä koneissa käytetään vahvistettua jakohihnaa, joka on suunniteltu kestävämpään suurempaan rasitukseen. Lisäksi vahvistetuissa jakohihnoissa on pyritty siihen, että kovemmassakin käytössä jakohihna ei veny eikä jousta.

Tällöin nokka-akselien ajoitukset pysyvät tarkkoina ja nokka-akselit seuraavat tarkasti kampiakselin liikettä. RB-moottoriin sopiva vahvistettu jakohihna maksaa noin 160 euroa (35).

Moottoria uudelleen kasattaessa tulee uusia kannentiiviste, joka tiivistää sylinterikannen ja moottorin lohkon toisiinsa. Vahvan ja kestävä kannentiiviste merkitys kasvaa viritetyissä moottoreissa otettaessa enemmän suorituskykyä ulos. Tällöin moottorin lämpötila ja rasitus kasvaa, jolloin heikompi kannentiiviste saattaa alkaa vuotamaan. Tämä voi aiheuttaa jäähdytysnesteiden ja öljyn sekoittumisen keskenään. Tästä syystä kannattaa hankkia uusi vahvempi kannentiiviste kestävämpään suurempaan rasitukseen. (36.)

Cometic-kannentiivistevalmistajalla on tarjolla RB25DET NEO -moottoriin vahvempi kannentiiviste sekä Cometic tarjoaa kannentiivistesarjaa, joka sisältää kaikki moottorin yläpään tiivisteet. Hintaa tällä koko Cometicin yläpään tiivistesarjalla on 300 euroa (36). Uusittaessa kannentiivistettä ja sylinterikannen ollessa irti lohkoista kannattaa uusia myös sylinterikannen kiinnityspultit. Kiinnityspultteihin kohdistuu suuri rasitus sylinterissä tapahtuvassa palotapahtumassa ja siitä syntyvän paineen pyrkiessä laajenemaan. Palopaine työntää mäntää alaspäin, mutta samalla pyrkii työntämään myös sylinterinkantta. Tällöin sylinterikansi pyrkii irti moottorilohkosta. Viritetyssä moottorissa sylinterin palotapahtumaa kasvatetaan, jolloin myös palopaineet kasvavat. Sylinteripaineiden lisääntymisen johdosta alkuperäiset kannenpultit helposti venyvät ja pahimmassa tapauksessa murtuvat poikki. Tästä syystä uudet ja vahvemmat kannenpultit tulee hankkia moottoria viritettäessä, ettei sylinterikansi irtoa moottorilohkosta. ARP-Bolts tarjoaa vahvistettuja pulttisarjoja laajalla valikoimalla. Heiltä löytyy myös RB25DET-moottoriin vahvistetut kannenpultit. ARP:n kansipulttiserialla on hintaa 250 euroa. (37.)

4.3 Pakojärjestelmään liittyvät osat

Pakosarja on tärkeä tekijä moottorin toiminnassa. Pakosarja ohjaa ja ajoittaa pakokaasujen kulkua pois sylintereistä. Hyvin rakennetun pakosarjan mitat ja virtaukset on suunniteltu siten, että pakopulssit ohjataan eteenpäin optimaalisessa järjestyksessä. Tällöin sylinterien pulssit tukevat toinen toistensa virtausta ja tehostavat näin sylinterien kaasunvaihtoa. Lisäksi pakopulssi on voimakas, jolloin sen virtausta ei ole syytä rajoittaa käyttämällä pientä putkikokoa. Samalla on muistettava ylisuurin putkikoon hidastavan virtausta ja vähentävän pulssitoiminnan tehokkuutta. Pakosarjan

mitoituksella ja muodolla määritetään isoksi osaksi moottorin toiminta ja ajettavuus eri kierrosaluilla. Turboautossa pakosarjalla on myös tärkeä tehtävä, sillä se syöttää pakokaasuja turboahjelmalle. Pakosarjan tulisi ohjata pakokaasuja optimaalisella tavalla turbolle, jotta turboviive olisi pieni sekä turbon toiminta olisi tehokasta. (38; 39.)

RB25-moottoriin löytyy useampi valmis pakosarja, mutta laadukkaimman vaikutelman antoi Walton Motorsportin pakosarja. Walton Motorsportin pakosarjaa voi myös muokata haluamakseen turbon kiinnityksen ja hukkaportin lähdön mukaan. Lisäksi Walton antaa pakosarjalle elinikäisen takuun. Hintaa pakosarjalla on riippuen turbon kiinnityksestä ja hukkaportin lähdestä noin 1 200 euroa. (40.) Lisäksi on myös yrityksiä, jotka tekevät mittilaustöinä pakosarjoja moottorin omistajien toiveesta. Pakosarjan voi tehdä itse, mutta työn tavoitteena oli tutkia markkinoilta valmiina saatavia osia.

Turbon valinta on tärkeä tekijä moottorin tehojen kasvattamisen kannalta sekä miten turbo toimii moottorin yhteydessä. Turboa valittaessa huomioidaan toiminta olosuhteet sekä sen haluttu toimivuus. Pelkkä turbo ei tuota mitään, vaan se auttaa moottorin ja muiden osien avulla tuottamaan halutun lopputuloksen. Turbon valinnassa täytyy alustavasti tietää, mitä turboahjelmalta vaaditaan sekä toimivuus eri sovelluksissa. Ratkaisevaa turbon valinnassa on, että kuinka paljon huipputehoa ja -vääntöä moottorista lähdetään hakemaan. (41.)

Tässä työssä tehotavoite on 700 hevosvoimaa. Turbon valinnassa hyödynnetään turbovalmistajien omia turbon valintatyökaluja sekä turboille annettuja suosituksia moottoritehojen suhteen. Valinta työkalujen ja tehosuosittelun perusteella valittavaksi valikoitui kaksi turboa, Garrett G30-900 ja Holset HX40 Super (42; 43). Garrett ja Holset ovat tunnetumpia autojen virityksessä käytettäviä turboja. Valinta suoritetaan näiden kahden turbon välillä vertailemalla kompressorikarttoja ja hintaa (43; 44). Hintaa kummallakin turbolla on 550 euron luokkaa (45; 46). Valitaan käyttöön Garrett G30-900 paremman kompressorikartan perusteella. Turbon valinnan onnistuneisuus, sen toiminta ja käytettävyys selviää vasta koeajamalla ja testaamalla moottoria käytännössä. Jos moottori ja sen käytettävyys ei ole haluttua kyseisellä turbolla, turboa täytyy muokata paremmin sopivaksi haluttuun käyttöön.

Pakosarjaan tulee asentaa hukkaportti, jotta turbon ahtaman ilman määrää, ahtopaineen liiallista nousua ja ahtimen liian korkeaa pyörintänopeutta voitaisi ohjata tarkemmin. Hukkaportilla ohjataan pakokaasujen virtausta pois turbiinilta. Ulkoinen hukkaportti on riippumaton turbon toiminnasta ja ulkoista hukkaporttia pystytään kontrolloimaan erillisillä järjestelmillä, jotta turbo saavuttaisi halutun

pyörintänopeuden. Ulkoisella hukkaportilla saadaan ohjatuksi turbon turbiinilta pois hyvinkin paljon vastapainetta ja lämpöä, joista muuten seuraisi turbiinin tukkeutuminen ja mahdollinen sulaminen. Ulkoisen hukkaportin pitää olla riittävän suuri suhteessa virtaaviin pakokaasuihin ja lämpötiloihin. Oikein valitulla hukkaportilla voidaan saavuttaa suuria hyötyjä, jolloin hukkaportilla voidaan kontrolloida haitallisia virtauksia ja lämpötiloja jopa 50-prosenttisesti. (41.)

Walton Motorsport kertoo, että yrityksen pakosarja on optimoitu toimimaan Turbosmart GenV Hypergate 45 -hukkaportilla (40). Turha muuttaa hyväksi todettua ja suunniteltua pakettia. Lisäksi Turbosmart esittelee HyperGate 45 -hukkaportin olevan parhaiten virtaava omassa koko luokassaan. Siihen on mahdollista liittää vesijäähdytys. Hintaa Turbosmartin HyperGate 45 -hukkaportilla on 410 euroa. (47.)

Sylinterissä palava ilma-polttoaineseoksen tulee olla halutunlainen, jotta moottorista saadaan koko suorituskyky potentiaali irti. Moottorinohjaus tarkkailee seossuhdetta pakosarjassa olevalla lambda-anturilla ja säätää lambda-arvon perusteella moottorin polttoaineensyöttöä. RB-moottorissa käytetään alun perin kapeakaistaista lambda-anturia. Se toimii hyvin pienellä lambda-arvon alueella, jolloin koko moottorin potentiaali jää hyödyntämättä. Tällöin kapeakaistainen lambda-anturi kannattaa päivittää laajakaistaiseen lambda-anturiin. Laajakaistainen lambda-anturi pystyy antamaan tarkempaa seostietoa kaikissa moottorin toimintatilanteissa. Laajakaista-anturin avulla moottoria voidaan säätää laajemmalla lambda-alueella, jolloin moottorista saadaan kaikki suorituskyky puristettu ulos. Oikea seossuhde on myös äärimmäisen tärkeää, jotta moottori voi saavuttaa huipputehon. Oikea seossuhde vaikuttaa moottorin toimivuuteen ja taloudellisuuteen. Moottori toimii optimaalisesti poltettavan ilma-polttoaineseoksen ollessa optimaalinen. Laajakaista-anturiksi valitaan Bosch:n LSU 4.9 -anturi, joka on Bosch LSU 4.2 -anturin päivitetty versio. LSU 4.2 -anturi on laajalti käytössä ollut laajakaista lambda-anturi. LSU 4.9 -anturin hinta on noin 95 euroa riippuen miltä jälleenmyyjältä ostaa (48).

4.4 Ilmujärjestelmään liittyvät osat

Ilmansuodatin on tärkein osa, joka suojelee moottoria ilmassa olevilta roskilta. Olipa ilmansuodatin minkä mallinen tahansa, sen tehtävä on aina suodattaa moottorin imuilmaa. Ilmansuodatin suodattaa ilmasta epäpuhtaudet kuten pölyn ja hiekan, jotta ne eivät pääse kuluttamaan moottoria. Alku-

peräinen ilmansuodatin on kompromissi, jossa on jouduttu ottamaan huomioon valmistuskustannukset, huollettavuus, kompakti koko sekä moottorin äänimaailma. Vaihtamalla alkuperäisen ilmansuodattimen tilalle vapaammin virtaavan ilmansuodattimen, moottorin kaasunvaihto toimii paremmin. Näin moottori tuottaa paremmin tehoa sekä kuluttaa vähemmän polttoainetta normaaliajossa. (49.) Markkinoilla on saatavilla monen mallista ilmansuodatinta, mutta tässä vaiheessa ei tiedetä ilmansuodattimelle jäävää tilaa konehuoneessa, joten ei vielä tässä vaiheessa päätetä minkä mallinen ja kokoinen ilmansuodatin hankitaan. Vakioilmansuodatin tullaan korvamaan paremmin virtaavalla suodattimella.

Ilmansuodattimelta ilma menee turbolle, joka paineistaa ilman. Turbolta ilma kulkee välijäähdyttimelle. Välijäähdytin on yksi tärkeimpiä osia turboahdetussa autossa. Välijäähdytin jäähdyttää turbon lämmittämän ilman, jolloin viileämmässä ilmassa on enemmän happea. Tällöin moottorin toiminta on tehokkaampaa. RB-moottoreihin on saatavilla eri valmistajilta omia välijäähdytinsarjoja. Sarjojen eroja löytyy välijäähdyttimien mitoista. Lisäksi välijäähdyttimissä tapahtuu paine- ja virtaushäviötä, joiden vertailusta ei löytynyt tuloksia. Kalleimmat RB-moottorille olevat välijäähdyttimet olivat lähes 1 500 euron hintaiset (50). Vertailtuna kalleimpien välijäähdyttimien kennojen kokoon löytyi järkevään hintaan Mishimoton R-line-välijäähdytin. Kennon koko on leveydeltään 600 millimetriä, korkeudeltaan 300 millimetriä ja syvyydeltään 100 millimetriä. Kenno on samankokoinen kuin kalleimmissa välijäähdyttimissä, mutta hinta on vain 280 euroa. (51.)

Välijäähdyttimeltä ilma kulkee imusarjaan. RB25DET NEO -moottorin vakioimusarjaan tulevat ahtoputket kulkevat pakosarjan, turbon ja moottorin ylitse. Tämä havainnollistetaan kuvassa 11. Tällöin ahtoputket kokevat lämpökuormaa pakosarjan osilta, jolloin välijäähdyttimeltä tulevaa jäähdytettyä ilmaa lämmitetään. Lisäksi imusarja kulkee moottorin ylitse, mikä hankaloittaa pääsyä puoliin ja sytytystulppiin. Kuvassa 11 on RB25DET NEO -moottori, joka mallintaa imusarjan ahtoputkia.



KUVA 11. RB25DET NEO -moottori (52)

Imusarja muutetaan muistuttamaan RB25DET NEO -moottorin isoveljen RB26DETT-moottorin imusarjaa. Kuvassa 12 on esillä RB26DETT-moottori, jossa imusarjaan tulevat ahtoputket eivät käy lähellä pakosarjaa ja turboja. Tällöin ahtoputket eivät koe lämpörasitusta.



KUVA 12. RB26DETT-moottori (53)

RB26DETT-moottoriin perustuvia imusarjan muunnossarjoja on tarjolla japanilaisilla valmistajilla ja eurooppalaisella valmistajalla. Eurooppalaisen valmistajan imusarja sisältää imusarjan lisäksi uu-

den polttoainekiskon ja uuden kaasuläpän. Japanilaisten valmistajien tuotteet eivät sisällä polttoainekiskoa, mutta kaasuläpän sisältävät. Ne ovat tällöin vielä kalliimpia kuin eurooppalaisen valmistajan. Hintaa tällä eurooppalaisen valmistajan sarjalla on 630 euroa. (54.)

Imusarjaan tulevan ilman lisäksi moottori tarvitsee polttoainetta. Polttoaine suihkutetaan suuttimien avulla imusarjaan. Lisättäessä moottorin suorituskykyä sylinteriin suihkutetaan enemmän polttoainetta, jolloin vakiosuuttimet jäävät tuotoltaan liian pieniksi. Jos polttoaineena käytetään vielä etanolia, joka lisää polttoaineen suihkutustarvetta, tulee hankkia uudet suuttimet. RB25DET NEO -moottorin vakiosuuttimet ovat kokoa 340 cc/min (15).

Suuttimien valinnassa hyödynnetään yhden suomalaisen suurimman suuttimien jälleenmyyjän, Finjector.com, suutinlaskuria (55). Suutinlaskuriin syötetään moottorin haluttu hevosvoimien määrä, suutinten määrä, moottorin kaasunvaihtojärjestelmä, vapaasti hengittävä vai ahdettu sekä käytettävä polttoaine. Syötetään laskuriin seuraavat arvot: tehotavoite on 700 hevosvoimaa, suutinten määrä on kuusi, moottori on turboahdettu ja polttoaineena käytetään etanolia. Laskuri antaa tällöin suuttimien tuottotarpeen kooksi 1 200—1 400 cc/min. (55.) Suuttimien koko mieluummin ylimitoitetaan, jotta moottorin parasta suorituskykyä tavoiteltaessa suorituskyvyn puute ei jää suuttimista kiinni. 1 200—1 400 cc/min laskurin tuloksen perusteella ja ylimitoituksen perusteella valitaan mieluummin 1 500 cc/min kokoiset suuttimet.

Finjector.com tarjoaa 1 500 cc/min koossa useampaa mallia. Näistä valitaan etanolin kestävä, imusarjaan ja polttoainekiskoon sopivat suuttimet sekä sopiva pistokkeen malli omaan johtosarjaan. Suuttimien hinnat ovat 1 500 cc/min kokoluokassa noin 150 euroa (56). Päivitettäessä polttoainesuuttimia kannattaa päivittää myös polttoainepumppu, jotta suuttimilta ei lopu polttoaine. Päivitettäessä polttoainepumppua tulee huomioida kyseisen pumpun sopivuus etanolille. Eri polttoainepumppumalleja tutkittiin ja päädyttiin valitsemaan Walbro GST520 -polttoainepumppu sen suuren tuottoisuuden ja etanolin keston kannalta. Lisäksi GST520-pumppu voidaan asentaa alkupeäräisen pumpun tilalle polttoainetankkiin. Hintaa Walbro GST520 -polttoainepumpulla on 150 euroa (57).

Imusarjaan tarvitsee asentaa turboahdetuissa moottoreissa blow-off- tai by-pass-venttiili. Kun kaasu nostetaan, imusarjaan jää turbon ahtama ylipaine. Tämä tulee poistaa joko blow-off- tai by-pass-venttiilillä. Ylipaine poistetaan, koska kaasuläpän sulkeutuessa ilma alkaa virrata takaisin päin turbolle ja kompressorin siiville. Tällöin takaisinpäin kulkeva ilma rasittaa ahtimen laakerointia sekä

hidastaa ahtimen pyörimisnopeutta ja sotkee virtauksen. Tämän seurauksena avattaessa kaasua syntyy turhaa viivettä. Blow-off-venttiili päästää paineaallon pois ahtoputkista suoraan ulkoilmaan. By-pass-venttiili taas kierrättää ilman takaisin ilmansuodattimelle ja siitä turbon imupuolelle. (58.)

Vertailtaessa eri valmistajien venttiileitä päädyttiin Turbosmartin GenV RacePort -blow-off-venttiiliin sen pienemmän kokonsa puolesta verrattuna muihin valmistajiin. Turbosmartin GenV RacePort blow-off-venttiilillä on hintaa 280 euroa. (59.)

4.5 Moottorinohjaus ja sytytysjärjestelmään liittyvät osat

Sytytyspuolat ja -tulpat vastaavat yhdessä ilma-polttoaineseoksen syttymisestä sylinterissä. Näin ollen ne ovat sytytysjärjestelmän tärkeimpiä osia. Moottoria viritettäessä voi vakiopuolilta tuleva teho jäädä joillakin kuormitustekijöillä vajaaksi, jolloin moottori ei käy kunnolla ja tulee sytytyshäiriöitä. Sytytyspuolat tulee päivittää, jotta sytytystulpalta tulee tarpeeksi tehokas kipinä sytyttääkseen ilma-polttoaineseoksen kaikilla moottorin kuormitusasteilla. Tutkittaessa eri sytytyspuolien päivityksiä, tuli esille, että yleisin RB-moottoreiden sytytyspuolien muutos oli päivittää sytytyspuolat Nissan GTR R35 -mallin sytytyspuoliin (60). R35:n sytytyspuolat tuottavat jopa kolme kertaa enemmän energiaa kuin RB-moottorin alkuperäiset sytytyspuolat (61; 62). Tällä sytytyspuola päivityksellä varmistetaan ilma-polttoaineseoksen syttyminen paremmin ja tasaisemmin kaikilla moottorin kuormitusasteilla. R35:n alkuperäisien sytytyspuolien hinta on 110 euroa kappaleelta (63).

Moottorinohjain on moottorin toiminnan kannalta tärkein osa käytettäessä elektronista sytytystä ja elektronista polttoaineen suihkutusta. Moottorinohjain toimii moottorin aivoina ohjaten sytytystä ja polttoaineen suihkutusta. RB-moottorin moottorinohjain on jo 20 vuotta vanha ja 20 vuodessa moottorinohjaimet ovat kehittyneet paljon. Alkuperäisessä moottorinohjaimessa eivät riitä tehot ja toiminnot, jotta kaikki moottorin muutokset voitaisiin käyttää hyväksi. Tällöin päivitetään alkuperäisen moottorinohjaimen tilalle jälkimarkkinoilta saatava moottorinohjain, jossa riittävät tehot ja toiminnot ohjaamaan moottoria ja saamaan siitä kaikki potentiaali ulos. Jälkimarkkinoilla on saatavilla moottorinohjaimia monelta toimittajalta. Suurimpia jälkimarkkina toimittajia ovat Motec, MaxxECU, Link Engine Management, Haltech, AEM Electronics, Ecumaster, Megasquirt ja Bosch Motorsport. Moottorinohjaimia vertailtiin eri valmistajilta. Vertailun päätteeksi päädyttiin valitsemaan MaxxECU Race -moottorinohjain sen toimintojen laajuuden puolesta. Myös MaxxECU Race -moottorinohjai-

men hinta verrattuna sen toimintoihin on halvempi kuin kilpailijoilla. Lisäksi MaxxECU tarjoaa tabletille asennettavan sovelluksen, jonka avulla voidaan seurata MaxxECU:n moottorinohjaimen toimintaa ja parametrejä. Muut moottorinohjainvalmistajat tarjoavat omaa näyttöä toteuttaakseen saman monitoroinnin. Hintaa Race-moottorinohjaimella on 1 250 euroa. (64.)

4.6 Jäähdytykseen liittyvät osat

Moottorin suorituskykyä lisättäessä moottorin tuottama lämpökuorma lisääntyy, jolloin moottorin vakiojäähdytin ja sen jäähdytysteho ei riitä pitämään moottoria tarpeeksi viileänä kovemmassa rasituksessa. Tällöin vakiojäähdytin päivitetään tehokkaaseen alumiinijäähdytimeen, jonka lämmönsiirtokyky on parempi sekä tehokkaammin suunniteltu kuin auton alkuperäisen jäähdyttimen. Mitä parempi jäähdytys, sen viileämpänä moottori käy. Moottorin käydessä viileämpänä moottoririkon sekä ylikuumentumisen vaara laskee. Moottorin lämpöjen pysyessä kurissa moottori myös reagoi herkemmin ja sen tehontuotto on parempi. Mishimotolla on tarjota suoraan vakiojäähdyttimen tilalle tehokas alumiinijäähdytin. Tällä jäähdyttimellä on hintaa 430 euroa. (65.)

Jäähdytin tarvitsee tuulettimet tehostaakseen jäähdyttimen läpi kulkevaa ilmavirtaa, jotta jäähdytin toimisi tehokkaasti. Tuulettimia tarvitaan, kun ajoneuvo on paikoillaan tai ajoviima ei ole auton liikkuessa tarpeeksi tehokas jäähdyttämään jäähdyttimessä kulkevaa nestettä. Mishimotolla on tarjolla suoraan alkuperäisen tuulettimen tilalle sähkötuuletinsarja jämekällä alumiinisella rakenteella. Mishimoton sähkötuuletinsarjalla korvataan moottoria kuormittava hihnan kautta pyöritettävä tuuletin. Hihnalla käytettävä tuuletin ottaa käyttövoimansa kampiakselilta ja syö tällöin kampiakselitehoa. Lisäksi sähkötuuletinta pystytään ohjaaman tarkemmin ja tehokkaammin tuuletinta tarvittavissa tilanteissa. Mishimoton sähkötuuletin kustantaa 300 euroa. (66.)

Moottorin jäähdytyksessä auttaa myös öljy. Liian lämmin öljy menettää voitelukykynsä, jolloin moottoririkko on mahdollinen. Öljyn lämmitessä sen viskositeetti muuttuu. Viskositeetti kertoo öljyn juoksevuuden. Liian kuuma öljy muuttuu liian juoksevaksi ja tällöin liian juokseva öljy ei välttämättä muodosta riittävä voitelukalvoa osien välille. Jos on vaarana liian kuumana käyvä öljy, tulee lisätä öljylle oma jäähdytin. Öljynjäähdytin tullaan lisäämään öljynkiertoon lisäelementiksi, jos näyttää siltä, että öljy käy liian kuumana käytettäessä moottoria.

4.7 Anturit

Moottorinohjain tarvitsee tiettyjä anturitietoja, että moottori toimisi kunnolla ja moottorinohjain toimisi tarkasti. Lisäksi on hyvä tarkkailla tiettyjä toimintoja antureilla, jotta voidaan seurata moottorin ja siihen liittyvien järjestelmien toimintaa. Näin voidaan havaita ajoissa, jos jollakin osa-alueella on ongelmia. Tällaisia tärkeitä antureita ovat kampiakselin ja nokka-akselin asentotunnistimet, joiden avulla moottorinohjain tietää, missä vaiheessa moottori on menossa. Jäähdytysneste-, öljyn-, ulkoilman-, imuilman- ja pakokaasujenlämpötila-anturit ovat tärkeitä antureita, jotta voidaan tarkkailla moottorin lämpöä. Lisäksi lämpötila-antureiden tietojen avulla moottorinohjain osaa laskea sylinteriin kulkevaa ilman määrän. Imusarjan-, öljyn- ja bensaapaineanturit antavat tärkeitä tietoja. Varsinkin öljynpaineanturi on tärkeä, koska siitä voidaan nähdä öljyn liikkuminen moottorissa. Nämä anturit tulee lisätä tai päivittää uusiin moottoria rakennettaessa, jotta varmistutaan niiden toiminnasta.

Polttoainelinjaan tulee asentaa etanolipitoisuusanturi, jotta moottorinohjain tietää tankatun polttoaineen laadun eli sen, mikä on bensiinin ja etanolin suhde. Etanolipitoisuustiedon perusteella moottorinohjain osaa muuttaa polttoaineen suihkutuskantaa kummallekin polttoaineella sopivaksi. Polttoaineen suihkutuskantaa vaikuttaa myös kaasuläpän asento, joten kaasuläpälle tulee asentaa kaasuläpän asentotunnistin.

5 YHTEENVETO VOIMALINJAN PÄIVITYKSESTÄ

Moottorin kaikki päivitettävät kohteet on käsitelty ja voidaan luoda osalista. Näillä osilla moottorin suorituskykyä pystytään lisäämään turvallisesti ilman, että moottori kärsisi moottoririkon jonkin osan heikkouden takia. Kaikki valitut osat ovat saatavilla jälkimarkkinoilta. Taulukkoon 2 on koottu päivitettävät osat ja niiden hinnat helposti luettavaksi listaksi.

TAULUKKO 2. Osalista

Moottorin kohde	Osa	Hinta
Männät	CP-Carrillo SC7296	1 300 €
Kiertokanget	Eagle CRS4783N3D	780 €
Laakerit	ACL Race -laakeripaketti	250 €
Korsetti	Platinum Racing Product RB25 wet sump block brace	1 000 €
Öljypumppu	Nismo N1 -öljypumppu	430 €
Öljypumpun vaihde	Supertec N1 Nismo billet spline drive gear kit	700 €
Hihnapyörä	Ross Performance Race -tasa- painottaja	550 €
Venttiilit	Ferrea F1934P ja F1936P	700 €
Venttiilijouset	Kelford Cams KVS25-NEO-Fer- rea	700 €
Nokka-akselit	Tomei Poncam 252	700 €
Jakohihna		160 €
Kannentiiviste	Cometic tiivistesarja RB25DET	300 €
Kannenpultit	ARP kansipulttiseti	250 €
Pakosarja	Walton Motorsport Nissan RB exhaust manifold	1 200 €

(jatkuu)

TAULUKKO 2. (jatkuu)

Moottorin kohde	Osa	Hinta
Turbo	Garrett G30-900	550 €
Hukkaportti	Turbosmart GenV Hypergate 45	410 €
Lambda-anturi	Bosch LSU 4.9	95 €
Välijäähdytin	Mishimoto R-line välijäähdytin	280 €
Imusarja	Turbo Works MP-KD-021	630 €
Suuttimet	1500 cc/min x 6 kpl	900 €
Polttoainepumppu	Walbro GST520	150 e
Blow-off-venttiili	Turbosmart GenV RacePort BOV	280 €
Sytytyspuolat	Hitachi R35 coil x 6 kpl	660 €
Moottorinohjain	MaxxECU Race	1 250 €
Jäähdytin	Mishimoto alumiinijäähdytin Skyline R34	430 €
Tuulettimet	Mishimoto sähköflekti Skyline R34	300 €
Osien hinta	Yhteensä	14 955 €

Osien yhteishinnaksi kertyy 15 000 euroa. Hinnasta selviää, ettei tässä opinnäytetyössä suunniteltu halpaa moottorin päivitystä. Valituilla osilla suunniteltiin tehotavoitteen kestävä moottori. Osalistasta puuttuu rakentamiseen tarvittavia osia kuten letkuja, antureita, liittimiä ja muita moottorin rakentamiseen tarvittavia materiaaleja.

6 POHDINTA

Opinnäytetyössä oli tarkoitus suunnitella harrasteajoneuvon voimalinjan päivitystä. Ajoneuvo oli Nissan Skyline R34 GT-T. Taustaa opinnäytetyölle oli halu parantaa auton suorituskykyä vakioista, koska auto on tällä hetkellä vakio eli tehdaskuntoinen. Voimalinjassa on monta osa-aluetta: moottori, kytkin, vaihteisto, kardaanit, tasauspyörästö, vetoakselit sekä pyörän ripustus että itse rengas, jonka välityksellä voima välittyy tiehen. Opinnäytetyössä keskityttiin yhteen osa-alueeseen, joka oli moottorin suorituskyvyn parantaminen. Opinnäytetyössä pyrittiin parantamaan moottorin teho- ja vääntöominaisuuksia suunnittelemalla vakio moottori uudelleen markkinoilta saatavilla osilla. Opinnäytetyössä käytettiin vakio moottoria suunnittelun lähtökohtana.

Opinnäytetyön tavoite oli parantaa harrasteajoneuvon kierrosaikaa moottoriradalla. Kierrosajan parannusta ei voinut todeta tämän opinnäytetyön puitteissa, koska opinnäytetyön aikana ei ollut mahdollisuutta rakentaa valmiista moottoria. Moottorin suorituskyvyn kasvaessa odotus on kierrosajan paraneminen, koska samaa massaa liikuttaa suurempi voima. Tässä opinnäytetyössä keskityttiin moottorin suorituskyvyn parantamiseen tekemällä valmis suunnitelma moottorin uudelleen rakentamiseksi osilla, joilla moottorin suorituskyky toivottavasti paranee. Moottorin suorituskyvyn paraneminen parantaa myös auton suorituskykyä rata kierroksella. Moottorin suorituskykytavoite oli 500 kilowattia, noin 700 hevosvoimaa ja 600 newtonmetria vääntöä. Moottorin suorituskykyä ei päästy testaamaan, koska moottoria ei päästy rakentamaan budjetin puitteissa. Suorituskykytavoite toimi suunnittelun mitoituksilähtökohtana. Opinnäytetyön tavoite oli luoda dokumentti, josta löytyy tilattavat osat moottorin päivitykseen.

Opinnäytetyön oppimistavoite oli opinnäytetyön tekijän ymmärryksen lisääntyminen polttomoottorin mekaniikasta ja siihen liittyvästä suunnittelusta. Oppimistavoitteeseen päästiin. Tekijä ymmärtää moottorin koostuvan monesta pienestä yksityiskohdasta, joita muuttamalla voidaan muuttaa moottorin toimintaa. Esimerkiksi nokka-akselien muutaman asteen ajoitusmuunnos muuttaa moottorin kaasunvaihtojärjestelmän toimintaa ja tällä muutoksella voidaan muuttaa huipputehon kohtaa. Huonoa tässä työssä on, ettei osamuutoksien toimivuutta voitu todeta käytännössä ja ymmärtää vielä paremmin osien muutoksen vaikutus moottorin käyttöön.

Voimansiirrosta on nyt moottorin päivitys suunniteltu. Seuraavina aiheina vuorossa olisi kytkimen päivityksen suunnittelu ja vaihdelaatikon optimointi.

LÄHTEET

1. Untinen, Jonne 2017. T332103-3003 Polttomoottoritekniikka 1 3 op. Opintojakson luennot ja luentomateriaalit syksyllä 2017. Oulu: Oulun ammattikorkeakoulu, tekniikan yksikkö.
2. Haataja, Mauri 2016. Polttomoottoritekniikan perusteet 5 op. Luentomateriaali. Oulu: Oulun yliopisto, koneensuunnittelun tutkimusryhmä. Saatuu käyttöön opettaja Jonne Untiselta syksyllä 2017.
3. Antilag system. 2021. Wikipedia. Saatavissa: https://en.wikipedia.org/wiki/Antilag_system. Hakupäivä: 24.4.2021.
4. Bang-bang, or anti-lag system. 2016. Rallycars.com. Saatavissa: <https://rallycars.com/technical-stuff/bang-bang-or-anti-lag-system/>. Hakupäivä: 4.5.2021.
5. Anti-lag how it works. 2021. Donut Media. Saatavissa: https://www.youtube.com/watch?v=l3fWANI_SsE. Hakupäivä: 4.5.2021.
6. Anti-lag valve explained. 2021. Turbosmart. Saatavissa: <https://www.turbosmart.com/news/what-is-the-anti-lag-valve/>. Hakupäivä: 24.4.2021.
7. Electric turbo innovation. 2021. Garrett motion. Saatavissa: <https://www.garrettmotion.com/electric-hybrid/garrett-e-turbo/>. Hakupäivä: 4.5.2021.
8. Under the skin: how e-turbos banish lag and help emissions. 2020. Autocar. Saatavissa: <https://www.autocar.co.uk/car-news/technology/under-skin-how-e-turbos-banish-lag-and-help-emissions>. Hakupäivä: 4.5.2021.
9. Niskanen, Perttu 2018. T332205 Polttomoottoritekniikka 2 5 op. Opintojakson luennot ja luentomateriaali keväällä 2018. Oulu: Oulun ammattikorkeakoulu, konetekniikan koulutusohjelma.
10. Nissan RB engine. 2021. Wikipedia. Saatavissa: https://en.wikipedia.org/wiki/Nissan_RB_engine#RB25. Hakupäivä: 24.4.2021.

11. RB25DET – everything you need to know. 2021. Drifted. Saatavissa: <https://www.drifted.com/rb25det/>. Hakupäivä: 4.5.2021.
12. RB25. 2021. Anycar. Saatavissa: <https://anycar.fandom.com/wiki/RB25>. Hakupäivä: 4.5.2021.
13. 2000 Nissan Skyline 2Door Sports Coupe 25GT Turbo (man. 5) (model since August 2000 for Japan) car specifications & performance data review. 2021. Automobile catalog. Saatavissa: https://www.automobile-catalog.com/car/2000/2138195/nissan_skyline_2door_sports_coupe_25gt_turbo.html. Hakupäivä: 24.4.2021.
14. 2000 Nissan Skyline 2Door Sports Coupe 25GT Turbo (man. 5) engine horsepower/torque curve. 2021. Automobile catalog. Saatavissa: https://www.automobile-catalog.com/curve/2000/2137790/nissan_skyline_2door_sports_coupe_25gt_turbo.html. Hakupäivä: 24.4.2021.
15. Nissan RB25DET Engine. 2021. WikiMotors. Saatavissa: <http://mywikimotors.com/rb25det/>. Hakupäivä: 24.4.2021.
16. Tomei RB26DETT VALC Poncam Camshaft Set - R34. 2019. Z1 Motorsport. Saatavissa: <https://www.z1motorsports.com/engine-parts/tomei/tomei-rb26dett-valc-poncam-camshaft-set-r34-p-11534.html>. Hakupäivä: 24.4.2021.
17. Platinum Racing Products - RD28 RB30 dry sump and RB25 wet sump block brace. 2021. Platinum Racing Products. Saatavissa: <https://platinumracingproducts.com/collections/rb-block-braces/products/rd28-rb30-dry-sump-and-rb25-wet-sump-block-brace-prec30d-2wd>. Hakupäivä: 16.5.2021.
18. Nissan Skyline RB25DET, ACL kiertokangen laakerit. 2021. Futurez. Saatavissa: <https://www.futurez.fi/product/85007-nissan-skyline-rb25det-acl-kiertokangen-laakerit>. Hakupäivä: 16.5.2021.
19. Nissan Skyline RB25DET, ACL runkolaakerit. 2021. Futurez. Saatavissa: <https://www.futurez.fi/product/85012-nissan-skyline-rb25det-acl-runkolaakerit>. Hakupäivä: 16.5.2021.

20. Search by application. 2021. Eagle Specialty Products. Saatavissa: http://www.eaglerod.com/index.php?option=com_content&task=view&id=33&Itemid=40. Hakupäivä: 16.5.2021.
21. About Eagle. 2021. Eagle Specialty Products. Saatavissa: http://www.eaglerod.com/index.php?option=com_content&task=view&id=22&Itemid=25. Hakupäivä: 16.5.2021.
22. Eagle kiertokankisarja, 6-sylinteriset. 2021. Futurez. Saatavissa: <https://www.futurez.fi/product/83858-eagle-kiertokankisarja-6-sylinteriset>. Hakupäivä: 16.5.2021.
23. CP-Carrillo product catalog. 2021. CP-Carrillo. Saatavissa: <https://cp-carrillo-catalog.cld.bz/CP-Carrillo-Catalog-Collection/CP-Carrillo-Product-Catalog/90/>. Hakupäivä: 16.5.2021.
24. N1 – Nismo billett spline drive gear kit. 2021. Supertec Racing. Saatavissa: <https://supertecracing.com/products/n1-nismo-spline-drive-kit-billet-back-plate?variant=32380549234736>. Hakupäivä: 16.5.2021.
25. Nismo N1 öljypumppu, Nissan Skyline RB25DET. 2021. Futurez. Saatavissa: <https://www.futurez.fi/product/84925-nismo-n1-oljypumppu-nissan-skyline-rb25det>. Hakupäivä: 16.5.2021.
26. Platinum Racing Products - RB oil gallery restrictors & bypass valve. 2021. Platinum Racing Products. Saatavissa: <https://platinumracingproducts.com/collections/rb-the-world/products/rb-oil-gallery-restrictors-bypass-valve?variant=33002618224776>. Hakupäivä: 16.5.2021.
27. Nissan RB – RB26 engine oil restrictor. 2021. Supertec Racing. Saatavissa: <https://supertecracing.com/products/nissan-rb-rb26-engine-oil-restrictor?variant=32379714895920>. Hakupäivä: 16.5.2021.
28. Harmonic dampers. 2021. Ross Performance Parts. Saatavissa: <https://rossperformanceparts.com/harmonic-dampers/>. Hakupäivä: 16.5.2021.

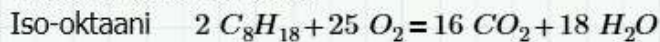
29. Nissan RB harmonic damper. 2021. Ross Performance Parts. Saatavissa: <https://rossperformanceparts.com/product/nissan-rb-harmonic-damper/>. Hakupäivä: 16.5.2021.
30. RB25 NEO valve train components. 2017. Kelford Cams. Saatavissa: <https://www.kelfordcams.com/global/valve-train-components/nissan/rb25-neo>. Hakupäivä: 16.5.2021.
31. RB25 NEO valve springs. 2017. Kelford Cams. Saatavissa: <https://www.kelfordcams.com/global/valve-springs/nissan/rb25-neo>. Hakupäivä: 16.5.2021.
32. Venttiilikoneisto. 2021. Futurez. Saatavissa: <https://www.futurez.fi/category/55-venttiilikoneisto>. Hakupäivä: 16.5.2021.
33. Camshaft RB25/20DE(T). 2021. Tomei powered inc. Saatavissa: https://www.tomei-p.co.jp/catalogue/cam_rb2520/. Hakupäivä: 16.5.2021.
34. Tomei Poncam Camshafts – Nissan Skyline / Silvia / 350Z / R32 / R33 / R34 / R35 / GTR. 2014. JDM Garage UK. Saatavissa: <https://www.jdmgarageuk.com/engine/engine-components/camshafts/tomei-pon-camshafts.html>. Hakupäivä: 16.5.2021.
35. Greddy vahvistettu jakohihna, Nissan Skyline R32 / R33 / R34. 2021. Futurez. Saatavissa: <https://www.futurez.fi/product/83922-greddy-vahvistettu-jakohihna-nissan-skyline-r32-r33-r34>. Hakupäivä: 16.5.2021.
36. Cometic moottorin tiivistesarja, Nissan Skyline RB25DET. 2021. Futurez. Saatavissa: <https://www.futurez.fi/product/83037-cometic-moottorin-tiivistesarja-nissan-skyline-rb25det>. Hakupäivä: 16.5.2021.
37. ARP kannenpultit, Nissan Skyline RB25ET. 2021. Futurez. Saatavissa: <https://www.futurez.fi/product/82340-arp-kannenpultit-nissan-skyline-rb25det>. Hakupäivä: 16.5.2021.
38. Pakosarjan rakenne ja toiminta. 2021. Martelius exhaust systems. Saatavissa: <https://martelius.com/tuotteet-ja-palvelut/pakosarjat/pakosarjan-rakenne-ja-toiminta>. Hakupäivä: 16.5.2021.

39. Pakosarjat. 2021. Futurez. Saatavissa: <https://www.futurez.fi/category/215-pakosarjat>. Hakupäivä: 16.5.2021.
40. Walton Motorsport Nissan RB exhaust manifold (RB20 RB25 RB26). 2020. Walton Motorsport Fabrication Ltd. Saatavissa: <https://www.waltonmotorsport.com/product/walton-motorsport-rb-turbo-manifold-rb20-rb25-rb26/>. Hakupäivä: 16.5.2021.
41. Viritysturbon valinta. 2021. Turbotekniikka. Saatavissa: <https://turbotekniikka.fi/viritysturbo-valinta/>. Hakupäivä: 16.5.2021.
42. Boost adviser. 2021. Garrett motion inc. Saatavissa: <https://www.garrettmotion.com/racing-and-performance/boost-adviser/>. Hakupäivä: 16.5.2021.
43. Holset HX40 Turbochargers. 2021. Holset turbochargers. Saatavissa: <http://www.myholset-turbo.com/holsethx40.html>. Hakupäivä: 16.5.2021.
44. G-series G30-900. 2021. Garrett motion inc. Saatavissa: <https://www.garrettmotion.com/racing-and-performance/performance-catalog/turbo/g-series-g30-900/>. Hakupäivä: 16.5.2021.
45. Holset HX40 Super. 2021. KKD motorsport. Saatavissa: https://www.kkdmotorsport.com/epages/kkdmotorsport.sf/fi_FI/?ObjectPath=/Shops/2017032906/Products/%22Holset%20HX40%20Super%22. Hakupäivä: 16.5.2021.
46. Garrett G30-900. 2021. KKD Motorsport. Saatavissa: https://www.kkdmotorsport.com/epages/kkdmotorsport.sf/fi_FI/?ObjectPath=/Shops/2017032906/Products/%22Garrett%20G30-900%22. Hakupäivä: 16.5.2021.
47. GenV HyperGate45 7psi external wastegate (black). 2021. Turbosmart. Saatavissa: <https://www.turbosmart.com/product/gen-v-wg45-hyper-gate45-7psi-black/>. Hakupäivä: 16.5.2021.
48. Laajakaista lambda-anturi, Bosch. 2021. JM Tuonti Oy. Saatavissa: <https://www.jmtuonti.fi/anturit/195148-laajakaista-lambda-anturi-bosch.html>. Hakupäivä: 16.5.2021.

49. Ilmansuodattimet. 2021. Futurez. Saatavissa: <https://www.futurez.fi/category/13-ilmansuodattimet>. Hakupäivä: 16.5.2021.
50. HKS Intercooler R-Type Nissan Skyline B(C)NR R32,33,34. 2021. AMWShop. Saatavissa: <https://amwshop.fi/hks/212-hks-intercooler-r-type-nissan-skyline-bcnr-r323334.html>. Hakupäivä: 16.5.2021.
51. Mishimoto universaalit välijäähdyttimet. 2021. Race Performance Oy. Saatavissa: <https://www.race.fi/fi/product/44706a/mishimoto-intercoolers>. Hakupäivä: 16.5.2021.
52. JDM Nissan RB25DET NEO engine Skyline motor RB25 NEO harness ECU RB25. 2015. JDM Engines Import. Saatavissa: <https://www.jdmenginesimport.com/details/726/nissan/jdm-nissan-rb25det-neo-engine-skyline-gts-r34-motor-rb25-neo-harness-ecu.html#prettyPhoto>. Hakupäivä: 16.5.2021.
53. Things you probably didn't know about the Skyline R32 RB26DETT engine. 2021. Drivetribe. Saatavissa: <https://drivetribe.com/p/things-you-probably-didnt-know-ftuuWjEoSpuLgZWJxE9IGg?iid=ANdOINBaQWisPzdKbqUXQg>. Hakupäivä: 16.5.2021.
54. Nissan RB26DET-moottorin CUSTOM imusarja. 2021. Björk Motorsport Ky. Saatavissa: http://www.bjorkmotorsport.fi/OrigamiDEAL/index.php?page=product_info&id=35670&cid=2379&path=0,888,2372,2379&lang=. Hakupäivä: 16.5.2021.
55. Suutinlaskuri. 2021. Finjector.com. Saatavissa: <https://www.finjector.com/fin/injectormatic>. Hakupäivä: 16.5.2021.
56. Haun tulokset: 1350—1650 cc/min, 14 mm. 2021. Finjector.com. Saatavissa: <https://www.finjector.com/fin/haku?flow=1500&bsfc=0.85&idc=0.8&frc=14&ile=0>. Hakupäivä: 16.5.2021.
57. Walbro polttoainepumppu 12V, HELLCAT, tuotto 525 l/h, letkulähtö 9.5 mm. 2021. Finjector.com. Saatavissa: https://www.finjector.com/fin/walbro_polttoainepumppu_12v_hellcat_tuotto_525_l_h_letkulahto_o_9_5_mm_erittain_tehokas_pumppu_virityskayttoon_ben-salle_ja_e85-p-731451-326. Hakupäivä: 16.5.2021.

58. Dumpit / By-pass. 2021. Futurez. Saatavissa: <https://www.futurez.fi/category/94-dumpit-by-pass>. Hakupäivä: 16.5.2021.
59. Turbosmart – GenV RacePort BOV. 2021. KKD motorsport. Saatavissa: https://www.kkdmotorsport.com/epages/kkdmotorsport.sf/fi_FI/?ObjectPath=/Shops/2017032906/Products/%22Turbosmart%20-%20GenV%20RacePort%20BOV%22. Hakupäivä: 16.5.2021.
60. R35 GT-R coilpack kits for RB, JZ, SR, CA and more – Platinum Tech. 2021. Motive Video. Saatavissa: https://www.youtube.com/watch?v=YKO8oBTs_Z0. Hakupäivä: 16.5.2021.
61. RB VR38 coil bracket kit (RB20, RB25, RB26). 2021. Platinum Racing Products. Saatavissa: <https://platinumracingproducts.com/products/rb-r35-vr38-coil-bracket-kit-rb20-rb25-rb26>. Hakupäivä: 16.5.2021.
62. Mega coilpack test and comparison R35, LS1, LQ9, Audi R8 and more – Platinum Tech. 2021. Motive Video. Saatavissa: <https://www.youtube.com/watch?v=4d3nrBZjYKA>. Hakupäivä: 16.5.2021.
63. Hitachi sytytyspuola. 2021. Autodoc-verkkokauppa. Saatavissa: <https://www.autodoc.fi/hitachi/14574371>. Hakupäivä: 16.5.2021.
64. MaxxECU Race / Race H2O. 2020. MaxxECU. Saatavissa: <https://www.maxxecu.com/products/race>. Hakupäivä: 16.5.2021.
65. Mishimoto alumiinijäähdytin, Nissan Skyline R34 (RB25 ER34) (man.) vm. 98—02. 2021. Futurez. Saatavissa: <https://www.futurez.fi/product/88679-mishimoto-alumiinijaahdytin-nissan-skyline-r34-rb25-er34-man-vm-98-02>. Hakupäivä: 16.5.2021.
66. Mishimoto sähköflekti-sarja, Nissan Skyline GT-S R34 (RB25, ER34) vm. 98—02. 2021. Futurez. Saatavissa: <https://www.futurez.fi/product/88768-mishimoto-sahkoflekti-sarja-nissan-skyline-gt-s-r34-rb25-er34-vm-98-02>. Hakupäivä: 16.5.2021.

Teoreettinen ilmantarve



$$\text{Ilma} \quad O_2 = 21 \text{ til\%} \quad \text{atomimassa} \quad m_o := 2 \cdot 21 \cdot 16 = 672$$

$$N_2 = 78 \text{ til\%} \quad \text{atomimassa} \quad m_n := 2 \cdot 78 \cdot 14.01 = 2.186 \cdot 10^3$$

$$\text{Hapen massaprosentti ilmasta} \quad \frac{m_o}{m_n + m_o} = 0.235$$

$$M(C_8H_{18}) = 114.224 \quad \frac{g}{mol}$$

$$M(O_2) = 32.00 \quad \frac{g}{mol}$$

x=hiilivety y=happi z=ilma

$$\text{Hapen määrä ilmassa} \quad 0.235 z = y$$

$$z = \frac{y}{0.235}$$

$$\text{Teoreettinen ilmantarve} \quad \frac{z}{x} = \frac{\left(\frac{y}{0.235} \right)}{x} = \frac{y}{0.235 x}$$

$$\text{Teoreettinen ilmantarve iso-oktaani} \quad \text{Hiilivedyn määrä} \quad x := 2 \cdot 114.224 = 228.448$$

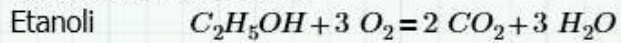
Hapen määrä

$$y := 25 \cdot 32 = 800$$

$$\frac{y}{0.235 \cdot x} = 14.902$$

Vast: 1kilogramma polttoainetta (iso-oktaani) tarvitsee 14.9kilogrammaa ilmaa palaakseen täydellisesti

Teoreettinen ilmantarve



Ilma $O_2 = 21 \text{ til\%}$ atomimassa $m_o := 2 \cdot 21 \cdot 16 = 672$

$N_2 = 78 \text{ til\%}$ atomimassa $m_n := 2 \cdot 78 \cdot 14.01 = 2.186 \cdot 10^3$

Hapen massaprosentti ilmasta $\frac{m_o}{m_n + m_o} = 0.235$

$M(C_2H_5OH) = 46.068 \frac{g}{mol}$

$M(O_2) = 32.00 \frac{g}{mol}$

x=hiilivety y=happi z=ilma

Hapen määrä ilmassa $0.235 z = y$
 $z = \frac{y}{0.235}$

Teoreettinen ilmantarve $\frac{z}{x} = \frac{\left(\frac{y}{0.235}\right)}{x} = \frac{y}{0.235 x}$

Teoreettinen ilmantarve etanoli Hiilivedyn määrä $x := 46.068$

Hapen määrä $y := 3 \cdot 32 = 96$

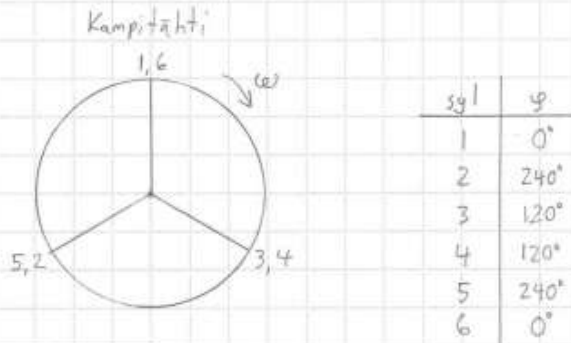
$\frac{y}{0.235 \cdot x} = 8.868$

Vast: 1kilogramma polttoainetta (etanoli) tarvitsee 8.87kilogrammaa ilmaa palaakseen täydellisesti

Massatasapainotuksen tarpeen tarkastus

Nissan RB26DET rivi katonen sytytysjärjestys: 1-5-3-6-2-4

Sytytysväli: $\frac{360^\circ}{6} = 120^\circ$



1. Pyörivät massavoimat ΣF_p

yksikkövektori: $F_p = m_p \cdot \omega^2 \cdot r$

$$\begin{aligned} \Sigma F_{px} &= F_{px1} + F_{px2} + F_{px3} + F_{px4} + F_{px5} + F_{px6} = F_p \cdot \sin 0^\circ + F_p \cdot \sin 240^\circ + F_p \cdot \sin 120^\circ + F_p \cdot \sin 120^\circ + F_p \cdot \sin 240^\circ + F_p \cdot \sin 0^\circ \\ &= F_p \cdot (0 - 0,866 + 0,866 + 0,866 - 0,866 + 0) = 0 \cdot F_p = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Sigma F_{py} &= F_{py1} + F_{py2} + F_{py3} + F_{py4} + F_{py5} + F_{py6} = F_p \cdot \cos 0^\circ + F_p \cdot \cos 240^\circ + F_p \cdot \cos 120^\circ + F_p \cdot \cos 120^\circ + F_p \cdot \cos 240^\circ + F_p \cdot \cos 0^\circ \\ &= F_p \cdot (1 - 0,5 - 0,5 - 0,5 - 0,5 + 1) = 0 \cdot F_p = 0 \end{aligned}$$

$$\text{Resultantti} \quad \Sigma F_p = \sqrt{(\Sigma F_{px})^2 + (\Sigma F_{py})^2} = \sqrt{0^2 + 0^2} = 0$$

Ei tarvita kamppiselän vastapainoja tämän voimakomponentin tasapainottamiseen

2. Ensimmäisen kertaluvun edestakaiset massavoimat ΣF_{e1}

yksikkövektori: $F_{e1} = m_p \cdot \omega^2 \cdot r$

Edestakaisin liikkuvien voimien vaikutussuunta on sylinterin tasossa \rightarrow Riittää laskea y-suuntainen voimakomponentti

$$\Sigma F_{ey} = F_{ey1} \cdot \cos 0^\circ + F_{ey2} \cdot \cos 240^\circ + F_{ey3} \cdot \cos 120^\circ + F_{ey4} \cdot \cos 120^\circ + F_{ey5} \cdot \cos 240^\circ + F_{ey6} \cdot \cos 0^\circ = F_{e1} \cdot (1 - 0,5 - 0,5 - 0,5 - 0,5 + 1) = 0 \cdot F_{e1} = 0$$

3. Toisen kertaluvun edestakaiset massavoimat $\sum F_{e2}$

$$\text{yksikkövektori: } F_{e2} = m_e \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \lambda$$

Sama ehto pätee kuin ensimmäisen kertaluvun edestakaisten massavainien laskussa

$$\begin{aligned} \sum F_{e2} &= F_{e2} \cdot \cos(2 \cdot 0^\circ) + F_{e2} \cdot \cos(2 \cdot 240^\circ) + F_{e2} \cdot \cos(2 \cdot 120^\circ) + F_{e2} \cdot \cos(2 \cdot 120^\circ) + F_{e2} \cdot \cos(2 \cdot 240^\circ) + F_{e2} \cdot \cos(2 \cdot 0^\circ) \\ &= F_{e2} \cdot (1 - 0,5 - 0,5 - 0,5 - 0,5 + 1) = 0 \cdot F_{e2} = 0 \end{aligned}$$

4. Pyörivien massavainien momentti $\sum M_p$

$$\text{yksikkövektori: } M_p = F_p \cdot L = m_p \cdot \omega^2 \cdot r \cdot L$$

Tarkastus: vastaava voimasumma $\sum F_p = 0$

Lasketaan taulukossa 0-pisteen suhteen

syli	φ	momentti-arsi	$M_{px} = M_p \cdot L \cdot \sin \varphi$	$M_{py} = M_p \cdot L \cdot \cos \varphi$
1	0°	1	$1 \cdot \sin 0^\circ$	$1 \cdot \cos 0^\circ$
2	240°	2	$2 \cdot \sin 240^\circ$	$2 \cdot \cos 240^\circ$
3	120°	3	$3 \cdot \sin 120^\circ$	$3 \cdot \cos 120^\circ$
4	120°	4	$4 \cdot \sin 120^\circ$	$4 \cdot \cos 120^\circ$
5	240°	5	$5 \cdot \sin 240^\circ$	$5 \cdot \cos 240^\circ$
6	0°	6	$6 \cdot \sin 0^\circ$	$6 \cdot \cos 0^\circ$
			$\sum M_{px} = 0$	$\sum M_{py} = 0$

$$\text{Resultantti: } \sum M_p = \sqrt{(\sum M_{px})^2 + (\sum M_{py})^2} = \sqrt{0^2 + 0^2} \cdot M_p = 0 \cdot M_p = 0$$

Ei kohdistu momenttia \rightarrow Ei tarvitse tasapainoa

5. Ensimmäisen kertaluvun edestakaisten massojen momentti $\sum M_{e1}$

$$\text{yksikkövektori: } M_{e1} = F_{e1} \cdot L = m_e \cdot \omega^2 \cdot r \cdot L$$

Tarkastus: vastaava voimasumma $\sum F_{e1} = 0 \rightarrow$ voi laskea 0-pisteen suhteen

Lasketaan kuten kohta 4. edellä

$$\sum M_{e1} = 0$$

6. Toisen kertaluvun edestakaisten massavoimien momentti $\sum M_{e2}$

yksikkövektori: $M_{e2} = F_{e2} \cdot L = m_{e2} \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \lambda \cdot L$

Tarkastus: vastaava voimasumma $\sum F_{e2} = 0 \rightarrow$ voi laskea 0-pisteen suhteen

syl	φ	momentti- vars	$M_{e2x} =$	$M_{e2y} =$
			$M_{e2} \cdot L \cdot \sin(\varphi)$	$M_{e2} \cdot L \cdot \cos(\varphi)$
1	0°	1	$1 \cdot \sin(2 \cdot 0^\circ)$	$1 \cdot \cos(2 \cdot 0^\circ)$
2	240°	2	$2 \cdot \sin(2 \cdot 240^\circ)$	$2 \cdot \cos(2 \cdot 240^\circ)$
3	120°	3	$3 \cdot \sin(2 \cdot 120^\circ)$	$3 \cdot \cos(2 \cdot 120^\circ)$
4	120°	4	$4 \cdot \sin(2 \cdot 120^\circ)$	$4 \cdot \cos(2 \cdot 120^\circ)$
5	240°	5	$5 \cdot \sin(2 \cdot 240^\circ)$	$5 \cdot \cos(2 \cdot 240^\circ)$
6	0°	6	$6 \cdot \sin(2 \cdot 0^\circ)$	$6 \cdot \cos(2 \cdot 0^\circ)$
			$\sum M_{e2x} = 0$	$\sum M_{e2y} = 0$

Resultantti: $\sum M_{e2} = \sqrt{(\sum M_{e2x})^2 + (\sum M_{e2y})^2} = \sqrt{0^2 + 0^2} \cdot M_{e2} = 0 \cdot M_{e2} = 0$

Ei kohdistu momenttia \rightarrow Ei tarvitse tasapainottaa