



LAHDEN AMMATTIKORKEAKOULU
Lahti University of Applied Sciences

OTTOMOOTTORIN SUORITUSKYVYN PARANTAMINEN PAKOKAASUAHTIMELLA

Suzuki GSX1300R Hayabusa

LAHDEN
AMMATTIKORKEAKOULU
Tekniikan ala
Kone- ja tuotantotekniikka
Mekatroniikka
Opinnäytetyö
Kevät 2012
Toni Sievänen

Lahden ammattikorkeakoulu
Kone- ja tuotantotekniikka

SIEVÄNEN, TONI:

Ottomoottorin suorituskyvyn
parantaminen pakokaasuahdimella
Suzuki GSX1300R Hayabusa

Mekatroniikan opinnäytetyö, 76 sivua, 16 liitesivua

Kevät 2012

TIIVISTELMÄ

Tässä opinnäytetyössä suunnitellaan ja toteutetaan Suzuki GSX1300R Hayabusa-moottoripyörän muuttaminen pakokaasuahdimelle. Työn tärkein tavoite on oppia lisää moottoritekniikasta ja erityisesti turboahdamisen tuomista mahdollisuuksista. Kehitystyön konkreettinen tavoite on saada kasvatettua moottorin tuottama teho 300 hv kampiakselilta mitattuna ja päivittää kaikki moottorin osa-alueet vastaamaan kasvanutta tehoa.

Opinnäytetyön puitteissa aika ei riitä kaikkien muutoksien tekemiseen, joten osittain esitetään suunnitelma siitä, miten asia tullaan myöhemmin toteuttamaan. Ihanteellisesti moottoripyörä saataisiin työn valmistuttua ajettua dynamometrissä ja kasvanut teho näin todennettua.

Työn alussa käydään läpi yleistä asiaa polttomoottoreista ja niiden jaottelusta. Tämän jälkeen esitellään projektin kohteena olevan moottoripyörän taustoja ja kerrotaan yksityiskohtaisesti vakiokuntoisen moottorin rakenteesta ja toiminnasta. Varsinaisessa suorituskyvyn parantamiseen keskittyvässä osiossa käydään läpi ahdetun moottorin suunnitteluun liittyviä yleisiä asioita, minkä jälkeen käydään erikseen läpi moottorin kaikki osa-alueet ja niihin tehtävät parannukset.

Moottorin mekaanisten muutosten jälkeen moottorinohjaus on säädettävä uudelleen vastaamaan uutta kokoonpanoa. Työn lopuksi kerrotaan moottorinohjaukseen tehtävistä muutoksista ja lisärikastusyksikön asentamisesta.

Kaiken kaikkiaan projekti onnistui hyvin. Oppimista on selvästi tapahtunut, ja myös moottori on saatu lähes käyntikuntoon. Täysin valmiiksi sitä ei kuitenkaan saatu ja kasvanutta tehoa ei siten ehditty todentaa mittaamalla dynamometrissä.

Avainsanat: pakokaasuahdin, turbo, moottori, teho

Lahti University of Applied Sciences
Faculty of Technology

SIEVÄNEN, TONI:

Enhancing the performance of a petrol
engine by supercharging
Suzuki GSX1300R Hayabusa

Bachelor's Thesis in Mechatronics

76 pages, 16 appendices

Spring 2012

ABSTRACT

This thesis is about engineering challenges of turbocharging the Suzuki GSX1300R Hayabusa-motorcycle engine. The most important goal was to learn more about the functioning of an internal combustion engine and turbocharging. The concrete aim was to get the engine to produce 300 hp, measured from the crankshaft, and to build the rest of the motor to be strong enough to hold the increased amount of power.

Due to limited time of making this thesis, there was not enough time to complete all sections of the motor. That is why occasionally there is only a plan showing how things will be put into practice. Ideally the motorcycle would be tested on a dynamometer and so the increased power could be proved.

In the beginning there is a brief introduction to combustion engines describing how they differ from each other. Also the operational principles of a reciprocating engine and an Otto-cycle-engine are explained. The following section is about Hayabusa motorcycles and about their engine in particular. All parts and their function inside the engine are presented.

Before sizing the turbo and enhancing Hayabusa's performance there is a short section on the theory and principles of the forced induction. This section explains why installing a turbo does not necessarily send the crank south, to quote Corky Bell. Finally, when the engine is mechanically complete it needs to be tuned. The last section is dedicated to the engine management system and tuning.

All in all, the project succeeded well. The motor is almost completely built though there was not enough time to run it on a dynamometer and prove the increased power.

Key words: turbocharger, turbo, Internal combustion engine, power

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	1
2	YLEISTIETOA MÄNTÄMOOTTOREISTA	3
2.1	Otto- ja dieselmoottori	3
2.2	Ottomoottorin toimintaperiaate	4
2.3	Työkierron tahdit	5
2.3.1	Nelitahtimoottori	5
2.3.2	Kaksitahtimoottori	6
2.4	Moottorien rakenteet	6
3	YLEISTIETOA PROJEKTIN KOHTEESTA	7
3.1	Moottori	9
3.2	Polttoainejärjestelmä	12
3.3	Moottorin ohjausjärjestelmä	13
3.3.1	Toiminta	13
3.3.2	Anturointi	14
4	MOOTTORIN SUORITUSKYVYN PARANTAMINEN	15
4.1	Pakokaasuahdin bensiinimoottorissa	15
4.1.1	Rakenne	16
4.1.2	Mitoitus	18
4.1.3	Ilmamäärän laskeminen	19
4.1.4	Valinta	22
4.1.5	Asennus	27
4.2	Turbomoottorin muut osat	28
4.2.1	Ilmansuodatin	28
4.2.2	Välijäähdytys	30
4.2.3	Hukkaportti	34
4.2.4	Pakosarja	36
4.2.5	Pakoputkisto	41
4.2.6	Painekotelo	43
4.3	Moottorin mekaniikka	46
4.3.1	Puristussuhde	47
4.3.2	Männät	49
4.3.3	Nokka-akselit	52
4.3.4	Kiertokanget	53

4.3.5	Voimansiirto	53
4.3.6	Vaihteisto ja öljyvoitelu	54
4.3.7	Huolto	56
4.4	Polttonejärjestelmä	57
4.5	Moottorinohjaus	62
4.5.1	Säätäminen	62
4.5.2	Lisärikastus	64
4.5.3	Ecu-editor	65
5	YHTEENVETO	68
5.1	Kustannusten hallinta	69
5.2	Jatkokehitys	70
	LÄHTEET	72
	LIITTEET	77

LYHENTEET JA YKSIKÖT

AFR	Air-Fuel Ratio
BSFC	Brake Specific Fuel Consumption
CFM	Cubic Feet per Minute = ft ³
CID	Cubic Inch = In ³
CKP	Crankshaft Position Sensor
CMP	Camshaft Position Sensor
ECT	Engine Coolant Temperature Sensor
ECU	Engine Control Unit
IAP	Intake Air Pressure Sensor
IAT	Intake Air Temperature Sensor
lb/min	Pounds per Minute
MAP	Manifold Absolute Pressure
psi	Pound-force per Square Inch
psia	Pound-force per Square Inch (Absolute)
RPM	Revolutions per Minute
TOS	Tip Over Sensor
TPS	Throttle Position Sensor
VDC	Volts Direct Current
VE	Volymetric Efficiency

1 JOHDANTO

Opinnäytetyön aiheena on ottomoottorin suorituskyvyn parantaminen pakokaasuahtimella. Käyttämällä moottorissa pakokaasu- eli turboahdinta voidaan saavuttaa moninkertaisesti enemmän tehoa samankokoiseen vapaasti hengittävään moottoriin verrattuna. Tämä johtuu siitä, että vapaasti hengittävässä moottorissa sylinterin täytös jää yleensä alle 100 %:n. Turboahdetussa moottorissa hyödynnetään muuten hukkaan menevän pakokaasun energiaa ja sen avulla pyritetään ahdinta, joka ahtaa sylinteriin enemmän ilmaa. Suuremman ilmamäärän vuoksi sylinteriin voidaan myös syöttää enemmän polttoainetta. Tällöin moottorista saadaan enemmän tehoa, kun sylintereissä saadaan poltettua enemmän polttoainetta. Myös autonvalmistajien nykytrendi vaikuttaa olevan siirtyminen yhä pienemmällä tilavuudella oleviin turboahdettuihin moottoreihin.

Vaikka ahdetusta moottorista on mahdollista saada esimerkiksi 100 % enemmän tehoa kuin vastaavan kokoisesta vapaasti hengittävästä moottorista, on silti mahdollista, ettei näinkään suurella tehollisuudella moottoriin kohdistuvat voimat kuitenkaan kaksinkertaistu. Tämän vuoksi varsinkin maltillisilla tehollisuuksilla on mahdollista ahtaa moottori, ilman että suurta osaa sen komponenteista ei tarvitse vaihtaa kestävämpiin. Tämä johtuu siitä, että teho muodostuu pohjimmiltaan sylinterissä työtahdin aikana vallitsevasta keskipaineesta, eikä sylinterin maksimipaine nouse paljoa. Sen sijaan ahdetussa moottori paine vaikuttaa pidempään ja on kuitenkin koko ajan vapaasti hengittävää moottoria korkeampi. Tämän vuoksi ahdetun moottorin ongelmat ovat yleensä lämmönhallintaan liittyviä.

Bensiinimoottorin turboahtamiseen tutustutaan opinnäytetyön aikana käytännön esimerkin kautta suunnittelemalla ja toteuttamalla muutokset Suzuki GSX1300R Hayabusa-moottoripyörään. Opinnäytetyön puitteissa ei oteta kantaa moottoripyörän suorituskyvyn parantamiseen, vaan siinä käsitellään ainoastaan moottorin suorituskyvyn, eli käytännössä tehon, kasvattamista. Tämän vuoksi esimerkiksi alustan ja moottorin ulkopuolisten osien muutokset rajataan kokonaan työn ulkopuolelle, vaikka myös niihin tarvitsee tehdä parannuksia kasvaneen tehon vuoksi.

Projektin haastavuutta lisää se, että se viedään läpi täysin omarahoitteisesti. Tarkkoja rakentamiseen käytettyjä euromääriä ei mielestäni ole tarpeellista tuoda ilmi, mutta hyvän käsityksen projektin kustannuksista saa opinnäytetyön liitteenä olevasta taulukosta (LIITE 5), jossa kulut on jaettu osa-alueittain. On syytä huomata, että kuluja on saatu pienennettyä merkittävästi tekemällä osia itse, tilaamalla niitä ulkomailta ja hankkimalla osa niistä käytettyinä. Arvioni mukaan tällä tavalla olen saanut pienennettyä kokonaiskustannuksia noin 20 – 25 % verrattuna siihen, että osat olisi ostettu valmiina kaupasta tai teetetty ulkopuolisilla.

Itse tekemällä olen saavuttanut paitsi suuren säästön, myös saanut hyvää suunnittelukokemusta ja kehittänyt käytännön taitoja. Osien suunnittelussa olen käyttänyt apuna Solid Works 3D -ohjelmistoa, jolla on tehty myös osien piirustukset niiden valmistamiseksi. Työn aikana olen suunnittelun lisäksi muun muassa hitsannut, sorvannut, koneistanut, pinnoittanut, maalannut ja asentanut osia eli tehnyt kaikkea, mitä teollisuudenkin koneenrakennukseen olennaisesti kuuluu. Tämän lisäksi olen tutustunut paikallisiin oman alan yrityksiin, joissa olen teettänyt osia ja hankkinut tarvikkeita ja työkaluja.

Yksi tämän opinnäytetyön haasteista liittyy projektin hallintaan ja sen rajaukseen. Aihe on laaja ja ennen projektin aloittamista vain pintapuolisesti tuttu, minkä vuoksi jo ahdetun moottorin sielunelämään tutustuminen oli iso urakka. Kun aloitin projektin heinäkuussa 2011, tiesin turbotekniikasta vain hyvin pintapuolisesti. Tärkeimpinä suunnan näyttäjinä ovat toimineet A. Graham Bellin ja Corky Bellin kirjoittamat englanninkieliset kirjat, joiden yhteenlasketussa yli 700 sivun sisällössä on riittänyt opiskeltavaa pitkäksi aikaa. Kirjallisuuden lisäksi kaikkein tuoreinta tai Hayabusaan liittyvää tietoa etsiessä olen joutunut usein turvautumaan internetistä löytyvään tietoon, jolloin on osoittautunut tärkeäksi löytää luotettava ja ajantasainen lähde.

2 YLEISTIETOA MÄNTÄMOOTTOREISTA

Mäntämoottori on yksi yleisimmistä polttomoottorityypeistä. Polttomoottoriksi kutsutaan määritelmän mukaan konetta, jonka avulla polttoaine ja hapetin muute-
taan eksotermisen kemiallisen reaktion eli palamisen vaikutuksesta mekaaniseksi
energiaksi. Termodynaamisessa prosessissa palamisesta vapautuva kuuma kaasu
johdetaan männälle, siivelle tai suuttimelle. (Proctor 2011; Mauno 2002, osio 1,
sivu 2.)

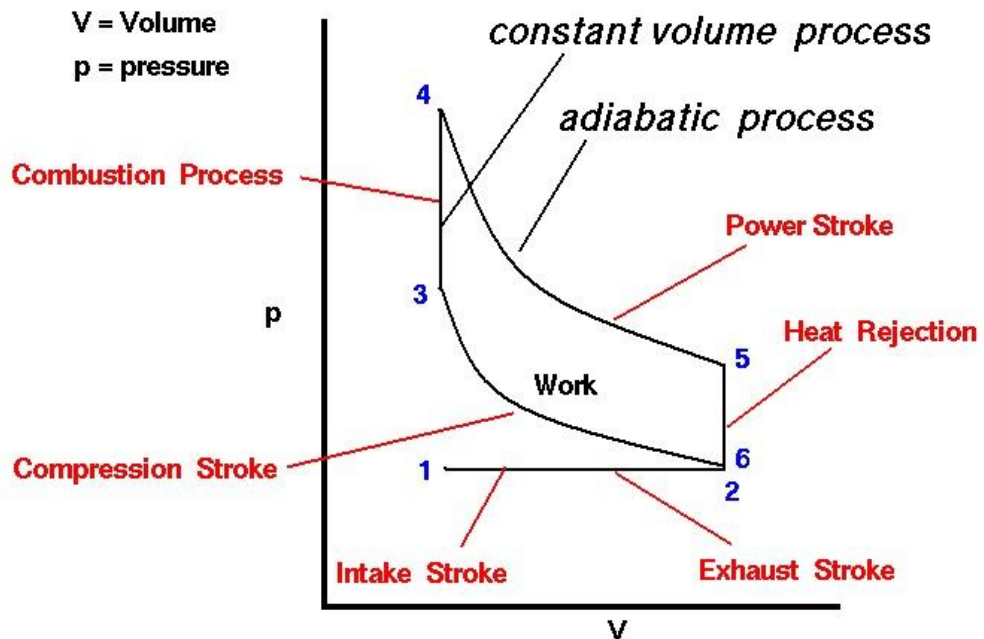
Polttomoottorit jaetaan kahteen ryhmään sen perusteella, tuotetaanko lämpö ko-
neen sisällä kemiallisesti (internal combustion engine) vai tuodaanko se välittäjä-
aineen, kuten höyryn, avulla koneen ulkopuolelta (external combustion engine).
Höyrykoneelle ja muille jälkimmäisen tyyppin edustajille on tyypillistä normaalissa
paineessa tapahtuva palaminen. Polttomoottorit voidaan jakaa kahtia myös sen
perusteella, poltetaanko polttoainetta jatkuvasti suihkumoottoreiden tapaan vai
tapahtuuko palaminen jaksoittain, kuten mäntämoottoreissa. (Proctor 2011.)

2.1 Otto- ja dieselmoottori

Mäntämoottorille (reciprocating engine) on ominaista lineaarinen ja edestakainen
männän liike. Mäntämoottorit jaetaan edelleen otto- ja dieselmoottoreihin. Otto-
moottoria kutsutaan usein myös bensiinimoottoriksi yleisimmän käytettävän polt-
tonesteen mukaan. Bensiinimoottorissa polttoaineseos muodostetaan perinteisesti
sylinterin ulkopuolella, tuodaan sylinteriin puristettavaksi kasaan ja sytytetään
oikealla hetkellä sähkövirralla erillisen sytytystulpan avulla. Dieselmoottorissa
puristetaan kasaan pelkkää ilmaa käyttäen korkeampaa puristussuhdetta ja poltto-
neste ruiskutetaan suoraan sylinteriin, jolloin se syttyy korkean lämpötilan vuoksi
itsestään. (NFCRC 2009; Bioenergiatieto 2011.)

2.2 Ottomoottorin toimintaperiaate

Bensiinimoottorin toiminta perustuu monivaiheiseen termodynaamiseen Otto-kiertoon, jota havainnollistamaan on kuviossa 1 esitetty ideaalisen Otto-kierron paine-tilavuus diagrammi. Kuvioista huomataan, miten paine ja tilavuus palotilassa muuttuu kierron eri vaiheissa. Kuviossa ei ole huomioitu kitkasta ja muista tekijöistä johtuvia häviöitä, minkä vuoksi työtä kuvaava alue on suurempi kuin todellisesti.



KUVIO 1. Ideaalisen Otto-kierron paine-tilavuus diagrammi (Benson 2008)

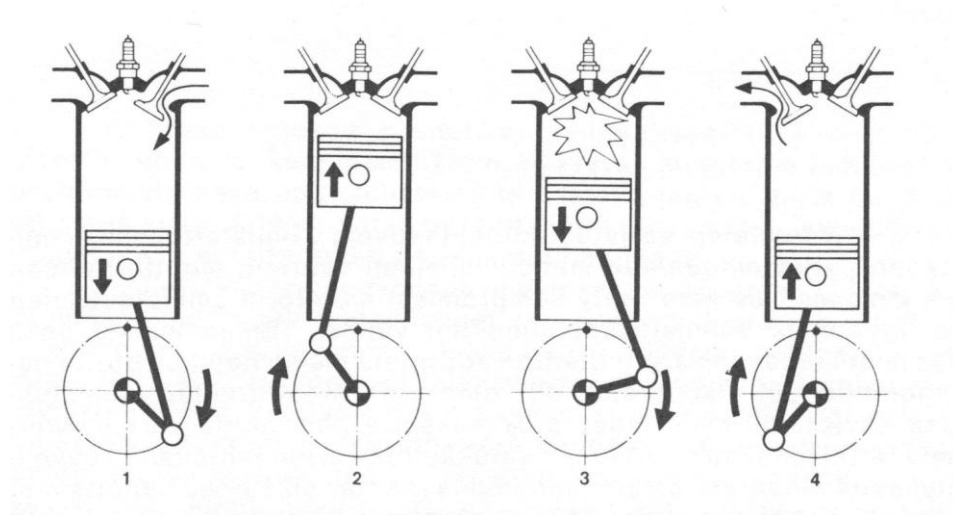
Bensiinimoottori tarvitsee toimiakseen oikeanlaisen paineistetun ilman ja polttoaineen seoksen. Polttoaineseos muodostetaan sylinterin ulkopuolella ja johdetaan palotilaan (välillä 1-2), jolloin palotilan kasvava tilavuus vetää polttoaineseosta sylinteriin. Tämän jälkeen seos puristetaan kasaan (välillä 2-3), jolloin tilavuus pienenee ja paine kasvaa. Syttymisen jälkeen seos kuumenee ja laajenee voimakkaasti aiheuttaen paineen, joka liikuttaa mäntää ja tekee työtä (vaiheet välillä 3-6). Lopuksi mäntä työntää pakokaasun pois sylinteristä (välillä 6-1). (Mauno 2002, osio 1, sivu 2; Benson 2008.)

2.3 Työkierron tahdit

Mäntämoottorin yhdessä työkierrossa olevien vaiheiden määrää kuvataan tahdeilla. Mäntätoimiset polttomoottorit ovat lähes poikkeuksetta 2- tai 4-tahtisia. Mainittakoon kuitenkin, että 5- ja 6-tahtisia moottoreita on kehitetty 4-tahtisten pohjalta, joiden ideana on useimmiten hyödyntää muutoin hukkaa menevää lämpöenergiaa. (Mauno 2002, osio 1, sivu 11; Ilmor Engineering 2011; Lyons 2006.)

2.3.1 Nelitahtimoottori

Nelitahtimoottorissa käytetään yleensä lautastyypisiä venttiilejä ohjaamaan kaasujen virtausta. Imuventtiilin kautta virtaa uusi polttoaineseos ja pakoventtiilin kautta poistuu pakokaasu. Venttiileitä avataan ja suljetaan erilaisten mekanismien välityksellä niin, että syntyy neljä vaihetta moottorin toiminnassa kahden kampuksen kierroksen aikana. Työkierron vaiheet on esitetty kuviossa 2. (Mauno 2002, osio 1, sivu 11.)



KUVIO 2. Nelitahtimoottorin työkierto, jossa järjestyksessä imu-, puristus-, työ- ja pakotahdi (Mauno 2005, 6)

Nelitahtisen moottorin kierto alkaa imutahdista, kun mäntä liikkuu kampuksella kohti ja imuventtiili on auki. Imutahdin aikana kasvava tilavuus imee mukanaan

polttoaineseosta. Imutahtia seuraa puristustahti, jolloin venttiilit ovat kiinni ja mäntä puristaa seoksen kasaan nostaen painetta ja lämpötilaa. Vasta kolmannen, eli työtahdin, aikana tehdään varsinainen työ, kun polttoaineseos sytytetään männän ollessa lähellä ylintä kohtaansa. Tällöin paine ja lämpötila palotilassa nousee nopeasti ja mäntään kohdistuva paine alkaa työntää mäntää kohti kampiakselia. Viimeisen eli pakotahdin aikana mäntä työntää palamiskaasut pakuventtiilin kautta pois palotilasta uuden kierron alkamista varten. (Mauno 2002, osio 1, sivu 11.)

2.3.2 Kaksitahtimoottori

2-tahtisessa moottorissa ei ole erillistä pakotahtia, vaan palamiskaasut poistetaan työtahdin lopussa. Samanaikaisesti sylinteriin johdetaan toista kanavaa pitkin esipaineistettua polttoaineseosta, joka samalla auttaa huuhtelemaan jäljelle jääneitä palamiskaasuja. Näitä vaiheita seuraa puristus- ja työtahti 4-tahtimoottoreiden tapaan. Yksinkertaisimmassa ja tämän vuoksi yleisimmässä 2-tahtimoottorin rakenteessa kanavat ja niiden suuaukot on sijoitettu suoraan sylinteriputkeen ja niiden avaamisesta ja sulkemisesta vastaa mäntä. On kuitenkin olemassa myös venttiilimekanismeja ja syöttöpumppujärjestelmiä, joita käytetään erityisesti isommissa 2-tahtissa diesel-moottoreissa. (NFCRC 2009.)

2.4 Moottorien rakenteet

Mäntämoottoreitakin on olemassa hyvin erityyppisiä. Yleinen tapa jaotella moottorit on sylinterien lukumäärän ja niiden sijainnin perusteella. Moottoripyörissä käytettävät moottorit ovat usein 1-, 2- tai 4- sylinterisiä, mutta myös 3-, 5- ja 6-sylinterisiä sarjavalmisteisia moottoripyöriä on olemassa. Yleinen tapa on järjestää sylinterit vierekkäin, jolloin puhutaan rivimoottorista. Toinen hyvin tavallinen konstruktio moottoripyörissä on V-moottori, jossa nimensä mukaisesti sylinterit on sijoitettu V-kirjaimen muotoisesti. Harvinainen ei ole myöskään niin sanottu boxer-moottori, jossa sylinterien välinen kulma on 180° ja ne osoittavat ulospäin. (Mauno 2002, osio 1, sivut 27 - 35.)

3 YLEISTIETOA PROJEKTIN KOHTEESTA

Suzuki GSX1300R Hayabusa on japanilaisvalmisteinen urheilullinen moottoripyörä, jonka ensimmäisen sukupolven mallia valmistettiin vuosina 1999 – 2007 (kuvio 3). Valmistajan ilmoittama teho on 128 kW (174 hv) ja vääntö 140 Nm. Hayabusa suunniteltiin viemään titteli sillä hetkellä maailman nopeimmalta sarjavalmisteiselta moottoripyörältä, Honda CBR 1100XX Blackbirdiltä. Mallimerkinä on osuva, sillä Hayabusa on japania ja tarkoittaa muuttohaukkaa. Tämän linnun syöksynopeus lähentelee 300 km/h, joka vastaa Hayabusan huippunopeutta. Muuttohaukan syöksyasennosta saatiin lisäksi inspiraatiota moottoripyörän muotoiluun ja muuttohaukka vieläpä napostelee välipalaksi mustarastaita, joka käännetään englanniksi blackbird. Suunnittelussa keskityttiin erityisesti parantamaan aerodynamiikkaa ja nostamaan Hayabusan nopeus yhä lähemmäs 200 mailin tuntivauhtia (321,9 km/h). Virtaviivaisen muotoilun lisäksi moottorin teho piti saada kilpailijaa suuremmaksi, jota auttoi osaltaan iskutilavuuden kasvattaminen 1300 cm³. Suuresta tehosta huolimatta Hayabusasta saatiin tehtyä helposti hallittava, eikä se nosta keulaa kovin herkästi pitkän akselivälin, hyvän painonjakauman ja tasaisen vääntökäyrän ansiosta. (The Auto Channel 1999; Boehm 2007.)



KUVIO 3. Ensimmäisen sukupolven Hayabusaa valmistettiin vuosina 1999 - 2007 (Fivella 2009)

Toisen sukupolven Hayabusaa (kuvio 4) on valmistettu 2008 vuodesta alkaen. Uusi malli perustuu vanhaan hyväksi havaittuun runkoon ja muotoiluun, mutta sitä on päivitetty kauttaaltaan modernimmaksi. Moottoria on kehitetty lähes kaikilta osa-alueilta ja lopputuloksena on vanhan kokoinen ja painoinen moottori, joka tuottaa yli 10 % enemmän tehoa. Toisen sukupolven Hayabusasta saadaan kampiakselilta tehoa lähes 200 hv. Kasvaneesta suorituskyvystä huolimatta uusi moottori täyttää katalysaattorin ansiosta Euro 2- ja 3-päästövaatimukset. Moottorinohjausta on uusittu ja käyttäjä voi kytkimen avulla valita kolmesta vaihtoehdosta haluamansa moottorin käytöksen erikseen esimerkiksi vesikelille ja kuivalle kelille. Myös jarrut ja jousitus on uusittu kokonaan, joten Hayabusa on kokenut lähes täydellisen uudistumisen toisen sukupolven mallin myötä. (Boehm 2007.)



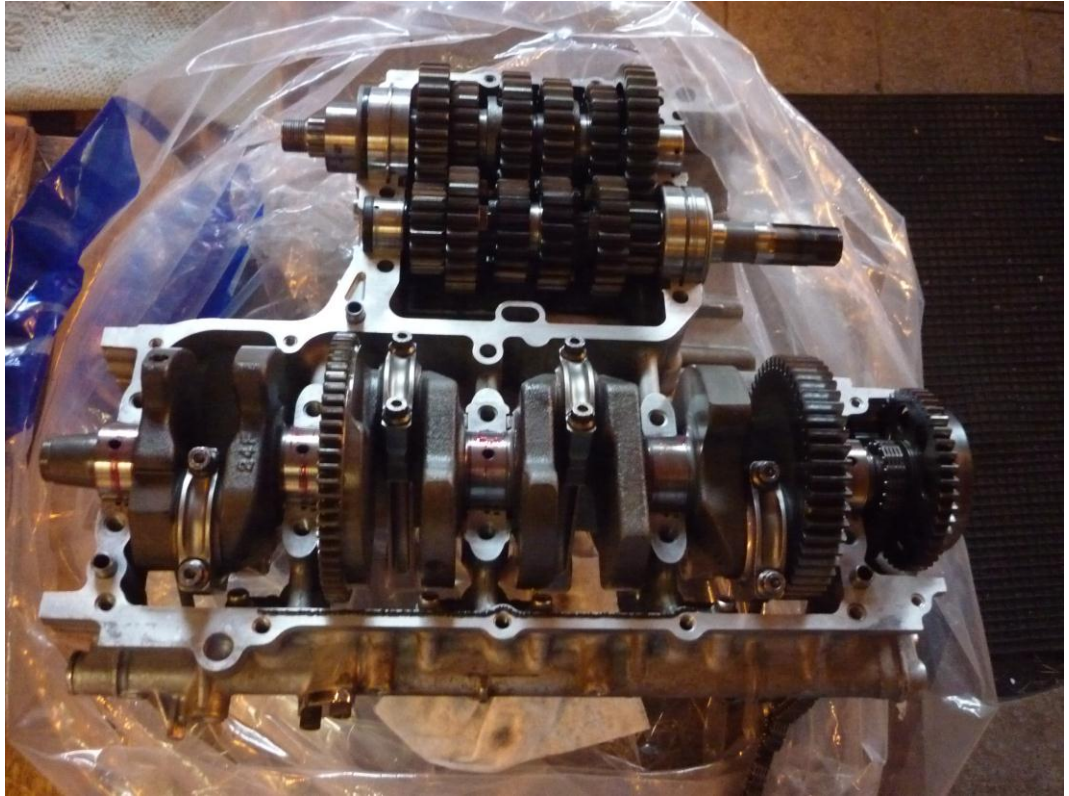
KUVIO 4. Toisen sukupolven Hayabusa, jota on valmistettu 2008 vuodesta lähtien (Fivella 2009)

3.1 Moottori

Projektin kohteena oleva moottoripyörä on ensimmäisen sukupolven ja vuosimallin edustaja, eli valmistettu vuonna 1999. Tyypiltään se on nelitahtinen mäntämoottori, jonka neljä sylinteriä on rivissä. Sylinterien yhteenlaskettu iskutilavuus on 1298 cm³, iskun pituus 63 mm ja sylinterin halkaisija 81 mm. Sylinteriputket ovat pinnoitetut sylinterin koon ja lämmönjohtavuuden maksimoimiseksi. Moottorissa käytetään alumiinista takomalla valmistettuja mäntiä, joita jäähdytetään ruiskuttamalla öljyä männän alapuolisilla öljysuuttimilla. Moottorin kotelo on alumiinivalua, joka on halkaistavissa vaakatasossa kahteen osaan. Kotelossa on sisäiset öljykanavat, joita pitkin voiteluaine tuodaan suoraan kohteeseen, kuten liukulaakereille. Moottori on vesijäähdytteinen, jonka lisäksi moottoriöljyä jäähdytetään erillisellä jäähdyttimellä. (Suzuki Motor Corporation 1999.)

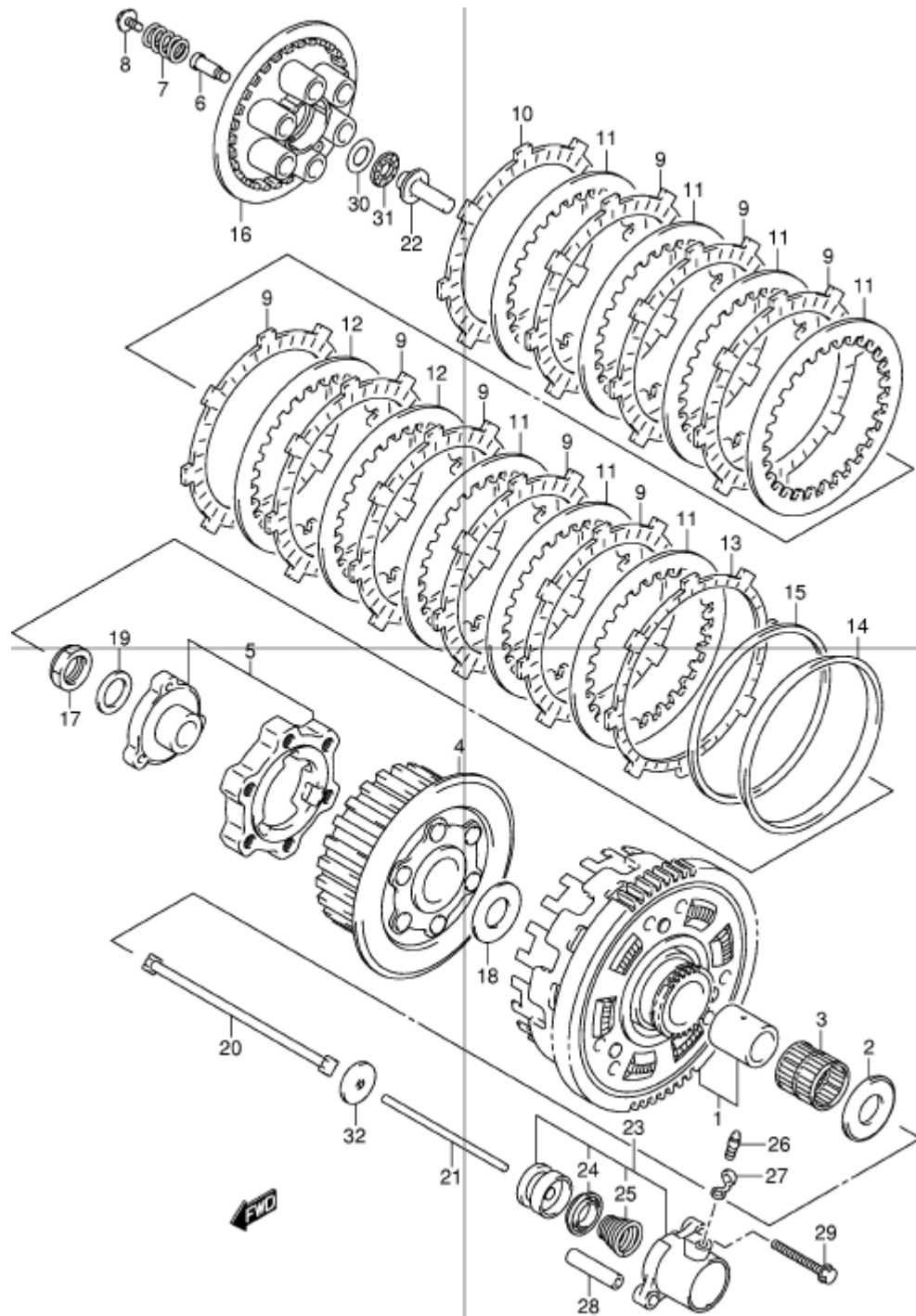
Sylinterikannessa käytetään kahta imu- ja kahta pakoventtiiliä sylinteriä kohden, jotka avataan suoraan venttiilien päälle sijoitettujen nokka-akselin välityksellä. Nokka-akseleita pyörittää kampiakselilta voiman saava nokkaketju, joka huolehtii samalla venttiilien aukeamisesta ja sulkeutumisesta oikeaan aikaan. Nokka-akselit ovat liukulaakeroituja, jonka lisäksi nokkaketjun puoleisessa päässä on kuulalaa-kerit. Sytytystulppa on sijoitettu sylinterikanteen venttiilien ja palotilan keskelle. (Suzuki Motor Corporation 1999.)

Vaihteiston tehtävänä on sovittaa moottorin pyörintänopeus jokaiseen tilanteeseen sopivaksi. 6-vaihteinen manuaalivaihteisto sijaitsee kampiakselin takapuolella. Vaihteisto perustuu ensiö- ja toisioakseleilla oleviin rataspareihin, joista osa pyörii akselin mukana. Ratasparin hampaat ovat koko ajan kiinni toisissaan ja vaihteiden vaihto tapahtuu siirtäjärummun ja siirtohaarukoiden avulla liikuttamalla rattaita akselin suuntaisesti. Rataan lukittuvat vieressä oleviin niiden kyljessä olevien ulokkeiden avulla. Erilaisten ratasparien avulla saadaan muutettua välityssuhde sopivaksi. Ensiöakseliksi kutsutaan sitä akselia, jolle voima kampiakselilta kytkimen välityksellä syötetään. Toisioakselilta voima välitetään rullaketjun välityksellä takapyörälle. Vaihteiston rakennetta selventämään on esitetty kuvio 5. (Mauno 2002, osio 4, sivu 9.)



KUVIO 5. Hayabusan moottori ylösalaisin. Etualalla on kampiakseli, joka välittää kuvasta puuttuvan kytkimen välityksellä voiman ensiöakselille. Rataspareilla muodostetaan haluttu välityssuhde ja siirretään teho toisioakselille, joka siirtää tehon edelleen rullaketjun välityksellä takapyörälle.

Kytкин on tyypiltään monilevyinen märkäkytkin, eli se ui moottoriöljyssä. Kyt-kinkori, jonka ulkoreunalla olevalle hammasrattaalle syötetään voima kampiakse-lilta, on laakeroitu ja sijaitsee ensiöakselin päässä. Kyt-kinkorin sisällä on akselille lukittuva kytkimen keskiö, joka välittää voiman vaihteistolle. Korin ja keskiön välissä on vuorotellen koriin ulkoreunasta lukittuvia kitkalevyjä ja keskiöön sisä-puolelta lukittuvia teräksisiä välilevyjä, joita puristetaan jousien voimalla. Veto katkaistaan kytkinvivun välityksellä työntämällä onton akselin sisällä olevaa tan-koa, joka keventää jousivoimaa kytkinlevyissä ja päästää kytkimen luistamaan. Rakennekuva kytkimestä on esitetty kuviossa 6. (Mauno 2002, osio 4, sivu 4.)



KUVIO 6. Kytöimen rakennekuva, jossa 1 = kytöinkori, 4 = keskiö, 9 = kitkalevy, 11 = välilevy ja 20 = kytöimen irrottava tanko. (Suzuki Worldwide Motorcycle-ATV 2005.)

Kytkimessä on myös kahdesta osasta koostuva niin sanottu back-torque limiter, jolla on kaksi tehtävää. Kiihdyttäessä osat pyrkivät ramppien vuoksi nousemaan toistensa päälle ja venyttämään kytkinjousia puristaen siten levyjä lujempaa yhteen. Järjestelmä mahdollistaa löysempien jousien käytön ja kevyemmän tuntu- man kytkinkahvassa. Vaihdettaessa pienemmälle vaihteelle takarenkaan aiheutta- ma erisuuntainen momentti palauttaa osat samalle tasolle vähentäen kitkalevyjä puristavaa voimaa, jolloin kytkin pääsee luistamaan eikä siten lukitse takapyörää. Kyseiset osat on esitetty kuviossa 6 numerolla 5. (Mauno 2002, osio 4, sivu 4; Camel 2008.)

3.2 Polttoainejärjestelmä

Polttoainejärjestelmä käsittää laitteet, joiden avulla muodostetaan palamiseen tar- vittava polttonesteen ja hapen seos. Hayabusan polttoaineena käytetään alun perin 95-oktaanista bensiiniä ja palamiseen tarvittava happi otetaan ulkoilmasta, jossa sitä on noin 230 g/kg. Jotta saadaan poltettua täydellisesti 1 kg bensiiniä, tarvitaan 3,4 kg happea. Tämän vuoksi bensiinin ja ilman teoreettisesti oikea seossuhde on 14,7:1, jota kutsutaan myös stoikiometriseksi seossuhteeksi. Tämä kuitenkin on harvoin moottorin toiminnan kannalta paras ja se säädetäänkin moottoriohjauksen avulla sopivaksi erikseen jokaiseen tilanteeseen. (Mauno 2002, osio 2, sivu 1.)

Palamisessa tarvittava ilma johdetaan ilmansuodatinkotelolle moottoripyörän keu- lalta alkavien putkien avulla. Suodattimen läpi ilma imetään kaasuläppäkoteloiden kautta sylintereihin. Jokaiselle sylinterille on oma virtausta säätelevä kaasuläppä. Kaasuläpät on kiinnitetty samalle akselille, jota ohjataan kaasukahvan välityksel- lä. Kaasuläppäkoteloissa on myös vaijerikäyttöinen lisäilmajärjestelmä kylmä- käynnistyksen vaatimaa nopeaa tyhjäkäyntiä varten. (Coombs 2004, osio 4, sivut 1 - 3.)

Polttoaineen, eli tässä tapauksessa bensiinin, ensimmäinen etappi matkalla sylinte- reihin on 22 L polttoainetankki. Polttoaineletkua pitkin aine valuu omalla painol- laan tankin ulkopuoliselle polttoainepumpulle, jossa on integroituna polttoai- nesuodatin ja polttoaineen paineensäädin. Paine on vakiona 3.0 bar, jolla bensa-

pumpun tuottama virtaus on noin 65 L/h. Paine pidetään vakiona suhteessa imu-sarjan paineeseen kalvotyypin paineensäätimen avulla. Tällöin suuttimien kautta virtaavan bensiinin määrä saadaan annosteltua pelkästään sille annettavan pulssin pituutta säätelemällä. Paineensäätimen jälkeen polttoaine tuodaan suutin-tukille, joka jakaa bensiinin jokaisessa imukaulassa olevalle suuttimelle. Paineen-säätimeltä on lisäksi letku takaisin polttoainesäiliöön, jonka kautta kulkee jatkuva paluuvirtaus tankkiin ja polttoaine saadaan pidettyä viileämpänä. (Coombs 2004, osio 4, sivut 1 - 3.)

3.3 Moottorin ohjausjärjestelmä

Hayabusassa on yhdistetty polttoaineensuihkutuksen ja sytytyksen ohjausjärjes-telmä. Järjestelmä koostuu elektronisesta ohjausyksiköstä (ECU) ja yhdeksästä anturista, joilta se saa tietoa moottorin tilasta. Anturitiedon perusteella lasketaan sytytyksen ajoitus ja suuttimien aukioloaika. Moottorin ohjaamisen lisäksi ohja-usyksikkö välittää tietoa mittaristolle ja sen avulla on toteutettu turvatoimintoja, kuten käynnistymisenesto pyörän ollessa kyljellään kaatumisanturin (TOS) perus-teella. Hayabusassa on myös itsediagnostiikkajärjestelmä, joka havaitsee poik-keamat anturitiedoissa jättäen vikakoodin muistiin helpottaen viallisen komponen-tin paikantamista. (Coombs 2004, osio 4, sivut 1 - 3.)

3.3.1 Toiminta

Käytännössä moottorinohjausyksikön sisällä on mikrokontrolleri, jonka muistiin on ladattu erilaisia polttoaine- ja sytytyskarttoja. Käsittelemällä kartoista ja antu-reilta saatavaa dataa lasketaan optimaalinen sytytysennakko ja suuttimen aukiolo-aika erilaisiin moottorin käyntiolosuhteisiin. Antureilta saadaan sekä digitaalista että analogista tietoa, joka muunnetaan sellaiseen muotoon, että niitä voidaan mik-rokontrollerissa käsitellä. Tärkeimmät mitattavat tiedot moottorin ohjauksen kan-nalta ovat sisään syötettävän ilman määrä ja moottorin kierrosluku. (Mauno 2002, osio 3, sivu 18; Mauno 2005, 67.)

3.3.2 Anturointi

Yksi tärkeimmistä moottorin antureista on kaasuläpän asennontunnistin (TPS). Se on käytännössä kaasuläppien akselille kytketty potentiometri, jolla mitataan kaasuläppien asentoa. Kuljettajan kääntäessä kaasukahvaa kaasuläpät avautuvat vaijerin välityksellä ja suurempi määrä ilmaa pääsee virtaamaan sylintereihin. Tämän anturin perusteella moottorinohjaus tietää, halutaanko säilyttää nykyinen käyntinopeus, hidastaa vai kiihdyttää. (Mauno 2002, osio 3, sivu 18.)

Kampiakselin asennontunnistimelta (CKP) moottorinohjaus saa tiedon paitsi moottorin kierrosnopeudesta, myös kampiakselin asennosta. Anturi tunnistaa kampiakselin päässä olevan roottorin nastat ja lähettää jännitepulssin moottorinohjausyksikölle, joka laskee kierrosnopeuden pulssien taajuudesta. Moottorin kierrosluku vaikuttaa sekä suihkutettavan polttoaineen määrään että sytytyshetkeen. Hayabusassa käytetään lisäksi samalla periaatteella toimivaa nokka-akselin asennontunnistinta (CMP) lisätarkkuuden saavuttamiseksi. (Mauno 2002, osio 3, sivu 20; Mauno 2005, 110.)

Hayabusassa sylinteriin tuodun ilmamäärän mittaamisessa käytetään kahta eri tapaa. Kun kaasuläpät ovat avautuneet noin alle 10 %, käytössä on niin sanottu ”Speed Density”-menetelmä, jolloin ilmamäärä lasketaan pääosin kierrosluvun ja imusarjan paineen perusteella. Imusarjan absoluuttinen paine mitataan ilman-suodattimen kotelossa olevalla anturilla (IAP), joka antaa moottorin ohjausyksikölle paineesta riippuvan jännitetiedon. Suuremmilla kaasuläppien avautumilla käytetään ”Alpha N”-menetelmää, joka perustuu kierrosluvun ja kaasunasennon seuraamiseen. Lisäksi ilmamassan määrää korjataan muilta antureilta saadun tiedon perusteella. Tällaisia ovat muun muassa ilman lämpötila-anturi ”IAT” ja jäähdytysnesteen lämpötila-anturi ”ECT”. (Bell 2002, 324 - 326; Ecueditor.com Online Help 2011.)

4 MOOTTORIN SUORITUSKYVYN PARANTAMINEN

Moottorin tuottama teho riippuu pitkälti siitä, kuinka paljon polttoainetta se pysyy polttamaan. Kasvattamalla moottorin iskutilavuutta saadaan palotilaan mahdumaan enemmän polttoainetta, jolloin edellytykset tehon kasvamiselle ovat olemassa. Usein moottoria viritetään parantamalla sen hengitystä, eli pyritään maksimoimaan sylinteriin virtaavan polttoaineen määrä sekä poistamaan pakokaasut mahdollisimman hyvin. Sylinterin täytöstä voidaan parantaa myös mekaanisesti tai kemiallisesti ahtamalla, jolloin moottorista on mahdollista saada moninkertaisesti samankokoista moottoria isompi teho. (Bell 2002, 9.)

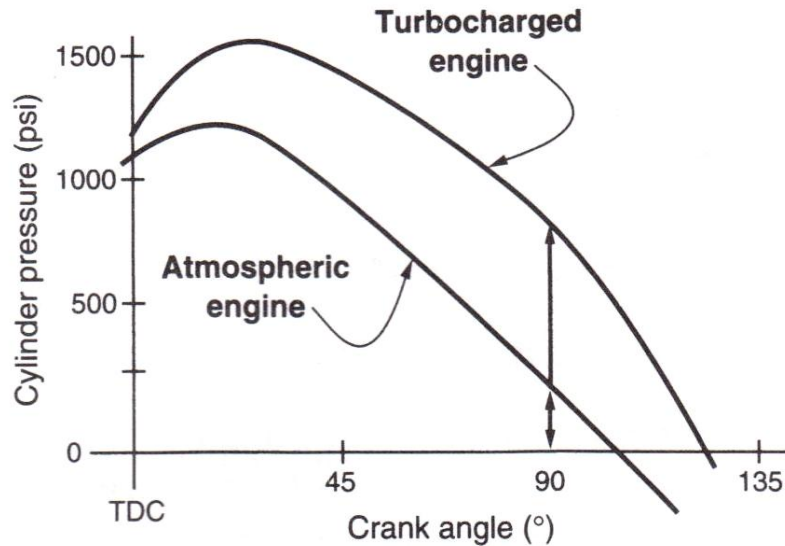
Asetin projektin tavoitteeksi kasvattaa moottorin teho 300 hv (220,6kW) pakokaasuahtimen avulla, joka toimii samalla osien mitoituksen perustana. Käytännössä teho mitataan projektin valmistuttua takapyörältä, jolloin voimansiirtohäviö on otettava huomioon. Hayabusista on yleisesti mitattu noin 9 %:n voimansiirtohäviöitä, jolloin takapyörältä mitattuna tehoa on odotettavissa noin 273 hv. Moottorin muuttaminen turboahdetuksi vaatii itse ahtimen ja pakosarjan lisäksi muutoksia moottorin muihinkin osiin, kuten polttoaine-, pakokaasu- ja moottorinohjauksjärjestelmään sekä voimansiirtolaitteisiin.

4.1 Pakokaasuahdin bensiinimoottorissa

Moottorin teho saadaan laskettua kertomalla sen tuottama vääntömomentti kierrosnopeudella. Vääntömomenttiin vaikuttaa mäntään kohdistuvan voiman suuruus ja iskunpituus. Mäntään kohdistuvan voiman suuruus taas riippuu männän pinta-alasta ja sylinterissä työtahdin aikana vallitsevasta paineesta. (Bell 1997, 7).

Moottorista saatavan tehon kasvattaminen ahtamalla perustuu sylinterissä vallitsevan keskimääräisen paineen kasvattamiseen. Koska paine nousee koko työtahdin aikana, on mahdollista tuplata moottorin vääntömomentti ja teho sylinterin maksimipaineen noustessa vain noin 20 %. Samasta syystä kampiakselin kulman ollessa 90°, saattaa sylinterissä vallita 3 - 4-kertainen paine vapaasti hengittävään moottoriin verrattuna, paineen jäädessä sillä kohdin silti maksimipainetta pie-

nemmäksi. Tämän vuoksi ahdetuista moottoreista saadaan usein kierrosalueen keskivaiheilla vapaasti hengittävää moottoria enemmän vääntöä. Periaate selviää kaikkein parhaiten tarkastelemalla kuviota 7.

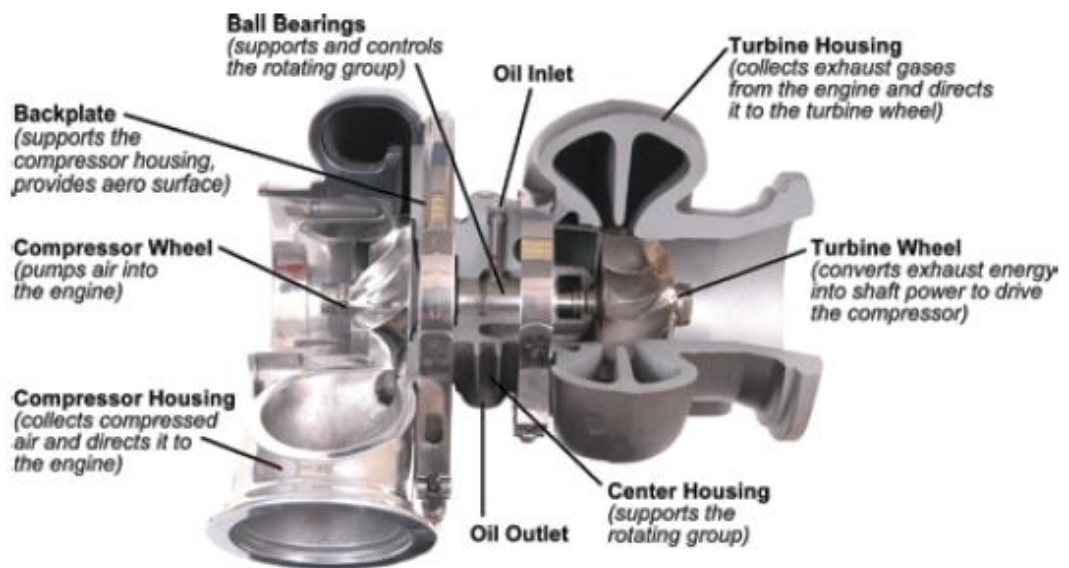


KUVIO 7. Käyrät kuvaavat sylinterissä vallitsevaa painetta vapaasti hengittävissä ja ahdetussa moottorissa työtahdin aikana. Huomaa ahdetun moottorin moninkertainen sylinterin paine vapaasti hengittävään moottoriin verrattuna kampiakselin neljänneskierroksen kohdalla. (Bell 1997, 5.)

4.1.1 Rakenne

Ahdin on pohjimmiltaan ilmapumppu, jonka tehtävänä on pakottaa moottorin palotilaan enemmän ilmaa kuin mitä se voisi luonnollisesti kuluttaa. Ahtimia on lukuisia erilaisia, ja ne eroavat muun muassa rakenteen ja toimintaperiaatteen mukaan. Yleisimmät ahdintyytit ovat pakokaasu- eli turboahdin ja mekaaninen ahdin. Projektin alusta asti on ollut lähtökohtana, että moottorin ahtaminen toteutetaan pakokaasuahdimella, minkä vuoksi tämän työn yhteydessä ei käsitellä muita ahdintyyttejä ollenkaan. (Mauno 2005, 151 - 156.)

Pakokaasuahdin saa energiansa muutoin hukkaan menevästä pakokaasun liike- ja lämpöenergiasta. Yksinkertaistetusti turboahdin koostuu samalle akselille laakeroiduista turbiini- ja kompressoripyöristä (kuvio 8). Palotilasta purkautuva pakokaasu saa tarkasti mitoitettuun kotelossa olevan turbiinipyörän pyörimään, jolloin kompressoripyörä omassa kotelossaan pakottaa ilmaa keskipakoisvoiman avulla eteenpäin. Turboahtimen huonoksi puoleksi voidaan laskea alhaisella kierrosnopeudella kiihdyttäessä esiintyvä viive, joka syntyy, kun pieni pakokaasuvirtaus taistelee ahtimen pyörivien osien hitausmassaa vastaan. (Mauno 2005, 151 - 156.)



KUVIO 8. Turboahtimen rakenne (Honeywell 2012a).

Perinteisesti turboahdin on liukulaakeroitu, mutta joissain ahtimissa on siirrytty käyttämään kuulalaakerointia, josta on useita etuja. Kuulalaakeroitu ahdin vastaa muun muassa kaasuun nopeammin, tarvitsee vähemmän voitelua eikä ole sen epäpuhtauden kanssa yhtä herkkä. Kuulalaakeroidussa ahtimessa ei lisäksi vinokuulalaakereita käytettäessä tarvita akselinsuuntaista erillistä tukea, joka on usein heikko lenkki liukulaakeroiduissa ahtimissa. Myös osien määrää ja siten potentiaalisia rikkoutumisen aiheuttajia on saatu alennettua. Esimerkiksi Garrettin kuulalaakeroiduissa turboahtimissa on keskimäärin 45 % vähemmän osia. (Honeywell 2012a.)

Yksi ahtimen ongelmista on moottorin sammuttamisen jälkeen lämmön keräytyminen sylinterikannesta, pakosarjasta ja turbiinipesästä ahtimen keskiosaan. Tämä voi aiheuttaa ahtimessa olevan öljyn hiiltymisen ja tukkia kanavat lopulta tuhoten koko ahtimen. Tämän vuoksi ahtimissa käytetään usein vesijäähdytystä, joka yhdistetään moottorin jäähdytysnestekiertoon ja joka kerää lämmön talteen ja siten ehkäisee öljyn ylikuumentumisen. Tämäkään ei välttämättä riitä poistamaan ongelmaa, jos ahdinta usein kuormitetaan pitkään ehkä punahehkuseksikin asti ja moottori sammutetaan pian sen jälkeen. Kovan kuormituksen jälkeen olisi syytä pitää moottoria muutama minuutti käynnissä, jotta lämpökuormaa saadaan pienennettyä. (Honeywell 2012a; Bell 2002, 99;)

Yksi kätevä ominaisuus varsinkin sijoitettaessa ahdin ahtaisiin paikkoihin on pesien käänneltävyys. Sijoittamista helpottaa huomattavasti, jos kompressorikotelo, keskiö ja turbiinikotelo ovat toisistaan riippumatta käännettävissä 360° haluttuun asentoon. Öljyn on kuljettava keskiön läpi likimäin pystysuorassa, joten jos pesät eivät ole käännettävissä tai käänneltävyyttä on rajoitettu, niin turbiinipesän laippaa tai kompressoripesän lähtöä ei välttämättä saada käännettyä haluttuun asentoon laisinkaan. (Bell 1997, 35.)

Lisää eroja ahtimista löytyy muun muassa hukkaportin osalta, joka säätelee ahtimen pyörimisnopeutta ja siten ahtopaineen suuruutta. Usein ahtimissa käytetään sisäistä hukkaporttia integroituna suoraan turbiinipesään, mutta se voi olla myös kokonaan erillinen venttiili ahtimen ulkopuolella. (Bell 2002, 107.)

4.1.2 Mitoitus

Turboahtimen oikea mitoittaminen on tärkeää, koska se vaikuttaa paitsi moottorin tuottamaan tehoon, myös sen luonteeseen ja luotettavuuteen. Ei ole kuitenkaan yhtä ainoaa oikeaa ahdinta, vaan sen valintaan vaikuttaa myös moottorin käyttötarkoitus. Kahteen muutoin samanlaiseen moottoriin voidaan mitoittaa erilaiset turbot, jos käytetyn kierrosalue eroaa merkittävästi. (Bell 1997, 23.)

Moottorin tehon kannalta on tärkeää saada koneeseen mahdollisimman kylmää ilmaa, koska kylmä ilma on tiheämpää ja sisältää enemmän happea. Turboahdin on perusluonteeltaan ilmapumppu, joka ahtaessaan myös lämmittää ilmaa. Kompressorille eli ahtimen ilmaa pumppaavalle osalle on ominaista sen hyötysuhteen vaihtelu painesuhteen ja ilmavirran mukaan. Kompressori lämmittää ilmaa sitä enemmän, mitä huonommalla hyötysuhteella se työskentelee. On tärkeää valita moottoriin sellainen kompressori, joka lämmittää ilmaa mahdollisimman vähän. Mainittakoon, että ilma lämpenee aina kasaan puristaessa ja kompressorin hyötysuhde kuvaa kuinka paljon enemmän kompressori lämmittää ilmaa kuin sen termodynamiikan lakien mukaan pitäisi. (Bell 2002, 67 - 70.)

4.1.3 Ilmamäärän laskeminen

Projektin tavoitteena on kasvattaa moottorin tehoa 70 % alkuperäistä korkeammaksi. Ahtamalla koneeseen 1,7-kertaisesti ilmaa ja vastaavasti lisää polttonestettä ei kuitenkaan saada tehoa lisättyä samalla kertoimella, sillä kokoon puristuesaan ilma kuumenee ja sen tiheys laskee. Lasketaan ensin kaavan 1 mukaisesti paljonko ilmaa ylipäättään tarvitaan 300 hv:n tuottamiseen. Tämä lasketaan koikeellisen "BSFC"-luvun avulla, joka edustaa yksinkertaisuudessaan yhden hevosvoiman tuottamiseen tarvittavan bensiinin määrää. Turboahdettu bensiinimoottori kuluttaa bensiiniä yleensä noin 0,50 - 0,60 lb/min/hv (272,2 – 317,5 g/min/hv), jonka perusteella valitsen arvon laskutoimitukseen skaalan puolivälistä. Ilman kulutukseen vaikuttaa seossuhde "AFR", eli kuinka paljon seoksessa on ilmaa suhteessa bensiinin määrään. Seossuhteesta puhutaan enemmän moottorin säätämisen yhteydessä, joten tässä vaiheessa oletetaan, että täyskaasulla seossuhteeksi säädetään 12,5:1. (Bell 2002, 67 - 70; Honeywell 2012a; Bell 1997, 171.)

KAAVA 1. Ilmamäärän "Wa" laskeminen (Honeywell 2012a)

$$W_a = HP \times AFR \times \frac{BSFC}{60} = 300hp \times \frac{12,5}{1} \times \frac{0,55 \frac{lb}{min/hv}}{60} \approx 34,4lb/min$$

Bensiinimoottori tarvitsee tämän verran ilmaa kyseisen tehon tuottamiseen riippumatta moottorin koosta, kierrosnopeudesta tai muustakaan seikasta. Lasketaan seuraavaksi, paljonko imusarjaan tarvitaan painetta, jotta edellä laskettu ilmamäärä saadaan kulkemaan moottorin läpi. Imusarjan absoluuttista painetta kuvaa ”MAP” kaavassa 2.

Paineen tarvetta sylinterissä vähentää suurempi iskutilavuus ja kierrosluku, joita on merkitty ”Vd” ja ”N”. Kierroslukuna kaavassa käytän moottorin punarajaa. Ilman määrään vaikuttaa positiivisesti suurempi volymetrinen hyötysuhde ”VE”, joka kuvaa sylinterin täytöstä. Sylinterin täytös riippuu pitkälti moottorin hengityksen tehokkuudesta, eli kuinka hyvin pakokaasut saadaan poistettua ja sylinteri täytettyä uudella seoksella. Modernissa neliventtiilisessä moottorissa täytös on yleensä välillä 95 – 99 %. Laskutoimitusta varten arvioin VE:n olevan 98 %.

Paineen tarvetta lisää myös ilman korkeampi lämpötila. Imuilman lämpötila ”Tm” nousee, kun se kulkee ahtimen läpi ja puristuu kasaan. Kuten tiedetään, kaasujen tiheys laskee lämpötilan noustessa. Moottoriin ahdettavan ilman tiheyttä voidaan kuitenkin kasvattaa jäähdyttämällä ilmaa ahtimen jälkeen. Tällaisesta jäähdytyksestä käytetään usein nimitystä välijäähdytys. Ahtimen aiheuttaman lämpötilan nousun ja välijäähdytyksestä saatavan hyödyn tarkempi laskeminen vaatii ahtimen kompressorikartan hyödyntämistä, jonka vuoksi tässä vaiheessa mitoitetaan turboahdin ja edellä mainitut laskut valitulla ahtimella käydään läpi välijäähdytystä käsittelevän osion lopussa. Tässä vaiheessa kuitenkin hyödynnetään kyseisistä laskuista saatuja tuloksia, joiden mukaan välijäähdytyksen avulla saadaan imuilman lämpötila laskettua 38 °C:seen (100,0°F). (Honeywell 2012a.)

KAAVA 2. Kaavassa ”MAP” edustaa tarvittavaa absoluuttista painetta imusarjassa, jolla saadaan moottori kuluttamaan haluttu määrä ilmaa (Honeywell 2012a)

$$MAP = \frac{W_a \times R \times (460 + T_m)}{VE \times \frac{N}{2} \times V_d} = \frac{34,4 \text{ lb/min} \times 639,6 \times (460 + 100,0F)}{0,98 \times \frac{10900 \text{ rpm}}{2} \times 79,20 \text{ in}^3}$$

$$\approx 29,1 \text{ psia}$$

Lasketaan seuraavaksi kaavan 3 mukaisesti tarvittava paine kompressorilla ”P2c”, jotta putkiston häviöiden jälkeen imusarjassa vallitsee haluttu paine. Virtaushäviötä kasvattavat mm. mutkat, kaasuläppäkotelot ja välijäähdytin. Häviö hyvin suunnitellussa järjestelmässä on alle 1 psi (0,07bar), kun huonoissa toteutuksissa häviö voi nousta 4 psi (0,28bar) tai yli. Arvioin laskua varten häviöiden olevan kohtuulliset ja valitsen arvon skaalan puolivälistä. (Honeywell 2012a.)

KAAVA 3. Kompressorin paineen laskeminen (Honeywell 2012a)

$$P_{2c} = MAP + \Delta P_{loss} = 29,1psia + 2psia = 31,1psia$$

Imupuolen paineen määrittämistä varten vähennetään vallitsevasta ilmanpaineesta ”Pamb” imuputkiston, ilmansuodattimen ja muiden mahdollisten tekijöiden aiheuttama paineen alenema. Hayabusaan ilmansuodatin asennetaan suoraan kompressoripesään, joten ainut potentiaalinen vastuksen lisääjä on itse suodatin. Kokeellisen ilmansuodatinvertailun mukaan (Anthony 2007) suodattimen aiheuttama painehäviö on prosentin kymmenesosa ja voidaan siten mielestäni jättää huomiomatta. (Honeywell 2012a.)

KAAVA 4. Ahtimen imupuolen paineen ”P1c” laskeminen (Honeywell 2012a)

$$P_{1c} = P_{amb} - \Delta P_{loss} = 14,7psia - 0 = 14,7psia$$

Ahtimen mitoittamiseksi tarvitsee tietää ilmavirran lisäksi kompressorin painesuhde, joka saadaan jakamalla kompressorista ulos tulevan ilman paine sen sisään imettävän ilman paineella kaavan 5 mukaisesti (Honeywell 2012a).

KAAVA 5. Painesuhteen ”PR” laskeminen (Honeywell 2012a)

$$PR = \frac{P_{2c}}{P_{1c}} = \frac{31,1psia}{14,7psia} \approx 2,12$$

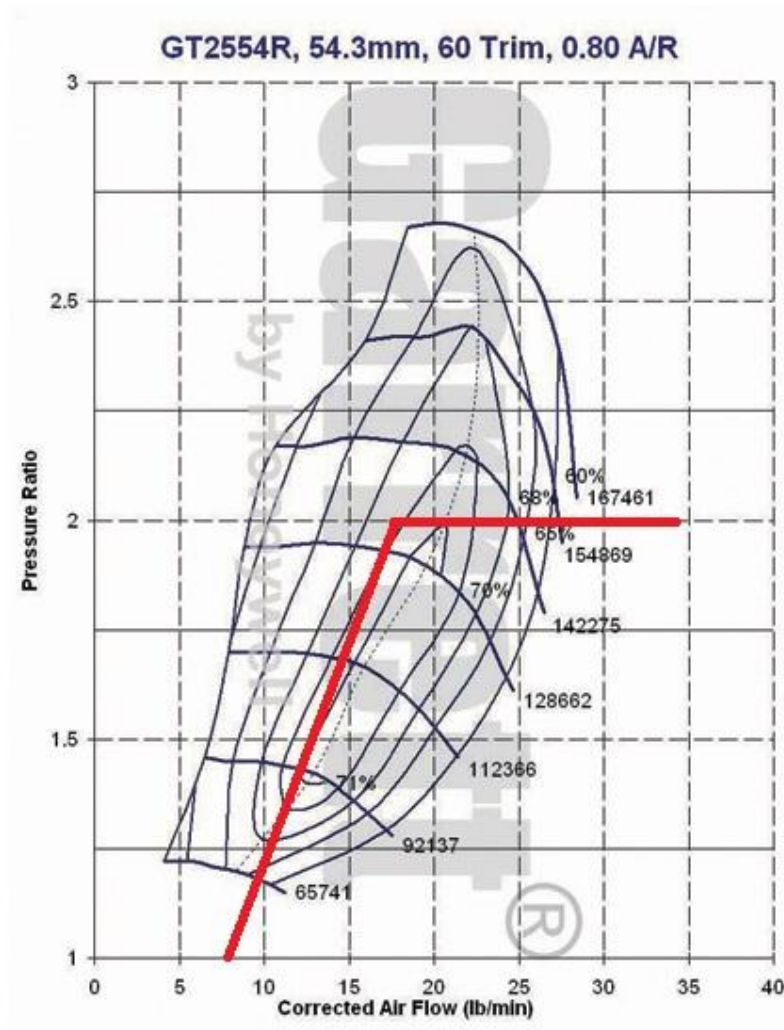
4.1.4 Valinta

Ahtimen kompressorisiiven valinnassa käytetään apuna koordinaatistoa, jonka vaaka-akselilla on ahtimen tuottama ilmavirta ja pystyakselilla moottorin painesuhde. Kuviossa esitetään graafisesti saarekkeilla kompressorin hyötysuhde erilaisilla ilmavirran ja painesuhteen arvoilla. Tarkoituksena on valita sellainen kompressorin, jolla parhaan hyötysuhteen alue sijoittuu moottorin kuormitettumalle kierrosalueelle. Esimerkiksi pelkkään kiihdytyskäyttöön rakennetussa moottorissa, jolla ajetaan lähinnä täyskaasulla, hyötysuhteen halutaan olevan suurimmillaan kierrosalueen yläpäässä. Katukäytössä parhaan hyötysuhteen alue kannattaa sijoittaa kierrosalueen keskivaiheille. Jos ahdin mitoitetaan katukäyttöön maksimikierrosalueen perusteella, matalilla kierroksilla ahtimen hyötysuhde on huono ja lämmöt voivat nousta liian korkeiksi. Kompressorikartoissa hyötysuhde on merkitty sitä kuvaavan epämääräisen ympyrän viereen. (Bell 1997, 23 - 28.)

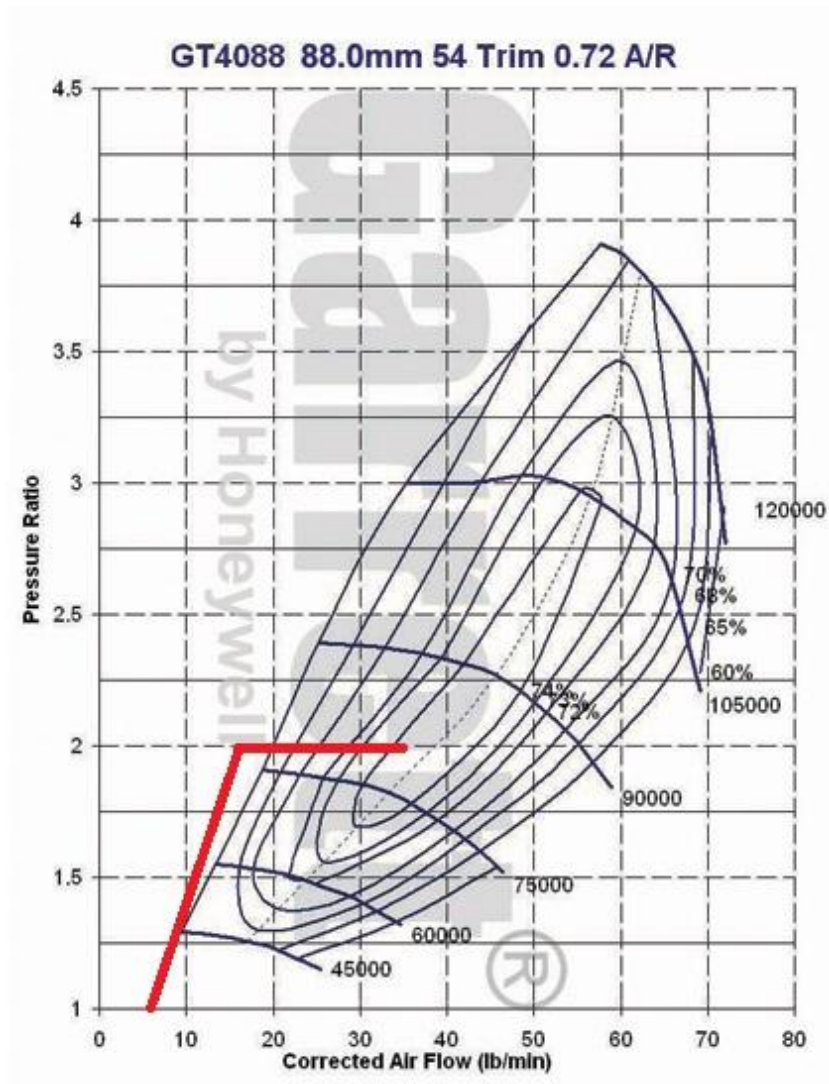
Kompressorin toimivuutta moottorissa voidaan arvioida piirtämällä karttaan kolme pistettä ja niitä yhdistävät kaksi viivaa. Ensimmäisen pisteen sijainnin määrittää suurin painesuhde ja ilmamäärä, jotka aiemmin laskettiin. Toisen pisteen sijoittamiseksi oletetaan, että painesuhde saavutetaan puolella maksimikierroksista, eli painesuhde on sama ja ilmamäärä puolet lasketusta. Kolmas piste sijoitetaan kohtaan, jossa painesuhde on 1 ja ilmamäärä 20 % maksimista. Tämän nousevan viivan tulisi sijaita kokonaan kartalla. Jos ahtimen sakkaurajaa ei ole erikseen merkitty, niin uloimman saarekkeen vasen reuna on kuitenkin hyvin lähellä tätä.

Sakkaurajan ulkopuolelle ajautuessaan ahtimen läpi kulkee liian pieni massavirta painesuhteeseen nähden, joka voi rikkoa ahtimen laakeroinnin hyvinkin nopeasti. Ahdin voi ajautua sakkauralueelle myös silloin, kun kaasu suljetaan nopeasti. Tämän vuoksi ahtimen jälkeiseen putkistoon voidaan asentaa venttiili, joka päästää paineen kaasuläppien sulkemisen jälkeen purkautumaan joko ulkoilmaan tai ahtimen imupuolelle. Kartan oikeassa reunassa sijaitsee toinen raja, jonka ulkopuolelle ahdinta ei sovi mitoitaa. Tätäkään rajaa ei ole usein merkitty, mutta esimerkiksi Garrettin kartoissa se on määritetty siihen kohtaan, kun hyötysuhde putoaa alle 58 %:n. Tällä alueella ahdin paitsi toimii huonolla hyötysuhteella, voi lisäksi ajautua ylikierroksille ja rikkoontua. (Bell 1997, 29; Honeywell 2012a.)

Koska ahtimia on samankin valmistajan valikoimassa satoja erilaisia, vaatisi liikaa tilaa vertailla kaikki potentiaaliset vaihtoehdot. Esitän tämän vuoksi kahden eri kokoluokan ahtimen kartat ja kommentoin niiden soveltuvuutta moottoriin. Esimerkeissä on käytetty Garrett turboahtimien karttoja, koska niissä ilmavirta on ilmoitettu samoissa yksiköissä kuin laskutoimituksissa ja kartat ovat helposti saatavilla kotisivuilta. (Bell 2002, 90).



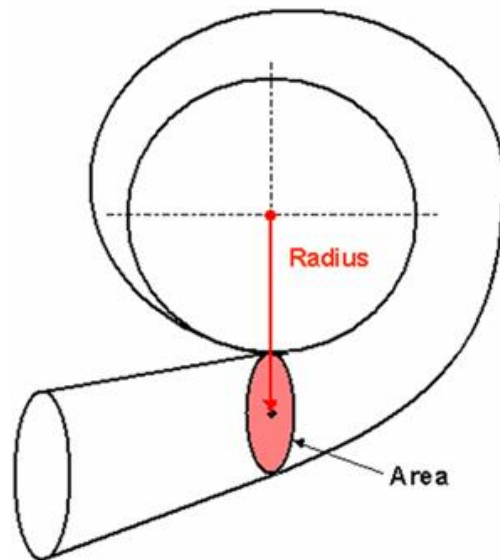
KUVIO 9. Garrett GT2554R kompressorikartta. Maksimi ilmavirta sijoittuu kartan ulkopuolelle, eikä kyseinen ahdin siksi pysty tuottamaan riittävää ilmavirtaa. Ulommaisin 60 %:n hyötysuhteen saareke rajaa kompressorin käyttökelpoisen alueen. (Honeywell 2012a; Honeywell 2012b.)



KUVIO 10. Garrett GT4088 kompressorikartta Vaikka maksimitehoilla kompressorin toimii parhaalla 74 %:n hyötysuhteella, kierrosluvun laskiessa hyötysuhde laskee nopeasti jätään lopulta kokonaan sakkaurajan ulkopuolelle, eikä ahdin sen vuoksi sovellu käyttötarkoitukseen. (Honeywell 2012a; Honeywell 2012b.)

Valitsin moottoriin Garrett GT3071R (2)-ahtimen, jonka kompressorikartta on esitetty liitteenä (LIITE 1). Ahdin toimii maksimikierroksilla 74 %:n hyötysuhteella kulki parhaan 77 %:n hyötysuhteen alueen läpi. Sakkaurajaan on turvallinen etäisyys ja ahtimen tuotossa on runsaasti lisäpotentiaalia, jos tulevaisuudessa haluaa kasvattaa tehoa entisestään. Tämän ahtimen parhaan hyötysuhteen alue sijoittuu keski- ja yläkierrosten välimaastoon, jossa todennäköisesti säästetään myös suurin vääntömomentti. (Honeywell 2012a.)

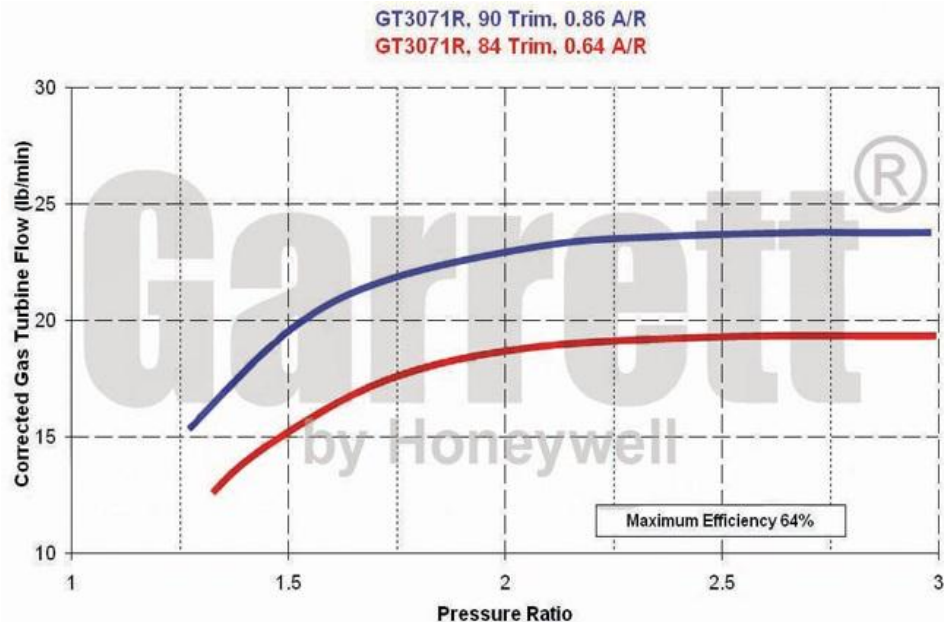
Kompressorisiiven mitoittamisen jälkeen valitaan turbiinisiipi ja sen kotelon A/R-suhde, eli kotelon purkaukohdan pinta-alan suhde säteeseen (kuvio 11). Purkaukohdan pinta-ala vaikuttaa nopeuteen, jolla kaasu purkautuu ja pyörittää turbiinia. Pienemmällä A/R-suhteella saadaan nopeampi ahtopaineen nousu, mutta koko alkaa rajoittaa virtausta suuremmilla kierroksilla aiheuttaen pakopainetta. Suurella A/R-suhteella saadaan korkeampi maksimiteho pakopaineiden pysyessä maltillisempina, mutta alakierroksilla ilman virtaus jää pienemmäksi ja kaasuun vastavuus on hitaampi. A/R-suhdetta valitessa täytyy miettiä aiottua käyttötarkoitusta ja käyttökelpoisinta tehoaluetta. Kompressorikotelon A/R-suhteella sen sijaan on hyvin pieni vaikutus käytökseen, jonka vuoksi sitä ei yleensä voi valita. (Honeywell 2012a.)



KUVIO 11. A/R-suhde eli kanavan pinta-alan ja säteen suhde, joka pysyy samana joka puolella koteloa. (Bell 1997, 32.)

Projektin moottorista on tarkoitus saada paljon tehoa luotettavuuden pysyessä mahdollisimman hyvänä. Pakopaineen pysyminen pienenä vaikuttaa osaltaan koneen kestävyys ja tehon määrään, joten nämä syyt puoltavat suurta A/R-suhdetta. Toisaalta moottorin puristussuhdetta alennetaan, mikä heikentää erityisesti matalien ja keskialueen tehoa. Tämän puolesta pienempi suhde voisi olla parempi valinta edistäen ahtopaineiden nopeampaa nousua.

Moottoriin valittua Garrett GT3071R (2)-ahdinta on saatavilla 0.86 ja 0.64 A/R-suhteilla, joiden toimintaa havainnollistaa kuviossa 12. Aiemmin laskettiin, että moottorin maksimitehoon vaadittava ilmavirtaus on 34,4 lb/min ja painesuhde 2,12. Kuvioista voidaan tulkita, että suuremmalla A/R-suhteella painesuhde saavutetaan likimäärin kun turbiinivirtaus on 23 lb/min, joka vastaa 67 % maksimitehon ilmavirtauksesta. Bellin mukaan (2002, 444) viritäessä moottorissa olisi hyvä, kun ahtopaine saavutettaisiin täyskaasukiihdytyksessä viimeistään kierrosalueen maksimiväännön kohdalla. Hayabusassa suurin vääntö saadaan alun perin 7000 1/min (Aperaceparts 2012a), joka vastaa noin 64 % maksimikierroksista. Tämän mukaisesti suurempi turbiinipesä pystyy tuottamaan maksimipaineen muutaman prosenttiyksikön erolla Bellin kuvailemaan tavoitteeseen verrattuna. Pienemmällä A/R-suhteella virtausta painesuhteen saavuttamiseksi tarvitaan noin 18 lb/min ja se saavutetaan jo kierrosalueen puolivälin tuntumassa. Valitsin ahtimeen 0.86 A/R-suhteella olevan turbiinipyörän siksi, että moottori on luonteeltaan kierroskone ja siinä käytetään suuria kierroksia, kun halutaan liikkua nopeasti. Tämän vuoksi hitaampi herääminen on hyväksyttävää, kun samalla saadaan pidettyä pakopaineet maltillisempina ja kasvatettua tehoa.



KUVIO 12. Turbiinipesän A/R-suhteen vaikutus Garrett GT3071 (2)-ahdimella (Honeywell 2012b)

4.1.5 Asennus

Turboahdin on asennettava öljypinnan yläpuolelle tai muussa tapauksessa käytettävä öljyn paluupumppua. Öljy kulkee ahtimen keskiön läpi ylhäältä alaspäin ja jäähdytysneste vaakatasossa. Kuulalaakeroidussa ahtimessa tulee käyttää öljynkuristinta tulolinjassa, jotta öljynpaine maksimikiirroksilla asettuisi välille 40 – 45 psi (2,76 – 3,10 bar). Öljykierron varmistamiseksi keskiötä ei saa kallistaa pystysuunnasta enempää kuin 15° astetta. Öljyn paluulinjaa ei tulisi asentaa yli 35°:n asteen kulmaan, jos ei käytetä erillistä paluupumppua. Öljynpaluulinjassa suurempi on parempi, mutta minimissään tulisi valita keskiössä olevan öljynpaluureiän suuruisella sisähalkaisijalla oleva letku. (Honeywell 2012a.)

Hayabusassa pakosarja toteutetaan niin, että ahdin sijoittuu mahdollisimman korkealle eikä erillistä öljypumppua tarvita. Öljyn kuristamiseksi ahtimen sisääntuloon asennetaan erillinen kaksoisnipa, joka samalla muuntaa ahtimen keskiössä olevan erikoisen M11x1mm-kierteen AN4-kierteeksi, joka on itse asiassa yhteensopiva hydraulikassa käytetyn 7/16-20JIC-kierteen kanssa. Öljy otetaan öljykanavasta paineanturin vierestä, jossa on alun perin kierteellä oleva tulppa. Teräspunosvahvisteinen letku teetetään mittojen mukaan. Öljynpaluu toteutetaan 19 mm sisähalkaisijalla olevalla letkulla ja tuodaan öljypohjaan läpivientiliittimen avulla. Paluuletkussa ei ole painetta, jonka vuoksi helpon asennuksen vuoksi voidaan käyttää letkuliittimiä, klemmareita ja öljyn- sekä lämmönkestävää letkua.

Ahtimen kiinnittämiseksi pakosarjaan käytän M8-pinnapultteja, joille tein kierteet pakosarjan laippaan helpomman asentamisen ja ahtaan tilan vuoksi. Ahtimen kiinnityksessä ongelmallista on usein kuumuudesta ja värinästä johtuva pulttien löystyminen, jolloin tiiviste voi pettää. Tiivisteeksi valitsin ohuen peltitiivisteiden ja mutterien alle asensin nordlock-aluslevyt, jotka pitävät liitoksen kiinni hyvin myös värinästä. Myös pakoputkiston tulen kiinnittämään ahtimeen samalla tavalla käyttäen pinnapultteja ja nordlockeja mutterien alla.

4.2 Turbomoottorin muut osat

4.2.1 Ilmansuodatin

Turboahtimen imupuolelle asennettavan ilmansuodattimen tehtävänä on poistaa moottoriin kulkeutuvasta ilmasta epäpuhtaudet. Pienijakoinen lika ja pöly voi kuluttaa moottoria nopeammin, ja suurikokoinen vieras partikkeli voi aiheuttaa moottorin tuhon hyvinkin nopeasti. Oikein mitoitettu ja valittu ilmansuodatin ei rajoita ilmanvirtausta ja tehoa juurikaan, minkä vuoksi syytä suodattimen käyttämättä jättämiselle ei ole. Turbomoottorissa liian pieni ilmansuodatin tai muu ilman virtausta haittaava tekijä voi aiheuttaa muun muassa öljyvuotoa ahtimessa tai moottorin savutusta. Lisäksi riittämätön imuilman virtaus nostaa painesuhdetta, jolloin ahdin voi joutua ylikierröksille ja hajottaa ahtimen. (Bell 2007, osio 2, sivut 5 - 6; Honeywell 2012a.)

Ilmansuodatin mitoitetaan sen läpi kulkevan suurimman ilmavirran perusteella. Tarvittava tehollinen pinta-ala ”A” saadaan laskettua kaavan 6 mukaisesti, jossa ”CID” on moottorin tilavuus kuutiotuumina ja ”RPM” on moottorin suurin kierrosluku. Yksi litra vastaa noin 61,024 kuutiotuumaa. (K&N Engineering 2012.)

Kaava ei huomioi mitenkään, että ahdetussa moottorissa kulkee samankokoista vapaasti hengittävää moottoria enemmän ilmaa. Tämän vuoksi kompensoin suurempaa ilman määrää kertomalla moottorin tilavuuden painekotelossa vallitsevan paineen ja ilmanpaineen suhteella, joka on likimäärin 2:1, kun ahtopaine on 1 bar.

KAAVA 6. Ilmansuodattimen pinta-alan määrittäminen (K&N Engineering 2012)

$$A = \frac{CID \times RPM}{20839} = \frac{\left(1,298L \times \frac{2}{1} \times 61,024 \text{ in}^3 / L\right) \times 10900 \text{ rpm}}{20839}$$

$$\approx 82,9 \text{ in}^3 (535 \text{ cm}^2)$$

Ilmansuodattimen valintaan vaikuttaa pinta-alan lisäksi käytettävissä oleva tila, minkä vuoksi suodattimia on saatavilla lukuisia erilaisia. Yleisiä malleja ovat lie-

riön ja kartion muotoiset suodattimet. Lasketaan seuraavaksi kaavan 7 mukaisesti erään potentiaalisen ilmansuodattimen pinta-ala. Suodatin on malliltaan katkaistu suora ympyräkartio, jonka suurempi halkaisija on 149 mm, pienempi 133 mm ja korkeus 127 mm. Kaavassa ”R” on suuremman ja ”r” pienemmän ympyrän säde, ”s” sivusärmän pituus ja ”h” päätyjen kohtisuora etäisyys.

KAAVA 7. Katkaistun suoran ympyräkartion vaipan pinta-ala (Valtanen 2008)

$$\begin{aligned} Av &= \pi \times s \times (R + r) = \pi \times \sqrt{(R - r)^2 + h^2} \times (R + r) \\ &= \pi \times \sqrt{(74,5\text{mm} - 63,5\text{mm})^2 + (127\text{mm})^2} \\ &\quad \times (74,5\text{mm} + 63,5\text{mm}) \approx 55238\text{mm}^2 \end{aligned}$$

Vaipan koon perusteella suodatin on moottorin sopiva valinta, sillä koko osuu hyvin kohdalleen ollen vain noin 3 prosenttiyksikköä ihanteellista pienempi. Edellä laskettu oli kuitenkin vain ympyräkartion ulkovaipan pinta-ala. Lisää virtauspinta-alaa tuo kaksoiskartiorakenne, sillä suodattimen päädyssä on pienempi kartio joka kapenee sisälle päin. Lisäpinta-alan turvin koko on varmasti riittävä ja suodattimen huoltoväliä saadaan pidennettyä.

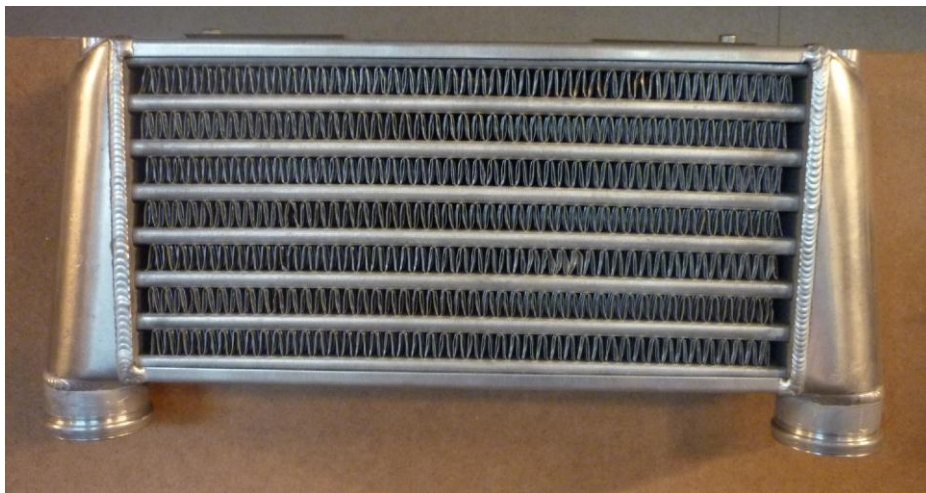


KUVIO 13. K&N RR-2803 kaksoiskartiosuodatin, joka kiinnitetään suoraan ah-
timen kompressoripesään (K&N Engineering 2012)

4.2.2 Välijäähdytys

Välijäähdytyksen tarkoituksena on jäähdyttää ahtimen kuumentamaa ilmaa ja saada sen tiheys mahdollisimman suureksi. Viileämmän imuilman vuoksi myös pakolämmöt ovat saman verran pienemmät, jolloin männät ja venttiilit pysyvät viileämpinä. Välijäähdytyksen tehokkuutta kuvataan hyötysuhteella, joka kertoo, kuinka monta prosenttia ahtimen lisäämästä lämpötilasta saadaan poistettua. Ahdetun ilman jäähdyttämisen lisäksi välijäähdytyksellä saadaan pienennettyä moottorille vaarallisen nakutuksen esiintymisen todennäköisyyttä. Nakutusta voi aiheutua useista eri syistä, mutta sillä tarkoitetaan ennen aikaista ja hallitsematonta palamista, joka rasittaa moottorin osia ja aiheuttaa nopeasti moottorivaurion. (Bell 2002, 142; Mauno 2005, 114.)

Yksinkertaisin välijäähdytin on ilma-ilma-tyyppinen kenno, jolla jäähdytetään ilmaa viileämmän ulkoilman avulla. Ahtoilma kulkee jäähdyttimen päädyistä toiseen ohuiden putkien läpi, joiden sisäpinnassa on turbulaattoreita edistämässä ilman pyörteilyä ja kosketusta seinän kanssa. Runsas määrä turbulaattoreita tehostaa jäähdytystä, mutta lisää painehäviötä. Jäähdyttimet ovat useimmiten valmistettu alumiinista sen hyvän lämmönjohtavuuden ja kohtuullisen hinnan vuoksi. Ilma-ilma-välijäähdytyksen hyviä puolia ovat yksinkertaisuus ja toimintavarmuus, eikä se vaadi puhtaana pitämisen lisäksi muuta huoltoa. (Bell 2002, 148 - 149, 162.)



KUVIO 14. Pienikokoinen ilma-ilma-tyyppinen välijäähdytin.

Välijäähdytin mitoitetaan ensisijaisesti putkien virtauspinta-alan perusteella. Bellin mukaan (2002, 152) jäähdytettävän ilman virtauspinta-alan tulee olla tehokkaalla jäähdyttimellä minimissään $5 \text{ in}^2/100 \text{ hv}$ (noin 3200 mm^2) putkien pituuden ollessa välillä 8-12” (noin 203 – 305 mm). Arvioidaan tämäntyyppisen jäähdyttimen soveltumista projektiin mitoittamalla kenno. Valitsin laskua varten kennon paksuudeksi 60 mm, joka on melko yleinen koko. Koska putket eivät ole vierekkäin, vaan välissä on jäähdytysripoja likimäärin tasajaolla, käytetään laskussa lisäksi kerrointa 2. Lasketaan kaavasta 8 kennon tarvittava minimikorkeus K .

KAAVA 8. Jäähdytinkennon koon laskeminen (Bell 2002, 152)

$$K = \frac{300hp \times \frac{3200mm^2}{100hp} \times 2}{60mm} = 320mm$$

Projektin tavoitteena olevalle 300 hv:n teholle tarvittaisiin kaavan perusteella mitoitettuna jäähdytin, jonka kennon päädyn vähimmäiskoko olisi noin 60 mm * 320 mm ja jäähdytysputkien pituus 203 – 305 mm. Kennon koon lisäksi päädyt kasvattavat jäähdyttimen kokoa ja hankaloittavat tämän kokoisen jäähdyttimen sijoittamista moottoripyörään.

Toinen kennoon perustuva järjestelmä on vesi-ilma-välijäähditys, jossa ilmaa jäähdyttävänä elementtinä on ilman sijasta vesi. Vettä kierrätetään välijäädyttimen läpi yleensä sähköpumpulla ja jäähdytetään erillisessä kennossa ilman avulla. Vaikka vesi-ilma-jäähdytyksessä on enemmän osia, saattaa se silti soveltua kohteisiin, joissa ilma-ilma-jäähdyttimelle ei ole tilaa. Tämä johtuu ilmaan verrattuna veden 14-kertaisesta kyvystä siirtää lämpöä alumiinista, jonka takia lämmön talteenottoon riittää pienempi välijäädyttimen kenno. Vesijäädyttimenkään ei tarvitse olla välttämättä iso, sillä vauhdissa sen läpi menevä jäähdyttävä ilmavirta on suhteessa huomattavasti suurempi kuin välijäädyttintä lämmittävä moottoriin menevä ilmavirta. Lisäksi normaaliajossa moottoria kuormitetaan kovemmin vain satunnaisesti ja kiihdytysten välillä on aikaa jäähdyttää lämmennyt vesi. (Bell 2002, 159 - 161.)

Kolmas potentiaalinen vaihtoehto on vesiruiskutus, jolloin moottoriin menevän ilman sekaan suihkutetaan vettä tai veden ja toisen polttoaineen, kuten metanolin, sekoitusta hienojakoisena sumuna. Tällä pyritään hidastamaan palamista ja sitä kautta vähentämään nakutusherkkyyttä, jolloin voidaan turvallisemmin käyttää suurempaa ahtopainetta ja saada lisää tehoa. Lisäksi vesi sitoo lämpöä ja sen avulla voidaan saada laskettua imuilman lämpötilaa reilustikin. Vesiruiskutuslaitteistoon kuuluu yleensä ainakin suutin, korkeapainepumppu, imusarjan paineanturi ja lämpöanturi. Kehittyneimmissä laitteissa käytetään lisäksi bensakarttojen tapaan 3-ulotteisia vesikarttoja, jolloin annostelussa voidaan ottaa huomioon muun muassa kierrosluku, polttoaineen seossuhde ja kaasunasento. Vesiruisku vie vaihtoehdoista vähiten tilaa ja on helpoin asentaa. Vesiruisku ei sinänsä tarvitse huoltoa, mutta vesisäiliö on muistettava pitää täynnä tai moottorivaurion uhka on ilmeinen. (Bell 2002, 167 - 168.)

Moottoripyörä 2012 messuilla vieraillessa huomasin, että ahdetuissa moottoripyörissä vesi/metanoli-ruiskutus oli käytetyin järjestelmä. Olen kuitenkin itse ensisijaisesti kennotyypin välijäähdyttimen kannalla, sillä vesiruiskutusta käytettäessä veden loppuminen tai laitteiston vikaantuminen voi aiheuttaa nopeasti moottorin täystuhon. Nestettä on myös lisättävä säännöllisesti, eli se tarvitsee säännöllistä huoltoa, toisin kuin kennotyypiset välijäähdyttimet. Vesiruiskun valitsemisen puolesta puhuu kohtuulliset kustannukset ja helppo asennus, jonka vuoksi varsinkin hienostuneemmilla ohjauksilla varustetut järjestelmät ovat yleistyneet viime aikoina.

Tähän moottoriin riittävän suuren ilma-ilma-välijäähdyttimen sovittaminen olisi hyvin hankalaa ja vesiruiskutuksesta en ole kovin innostunut, jonka vuoksi sopivin jäähdytys projektin moottoriin on mielestäni vesi-ilma-välijäähdytys. Hyvin suunniteltuna järjestelmä on tehokas, huoltovapaa ja luotettava ratkaisu. Pumppu voi tietysti vikaantua tai liitokset alkaa vuotaa, mutta kumpikaan ei aiheuta vesiruiskun vikaantumisen tapaan välitöntä vaaraa moottorille. Vesi-ilma-välijäähdytyksellä päästään tyypillisesti 75 % hyötysuhteen yläpuolelle (Bell Intercoolers 2011).

Selvitetään vielä välijäähdytyksestä saatava hyöty laskemalla ensin kompressorin aiheuttama lämpötilan nousu kaavan 9 mukaisesti. Laskemista varten tarvitaan kompressorikartta, josta nähdään, millä hyötysuhteella ahdin toimii kyseisellä ilmamäärällä ja painesuhteella. Otan laskutoimitusta varten "E":llä merkityn kompressorin hyötysuhteen moottoriin valitun Garrett GT3071R -ahtimen kompressorikartalta (LIITE 1), kun painesuhde on aiemmin tehtyjen laskujen perusteella 2,12 ja ilmamäärä 34,4 lb/min. Kaavassa "F" on painesuhteesta riippuva tekijä, kun $PR = 2,12$ (LIITE 2) ja "At" ahtimeen sisään menevän ilman lämpötila. Projektin moottorissa ilmansuodatin asennetaan suoraan kompressoripesään, minkä vuoksi imuilman lämpötila on sama kuin ilman lämpötila. Esimerkiksi autoissa lämpötila voi kuitenkin olla korkeampi, kun ilma otetaan konepellin alta, jossa moottori on lämmittänyt ilmaa. (Bell 2002, 68 - 69.)

KAAVA 9. Kompressorin aiheuttama lämpötilan nousu "Tr" (Bell 2002, 69)

$$Tr = \frac{F \times (At + 273) \times 100}{E} = \frac{0,225 \times (20^{\circ}C + 273) \times 100}{74\%} \approx 89,1^{\circ}C$$

Lasketaan kaavan 10 mukaisesti välijäähdyttimestä purkautuvan ilman lämpötila. Välijäähdyttimen hyötysuhteen oletetaan olevan 80 %, joka on tyypillinen arvo käytettäessä vesi-ilma-välijäähdytystä. "Dt" on kompressorista purkautuvan ilman lämpötila, eli ahtimeen imettävän ilman lämpötila, johon on lisätty ahtimen aiheuttama lämpötilan nousu. Tuloksesta nähdään, että käyttämällä välijäähdytintä imusarjan lämpötilaa saadaan laskettua yli 70 °C.

KAAVA 10. Välijäähdyttimestä purkautuvan ilman lämpötilan laskeminen

$$It = Dt - (Tr \times 0,80) = 109,1^{\circ}C - (89,1^{\circ}C \times 0,80) \approx 37,8^{\circ}C$$

4.2.3 Hukkaportti

Turboahdin on rakenteeltaan keskipakoispumppu, jonka perusluonteeseen kuuluu sen läpi virtaavan ilmamäärän kasvaminen neliöön suhteessa pyörimisnopeuteen. Tämän vuoksi pienillä kierroksilla ei saada tehtyä riittävästi virtausta ja suurilla kierroksilla virtaus on liian suuri. Liian suurta virtausta rajoitetaan ja sitä kautta ahtopainetta säädetään perinteisesti hukkaportin avulla. Käytännössä hukkaportti on venttiili, jota ohjataan kompressorilta saadun painetiedon avulla. Se rajoittaa turbiinisiiven pyörimisnopeutta ohjaamalla osan pakokaasusta turbiinin ohi, jolloin myös kompressorisiiven pyöriminen hidastuu pienentäen ilmavirtaa. Ahtopainetta voidaan rajoittaa muillakin tavoin, mutta hukkaporttiin perustuva järjestelmä on hyvin vakiintunut. (Bell 2002, 86, 103 - 107.)

Hukkaportin avautumista säädetään usein yksinkertaisella painekellolla. Sen sisällä on esijännitetty jousi pitämässä venttiiliä lähtökohtaisesti kiinni sekä kalvo, jonka toiselle puolelle tuodaan ahtopaine. Paineen noustessa kellossa jousi puristuu kasaan ja venttiili alkaa avautua. Tällaisen painekellon ominaisuus on, ettei venttiili aukea täsmälleen halutulla paineella, vaan se alkaa avautua, kun hieman päälle puolet ahtopaineesta on saavuttu. Tällöin venttiili vuotaa turbiinin pyörittämiseen käyttökelpoista energiaa silloin, kun sitä voisi vielä käyttää turbiinin kiihdyttämiseen. Tämän ongelman pohjalta on kehitetty muun muassa hydraulisesti toimivia hukkaportteja, joita on käytetty lähinnä ralliautoissa. Elektroninen ahtopaineen säätö progressiivisella ohjauksella toteutettuna on tehokas vaihtoehto. Elektronisesti ohjatun pulssinleveysmoduloinnin avulla voidaan säätää venttiilin ohjauspainetta niin, että toiminta saadaan nopeammaksi ja tarkemmaksi. (Bell 2002, 86, 108.)

Projektin moottoria ajatellen elektronisen ahtopaineen säätöjärjestelmä on kiinnostava, mutta ei ajankohtainen. Tarkoituksena on ensin rakentaa luotettava ja toimiva moottori, jota voidaan ajan mittaan kehittää paremmaksi. Tässä tapauksessa ahtopaineella ohjattu hukkaportin kello soveltuu kohteeseen hyvin, sillä rakenne on hyvin yksinkertainen ja hitaampi paineen nousu ei ole ongelma.

Hukkaportit ovat tyypiltään joko ulkoisia tai sisäisiä. Kustannustehokkuuden vuoksi valmistajat käyttävät usein sisäistä, jossa ohivirtauskanava on integroitu suoraan turbiinipesään ja ilman virtausta sen läpi kontrolloidaan läppäventtiilillä. Tällaisissa ahtimissa turbiini ja ohivirtaus yhdistyvät yleensä heti turbiinin jälkeen, joka aiheuttaa turbulenssia ja pakopainetta. (Bell 1997, 143, 146.)



KUVIO 15. Tyypillinen sisäinen hukkaporttiratkaisu, jossa oikeassa reunassa on turbiinisiipi ja vasemmassa reunassa läppäventtiili, joka hukkaportin kellon välityksellä ohjaa pakokaasua turbiinin ohi ja säätelee siten ahtopainetta.

Tehon kannalta olisi parempi, jos ohivirtauksella ja turbiinista tulevalla virtauksella olisi omat putket ja ne yhdistettäisiin vasta mahdollisimman myöhään. Tämä mahdollistetaan käyttämällä ulkoista hukkaporttia, jolloin turbiinille menevä virtaus haaroitetaan ja putki viedään erilliselle venttiilille, joka määrää ohivirtauksen suuruuden. Ulkoinen hukkaporttikin voi tosin häiritä turbiinivirtausta. Lisäksi liian jyrkässä kulmassa tehty putken haaroitus tai liian pienellä halkaisijalla voi aiheuttaa sen, ettei riittävästi virtausta mene riittävästi sen läpi. Tällöin kaasu kulkee turbiinin kautta ja päästää ahtopaineen karkaamaan haluttua korkeammaksi. Ulkoisen hukkaportin huonona puolena voidaan pitää suurempaa tilavaatimusta, monimutkaisuutta ja yleensä korkeampaa hintaa. (Bell 2002, 115 - 116.)

4.2.4 Pakosarja

Turbomoottorissa pakosarjan tehtävänä on paitsi kannatella ahdinta, myös pyörittää virtauksen avulla turbiinia mahdollisimman tehokkaasti tuottaen kompressorille tehoa koko kierrosalueella. Pakosarjan on oltava hyvin virtaava, koska virtaushäviöihin hukattu energia ei pyöritä turbiinia. Suuren virtausnopeuden saavuttamiseksi turbolle johtavissa putkissa kannattaa käyttää pienellä läpimitalla olevaa putkea. Putken koko määräytyy pitkälti kannen kanavien koon mukaan, mutta jos on valinnan varaa, kannattaa valita ennemmin pieni kuin iso sisähalkaisija. Virtaushäviöitä putkissa aiheuttaa muun muassa kynnykset liitoksissa, epätasaisuus putken sisällä ja valujäljet. Liitokset on siis syytä valmistaa tarkasti yhteen sopiviksi, käyttää sileäseinäistä putkea, poistaa mahdolliset valujäänteet ja valmistaa putket hyvin virtaaviksi välttämällä teräviä mutkia. Ihanteellinen pakosarjan materiaali johtaa huonosti lämpöä, sillä viilentynyt kaasu vie vähemmän tilavuutta ja hidastaa ilman virtausta. (Bell 2002, 257 - 260.)

Turbopakosarjan valmistaminen vapaasti hengittävään moottoriin tarkoittaa käytännössä sen tekemistä hitsaamalla putkista ja laipoista, sillä tavallisella harrastajalla ei ole mahdollisuuksia tehdä autovalmistajien tapaan valurautaista pakosarjaa. Pakosarjan materiaalin valintaan vaikuttaa muun muassa sen ominaisuudet, saatavuus, muoto ja hinta. Selvitykseni mukaan (LIITE 3) mutkaputkia on saatavilla muutamalla eri teräslaadulla, taivutussäteellä ja halkaisijalla. Eniten hintaan vaikuttaa materiaali: ruostumaton teräs maksaa noin 2- ja kuumalujateräs yli 5-kertaisesti tavalliseen teräsmutkaan verrattuna. Ruostumaton teräs sopii pakosarjan materiaaliksi hyvin terästä huonomman lämmönjohtokykynsä vuoksi, mutta sen ominaisuuksiin kuuluu terästä suurempi lämpölaajeneminen, joka on huomiotava suunnittelussa (Bell 1997, 118-119). Valitsin pakosarjan putkien materiaaliksi niin sanotun kattilaputken (P235GH) 38 mm:n halkaisijalla ja 3 mm:n seinämävahvuudella. Tämä on kohtuullisen edullista, mitoiltaan lähellä alkuperäistä, sileäseinäistä ja saumatonta. Pakosarjan rakentamiseksi tilasin 15 kappaletta 90° mutkia ja 400 mm suoraa putkea.

Hayabusassaärkevin paikka sijoittaa turboahdin on mielestani koneen edess. Tilaa ei silti ole paljoa kätettävissä, ja pahiten tilaa rajoittaa jähdyttimet ja eturenas, kuten kuvio 16 osoittaa. Kuvassa ylempi kaareva jähdytin on moottorin jähdytysnesteelle ja alempi moottoriöljylle. Käytännössä ahtimelle saadaan tehtyä hieman lisätilaa siirtämällä öljynjäähdytintä edemmäs ja teettämällä uudet letkut tai vaihtoehtoisesti jättämällä se kokonaan pois. Tällöin voidaan esimerkiksi siirtyä käyttämään vesijähdytteistä öljynjäähdytintä.



KUVIO 16. Ahtimelle luonnollisin sijoituspaikka on koneen etupuolella, jossa on valmistajan jäljiltä ahdasta.

Pakosarjan valmistusta ja suunnittelua helpottaa huomattavasti jigin tekeminen. Aloitin pakosarjan valmistuksen ottamalla mitat ja teettämällä laser-leikatut laipat sylinterinkanteen ja ahtimen turbiinipesään (liitteet 13 - 14). Laippojen kiinnittämisen jälkeen etsin ahtimelle sopivan kohdan ja hitsasin laipat väliaikaisesti yhteen lattaraudalla, jotta niiden keskinäinen sijainti pysyy muuttumattomana (kuvio 17). Näin toimiessa pakosarjan voi kokonaisuudessaan valmistaa irrallaan moottorista, kunhan huomioi, mistä kohtaa putkia voi vetää, etteivät ne osu esimerkiksi jähdyttimen kohdalle. Ahtimen paikkaa haettaessa kannattaa jousitus painaa ka-

saan kuormaliinoilla, jotta näkee, kuinka lähelle ahdinta rengas tulee jarrutuksessa. Lisäksi etupumput taipuvat jarrutuksessa hieman, minkä vuoksi on syytä jättää lisätilaa. Tässä vaiheessa on myös käännettävä ahtimen turbiini- ja kompressoripesä sopivaan asentoon ja varmistettava kaikkien osien, kuten öljy, vesi- ja ilmaputkien, ilmansuodattimen sekä hukkaportin kellon sopivuus. Lisäksi sijoittamista hankaloittaa vaatimus ahtimen asentamisesta öljypinnan yläpuolelle, ellei käytetä erillistä öljyn paluupumppua.



KUVIO 17. Pakosarjan ja turbiinipesän laippojen väliin hitsattavan väliaikaisen lattaraudan avulla laippojen keskinäinen sijainti saadaan pidettyä kohdallaan ja pakosarja voidaan valmistaa loppuun ilman moottorin läsnäoloa.

Kun jigi on valmis, voidaan keskittyä laippojen välisten putkien suunnitteluun. Käytävissä oleva tila rajoittaa mahdollisuuksia, mutta paljon on silti tehtävissä. Ideaalisesti jokaisesta putkesta kulkee läpi mahdollisimman tasainen virtaus tasaisin väliajoin. Hyvä pakosarja koostuu erillään kulkevista samanpituisista putkista,

jotka kulkevat jouheasti ja yhdistyvät mahdollisimman samansuuntaisina samassa kohdassa. Jos osa putkista yhdistetään jo aiemmin, tiettyjen osien läpi kulkee enemmän kaasua, jonka vuoksi ne myös lämpenevät enemmän ja ovat herkempiä halkeamaan. Jos putkia joudutaan esimerkiksi tilanpuutteen vuoksi yhdistämään toisiinsa jo ennen kollektoria, ei ole hyvä yhdistää sytytysjärjestyksessä peräkkäisten sylinterien putkia nopeasti, sillä venttiilien päällekkäisen aukioloajan vuoksi pakotahdissa olevasta sylinteristä poistuva pakokaasu pääsee virtaamaan imutahdissa olevaan sylinteriin ja huonontamaan sen täytöstä ja sitä kautta tehoa. Tällöin sytytysjärjestyksen ollessa Hayabusan tapaan 1-3-4-2, kannattaa yhdistää 1 ja 4 sekä 2 ja 3. (Bell 1997, 120; Bell 2002, 275.)



KUVIO 18. Hyvän pakosarjan tunnusmerkkejä ovat muun muassa pehmeät mutkat ja yksittäiset samanpituiset putket, jotka yhdistyvät kollektorissa ja ovat suunnattuja kohti turbiinia, kuten kuvan pakosarjassa.

Suunnitelmani pakosarjasta on esitetty liitteessä 16. Päätin toteuttaa pakosarjan niin, että tuon 1- ja 4-sylinterien putket yhteen taakse ja 2- ja 3-sylinterin eturiviin. Tällä rakenteella sain yhdistettyä oikeat putket toisiinsa ja putkien pituuden lähelle toisiaan. Kaikki putket yhdistyvät yhtä aikaa kollektorissa, ja niiden suuntaus

turbiinipyörää kohti on mahdollisimman hyvä. Kaikki putket ovat mutkista tehtyjä ja siten pehmeästi kääntyviä, eikä virtausvastusta lisääviä teräviä mutkia ole. Hitsit on samasta syystä hiottu sisäpuolelta kaikista liitoksista sileiksi ja putkien liitos turbiinipesän laippaan tehty tarkasti vastaavaksi, ettei porrasta ole lainkaan. Pakopaineen seuraamiseksi tein kollektoriin vielä helmiliitoksen, josta tuodaan 6 mm teräsputki painemittarille ja voidaan dynamometrijossa arvioida ahtimen turbiinipuolen mitoituksen onnistuneisuutta. Lopuksi hioin hitsauksesta hieman vedelleet putkilähdöt ja turbiinipesän laipan tasohiomakoneella suoraksi. Valmiin pakosarjan puhalsin alumiinioksidilla ja ruiskutin sen sisä- ja ulkopuolelta keraameilla vahvistetulla pinnoitteella. Pinnoitteen tehtävänä on parantaa lämmön pysymistä putkiston sisällä, estää ruostumista ja antaa viimeistely ilme.



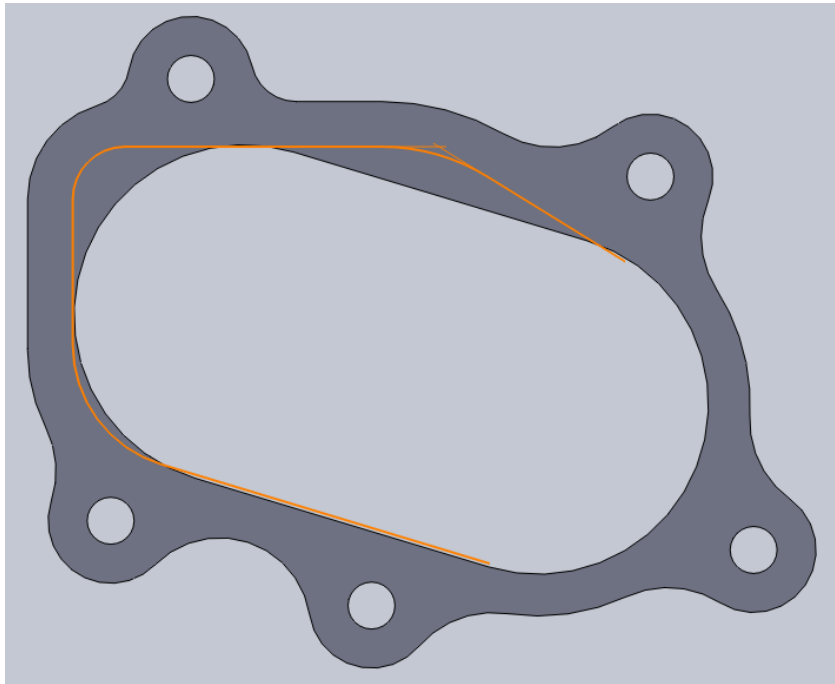
KUVIO 19. Alumiinioksidilla puhallettu ja pinnoitusta vaille valmis pakosarja.

4.2.5 Pakoputkisto

Pakokaasujen matka ahtimelta jatkuu pakoputkea pitkin äänenvaimentimelle. Kuten hukkaporttien yhteydessä kerrottiin, niin sisäisellä hukkaportilla varustetuissa ahtimissa ohivirtaus ja turbiinista tuleva virtaus yhdistetään tavallisesti heti purkautumisen jälkeen, joka aiheuttaa turbulenssia ja pakopainetta alentaen tehoa. Pyörteilyn hillitsemiseksi voidaan sisäistä hukkaporttia käytettäessä rakentaa erilaisia ilmaa ohjaavia osia, joiden avulla turbiini- ja ohivirtaus saadaan pidettyä erillään pidempään. Esimerkiksi projektin ahtimessa molemmat virtaukset purkautuvat samansuuntaisina ja vierekkäin, jolloin turbiinilta lähtevän pakoputken alkuun voidaan rakentaa väliseinä ja johtaa virtaukset erillisiä putkia pitkin ja yhdistää vasta myöhemmin. Tällainen tai muulla tavalla virtaukset erillään pitävä putkisto kannattaa mielestäni toteuttaa, jos vain tilaa riittää ja turbiinipesän muotoilu sen sallii. (Bell 2002, 268 - 269.)

Tehon kannalta ihanteellinen tilanne olisi, kun turbiinipesän jälkeen ei olisi putkistoa ollenkaan. Tällöin ei olisi myöskään turbiinia hidastavaa pakopainetta. Tämän vuoksi joissain kilpa-ajoneuvoissa turbiinipesältä ei lähde muuta putkistoa kuin mahdollisimman iso ja suora putki. (Bell 1997, 131.)

Vaikka turboahdin vaimentaakin jonkin verran ääntä, asennetaan Hayabusaan kuitenkin erillinen äänenvaimennin ja sille johtava putkisto. Turbiinipesältä päätin aloittaa putkiston teon mahdollisimman isokokoisella 3” putkella, jonka vuoksi suunnittelin uuden laipan turbiinipesän ulostuloon (LIITE 15). Uudessa laipassa mitoitin reiän niin, että ovaalinmuotoiseksi litistetty 3” putki sopii sen sisäpuolelle ja on siten helposti ja siististi hitsattavissa kiinni. Aivan putkiston alkupäähän tulee kiinnitys lambda-anturille seossuhdemittausta varten. Koneen alapuolella muutan putken 2,5” halkaisijalle, jotta jää enemmän tilaa viedä se pyörän takaosaan äänenvaimentajalle.



KUVIO 20. Muokattu ahtimen laippa pakoputkiston alussa, johon on oranssilla viivalla merkitty alkuperäinen muoto. Eroavaisuudet jyrsitään laipan sisäpuolelta viistoiksi niin, ettei synny kynnystä ahtimen ja laipan välille.

Äänenvaimentimia on olemassa tyypiltään useita erilaisia, mutta moottoripyörissä käytettävät ovat yleensä joko absorptio- tai refleksio-tyyppisiä vaimentimia. Alun perin Hayabusassa käytetään kahta jälkimmäisen tyyppin vaimenninta, joiden toiminta perustuu väliseiniin ja putkiin, joiden kautta ääni kimpoilee ulos. Turbo-käyttöön paremmin soveltuu absorptiovaimennin, sillä ilma kulkee suoran reikäputken läpi, jonka ympärillä on vaimenninmateriaalia. Tällaisella rakenteella ei pääse syntymään niin paljon virtausvastusta ja siten pakopaine turbiinin jälkeen saadaan pidettyä pienempänä. Painon ja monimutkaisuuden vähentämiseksi siirrytään käyttämään vain yhtä absorptiotyyppistä vaimenninta. (Bell 1997, 131, 136; Mauno 2002, osio 2, sivu 41.)

4.2.6 Painekotelo

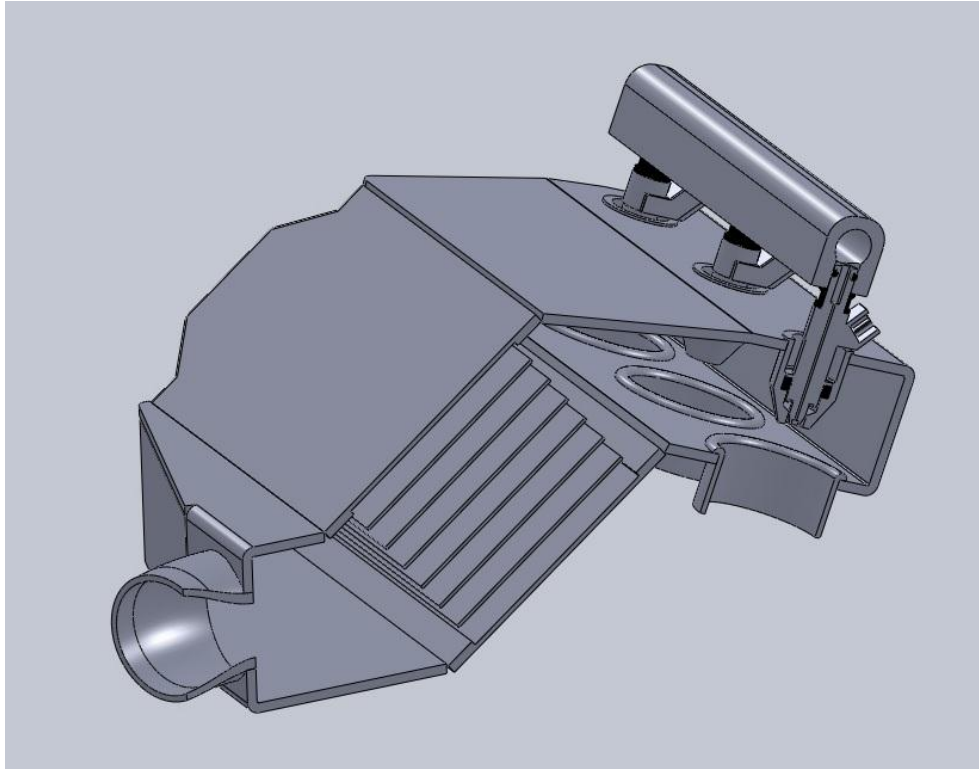
Painekotelon tehtävänä on jakaa ahtimelta tuleva ilmavirta tasaisesti jokaiselle sylinterille (Bell 2002, 226). Tässä projektissa painekotelo valmistetaan alusta asti ja asennetaan alkuperäisen ilmansuodatinkotelon tilalle. Koteloon asennetaan neljä kappaletta lisäsuuttimia ja kiinteä vesi-ilma-välijäähdyttimen kenno, jossa kierätetään jäähdytysnestettä. Selkeyden vuoksi mainittakoon, että painekotelossa kierrätettävä neste ei ole samaa kuin moottorissa kiertävä jäähdytysneste. Paine- koteloon tulee myös anturointia, kuten MAP-anturi mittaamaan imusarjan painetta sekä imuilman lämpötila-anturi. Hyvän lämmönjohtavuuden vuoksi kotelo valmistetaan kokonaisuudessaan alumiinista. Kotelo liitetään kaasuläppäkoteloihin silikoniletkuilla ja lisäksi sivuille tehdään kiinnitykset sylinterikanteen, ettei kotelo irtoa paineen vaikutuksesta.

Painekotelon onnistuneisuuden määrittää se, kuinka tasaisesti se jakaa ilman sylinterien kesken. Tasaista jakautumista voidaan edistää muun muassa tekemällä painekotelosta symmetrinen ja hidastamalla sekä ohjaamalla ilmaa. Imukaulojen lähdöt on syytä pyöristää ja muutenkin virtaviivaisuus ja pehmeät muodot auttavat ilmaa kulkemaan paremmin ilman pyörteilyä. Sopiva painekotelon tilavuus on 0,8 – 1,5 kertaa moottorin iskutilavuus, eli tässä tapauksessa 1,04 - 1,95 L. Lähtökohtaisesti kuitenkin suurempi on parempi ja moni kannattaa vielä suurempaa koteloa. (Bell 2002, 226 - 229.)

Suunniteltavan painekotelon maksimikoon ja osittain muodon määrää tässä tapauksessa pitkälti käytettävissä oleva tila, jonka rajaa sylinterikansi, runko ja polttoainetankin pohja. Muotoon vaikuttaa voimakkaasti myös välijäähdyttimen kenno, joka sovitetaan painekotelon yhteyteen. Mallinnusta varten otin tilasta mittoja ja arvioin millainen kotelo tilaan olisi sovitettavissa. Päädyin valitsemaan saatavilla olevista kennoista sellaisen, jonka mitat ovat noin 235 mm x 89 mm x 89 mm ja jota suositellaan 350 hv asti.

Valinnan jälkeen mallinsin kennon ja koteloon tulevat lisäsuuttimet Solid Works 3D-ohjelmalla ja aloin suunnitella koteloa. Päätin sijoittaa suuttimet kotelon takaosaan niin, että ne ruiskuttavat polttoaineen suoraan kaasuläppäkoteloihin. Tällä

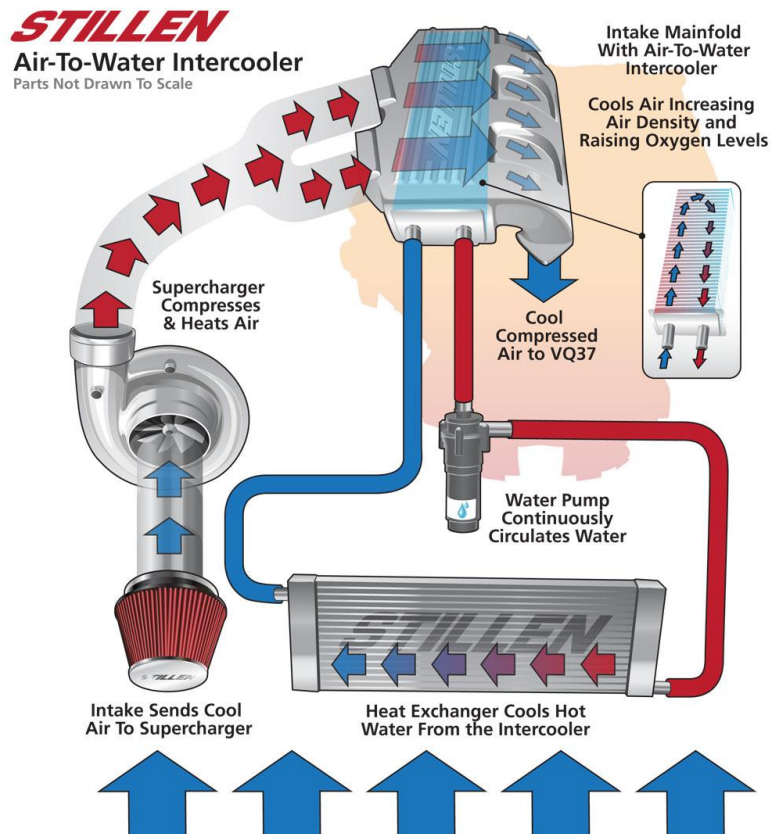
kohtaa kotelon on siten ulkomitoiltaan oltava ohuempi, koska suuttimet ja polttoainekisko vie tilaa noin 50mm. Tilan puutteen vuoksi ilman sisääntuloa ei saa sijoitettua symmetrisesti kotelon keskelle, mutta ilman parempaa jakautumista voidaan edistää hidastamalla ja ohjaamalla ilmavirtaa leventämällä nopeasti tilavuutta heti sisääntulon jälkeen. Paine-kotelon suunnitelma on esitetty kuviossa 15.



KUVIO 21. Halkileikkaus painekotelosta. Ilman tasaista jakautumista edistää symmetrisyys, jonka lisäksi kasvattamalla tilavuutta nopeasti sisääntulon jälkeen voidaan ilmaa hidastaa ja ohjata paremmin.

Paine-kotelon suunnittelemisen yhteydessä tein osista piirustukset (liitteet 6-12), joiden perusteella levyosat leikattiin laserilla 4 mm paksusta alumiinista. Suutinholkit ja imukaulat teetin koneistamalla, ja polttoainekisko oli valmista profiilia, johon koneistettiin suuttimien paikat ja tehtiin päätyihin letkuliitokset. Osien sopivuuden varmistamisen jälkeen hitsasin kotelon tigillä kasaan ja tein antureille kiinnityspisteet sekä varmistin kotelon kiinnityksen sylinterikanteen ja runkoon.

Vesi-ilma-välijäähdyttimen kennon lisäksi järjestelmään kuuluu jäähdytysnestettä kierrättävä pumppu, jäähdytyskenno, vesisäiliö ja niitä yhdistävät letkut. Jäähdytysnestettä kierrättävän pumpun tulisi olla sellainen, joka kestää jatkuvaa käyttöä kuumentumatta ja kierrättää vettä noin 15 - 20 l/min. Vettä jäähdyttävän kennon kokoon vaikuttaa eniten järjestelmän kokonaistilavuus, pumpun tuotto sekä se, kuinka kauan moottoria kuormitetaan ahtopaineilla ja miten paljon jää aikaa jäähdyttää nestettä kiihdytysten välillä. Jos kiihdytyksiä on harvoin, niin järjestelmän ei tarvitse olla muuta kuin riittävän iso tilavuudeltaan varastoidakseen kiihdytyksessä syntyvän lämmön. Lämpö voidaan jäähdyttää myöhemmin rauhallisemman ajon aikana. Pumpun eliniän pidentämiseksi on myös järkevää tehdä jonkinlainen ohjaus sille esimerkiksi lämpöanturin tai aikareleen avulla niin, että pumppu pyörittää vettä kennossa vain kun sille on tarvetta. (Bell 2002, 160 - 161.)



KUVIO 22. Paineotelon yhteyteen rakennetun vesi-ilma-välijäähdytyksen periaatekuva (Enginebasics.com 2010)

Valitsin pumpuksi Boschin alun perinkin tähän käyttöön tarkoitetun mallin. Pumppu tuottaa virtausta 30 litraa minuutissa, ja sen letkuliitäntä on sopivasti ¾” (19,05 mm). Katukäytössä suurin osa ajasta on tasakaasulla ajoa, mikä puoltaa pienen jäähdyttimen käyttämistä. Toisaalta suurempaa jäähdytintä käyttämällä voidaan pienentää vesisäiliön kokoa tai jopa jättää se kokonaan pois. Jäähdyttimen kokoa rajoittaa moottoripyörässä vahvasti tilanpuute, joten jäähdytimeksi on helppo valita suurin, mikä vain on kohtuullisella vaivalla sovitettavissa. Vesisäiliö jätetään toistaiseksi pois, mutta tarve arvioidaan uudelleen, kun järjestelmää päästään testaamaan. Mielestäni Hayabusassa paras tapa sijoittaa jäähdytin on hankkia alkuperäistä moottorin vesijäähdytintä vastaava, mutta pienempi kaareva kenno sen etupuolelle. Kun korkeus on noin puolet pienempi kuin alkuperäisellä, riittää jäähdyttimelle tilaa myös jarrutuksessa, kun jousitus painuu kasaan. Jäähdyttimen aihiksi valitsin Suzuki TL1000 -moottoripyörän ylemmän vesijäähdyttimen, joka on muodoltaan oikeanlainen, mutta vaatii letkulähtöjen ja kiinnitysten muokkausta.

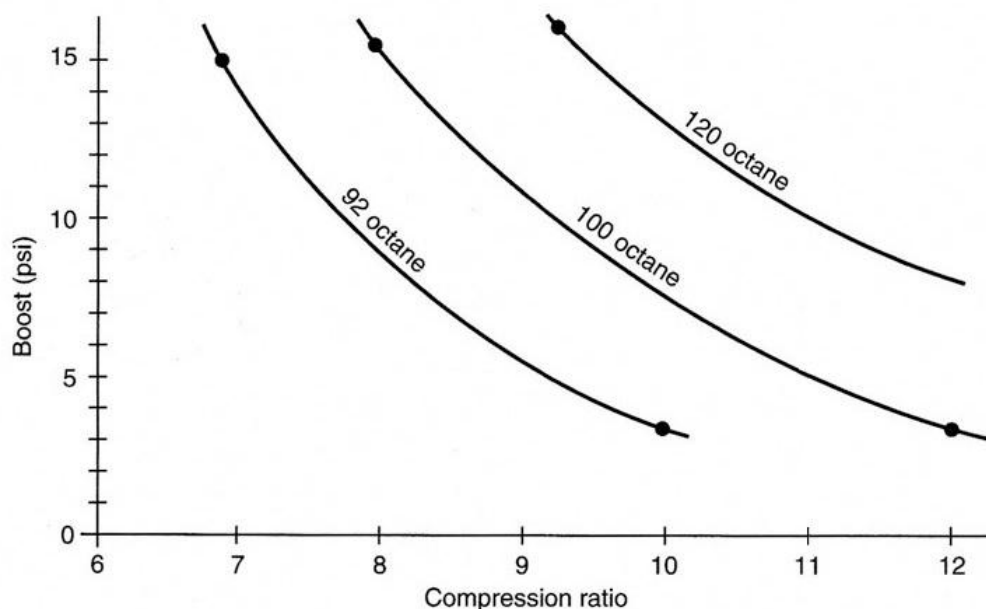
4.3 Moottorin mekaniikka

Suunnitteluvaiheessa moottorin luotettavuuteen ja mekaaniseen kestävyyspystytään vaikuttamaan monella tavalla. Kaikkien osien mitoitus ei ole valmista kaavaa, minkä vuoksi osia on myös mitoitettava muiden kokemuksen ja parhaan arvauksen perusteella. Komponentitasolla lopputuloksen onnistuneisuuteen voidaan vaikuttaa valitsemalla laadukkaita ja hyväksi havaittuja osia. Kustannuksia ajatellen on järkevää miettiä, mitä osia voidaan hankkia käytettyinä ja milloin olisi syytä ostaa uusi osa. Moottorin on myös mekaanisesti oltava hyvässä kunnossa. Tämän vuoksi moottori paitsi huolletaan, myös puretaan kokonaan, tarkastetaan ja mitataan. Kuluneet osat vaihdetaan uusiin käyttäen alkuperäisiä tai vähintään yhtä laadukkaita varaosia. Asennettaessa selvitetään oikeat työmenetelmät, käytetään laadukkaita työkaluja ja tarvittaessa teetetään työ ammattilaisella.

4.3.1 Puristussuhde

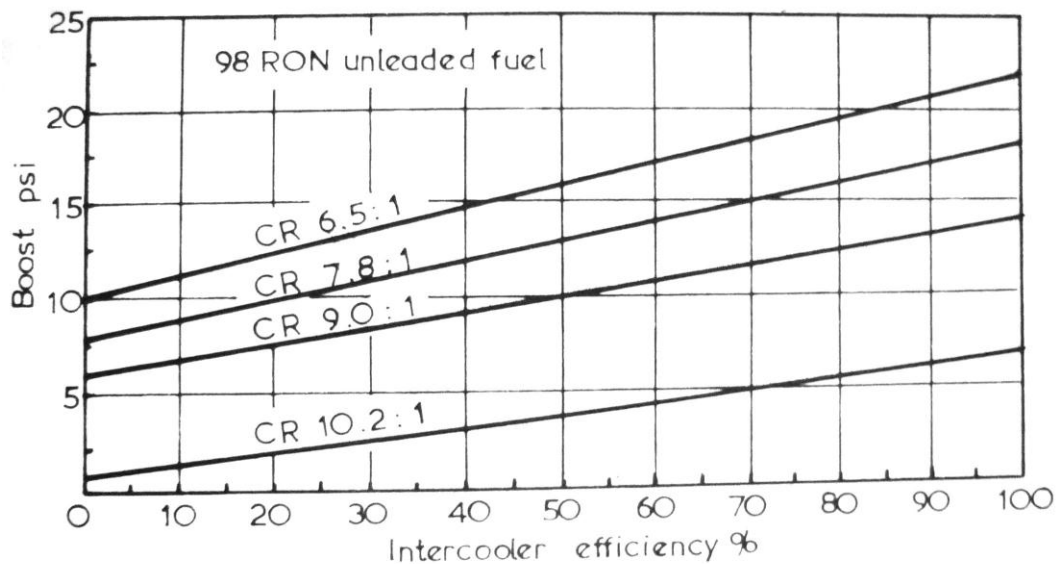
Moottorin puristussuhteella tarkoitetaan sylinterin ja palotilan yhteenlasketun tilavuuden suhdetta palotilan tilavuuteen. Vapaasti hengittävässä moottoreissa käytetään polttoaineen puristuskestävyyden rajoissa yleensä suurta puristussuhdetta, koska se lisää tehoa koko kierrosalueella. Liian suuri puristussuhde aiheuttaa nakutusta, eli ennenaikaista ja hallitsematonta palamista, joka rasittaa moottorin osia suunnattomasti ja aiheuttaa nopeasti moottorivaurion. Ahdetuissa moottoreissa puristussuhde on usein matalampi, sillä ahtopainetta korottaessa nakutusherkyys kasvaa. (Mauno 2005, 155.)

Kuviossa 23 on esitetty miten sallitun ahtopaineen suuruus riippuu puristussuhteesta ja polttoaineen oktaaniluvusta. Siitä voidaan tulkita, että moottorin alkupe-
räisellä 11:1 puristussuhteella ja 99-oktaanisella bensiinillä voitaisiin käyttää noin 5 psi:n (0,35 bar) suuruista ahtopainetta, jolla ei saavuteta haluttua tehoa edes kunnollisella välijäähdytyksellä. (Bell 1997, 155.)



KUVIO 23. Arvioitu sallitun ahtopaineen suuruus eri puristussuhteilla ja polttoaineen puristuskestävyyden arvoilla (Bell 1997, 155)

Laskemalla puristussuhdetta mahdollistetaan suurempien ahtopaineiden käyttö. Sopiva puristussuhde on kompromissi, sillä liian suuri aiheuttaa nakutusta ja liian pienellä teho varsinkin ennen ahtimen heräämistä kärsii. Uuden puristussuhteen valintaan vaikuttaa käytettävän polttoaineen ohella tärkeimpinä haluttu ahtopaineen suuruus ja välijäähdytyksen tehokkuus. Kuviosta 24 nähdään, miten pienempi puristussuhde ja tehokas ilmanjäähdytys sallivat suuremman ahtopaineen käytön. Lisäksi voidaan tulkita, että vaikka moottorin puristussuhde laskettaisiin niinkin alas kuin 6,5:1, niin ilman välijäähdytystä ei voitaisi käyttää juurikaan yli 10 psi:n (0,69 bar) ahtopainetta. (Bell 1997, 156, 164.)



KUVIO 24. Sallittuja ahtopaineen arvoja modernille neliventtiiliselle moottorille käytettäessä polttoaineena 98-oktaanista bensiiniä (Bell 2002, 77)

Ilmamäärän laskemisen yhteydessä todettiin, että tehon saavuttamiseksi tarvitaan painetta noin 31,1 psia. Koska normaali ilmanpaine merenpinnan tasolla on noin 1,01 bar (14,7 psia), tarvitaan imusarjaan 16,4 psi (1,1 bar) ylipaine, eli ahtopaine. Tällöin kuviosta 2 voidaan tulkita, että turvallinen puristussuhde 80 %:n hyötysuhteella toimivan välijäähdytyksen kanssa olisi välillä 7.8:1 - 9.0:1.

Puristussuhteen laskemiseksi on moottorin rakenteesta riippuen useita keinoja. Yksinkertaisimmillaan puristussuhdetta voidaan laskea asentamalla paksumpi kannentiiviste tai sylinteriryhmän alle tuleva korokelevy. Bellin mukaan (1997, 157.) nämä ovat kuitenkin vääriä tapoja. Palotila on yleensä suunniteltu siten, että mäntien ulkoreunoilla on hyvin pieni välykäs sylinterinkanteen nähden, jonka tarkoituksena on lisätä ilman pyörteilyä parantaen palamista ja tehostaa pakokaasun poistumista sylinteristä. Laskemalla puristussuhdetta väärin, eli suurentamalla tätä välystä liikaa, on mahdollista saada esimerkiksi 7:1 puristuksella oleva moottori nakuttamaan pahemmin kuin oikealla välyksellä oleva 9:1 puristeinen. Vaihtoehtoisiksi jää oikeastaan vain lisätilavuuden jyrkiminen kanteen tai mäntään, jos se pystytään tekemään heikentämättä osia liikaa. Paras vaihtoehto olisi kuitenkin kokonaan uudet matalapuristeisemmat männät, joissa käytännössä on korkeat reumat ja kuoppa keskellä. (Bell 1997, 157; Bell 2002, 366.)

4.3.2 Männät

Turbomännässä on männän laen muotoilun ja erisuuruisen puristussuhteen lisäksi muitakin eroja vapaasti hengittävän moottorin mäntään. Männät ovat yleensä valamisen sijasta valmistettu takomalla, mikä tekee niistä tiheämpiä ja kestävämpiä. Mäntien suurin vihollinen on kuumuus ja siitä aiheutuva nakutus, joita voidaan ehkäistä tehokkaalla lämmönsiirrolla männästä sylintereihin. Takomalla valmistetun männän eli takomännän lämmönjohtokyky on valumäntää parempi. Männän alareunan lämpötila on usein miltei 40 °C alempi kuin valumännässä. Takomäntien huono puoli katukäytössä on yleensä niiden suurempi lämpölaajeneminen, jonka vuoksi niiden kanssa käytetään suurempaa männän ja sylinterin välystä, joka lisää männän kulumista. Tärkeä ero turbomännässä on männänrenkaiden suurempi etäisyys toisistaan ja männän laesta. Alemmas mentäessä männän lämpötila laskee, jolloin rengasta tukeva alue pysyy paremmin muodossaan. Liian kuumana materiaali pehmenee ja joustaa, jolloin rengasta tukeva alue taipuu aiheuttaen huonomman lämmönjohtumisen sylinteriin ja männän välillä, joka kuumentaa mäntää entisestään. Liiallinen taipuminen voi aiheuttaa myös männänrenkaan jumittumisen. Kun koko mäntä kuumentuu ja laajenee liikaa, lopulta se jumittuu aiheuttaen moottorivaurion. Ahdetussa moottorissa palotilan osat käyvät

kuumempina kuin vapaasti hengittävässä, jonka vuoksi paremmin lämpöä kestävien ja johtavien turbokäyttöön suunniteltujen mäntien käyttö on suositeltavaa. (Bell 2002, 361 - 369.)

Hayabusassa käytetään jo tehtaalta lähtiessään takomäntiä, joita harrastajat ovat käyttäneet menestyksekkäästi turboahdetuissa moottoreissa. Useissa moottoreissa on puristussuhteen laskemiseksi käytetty pelkästään sylinteriryhmän alle asennettavaa nostolevyä. Mitään laskukaavaa ei ole olemassa siitä mihin asti männät riittävät, vaan niiden korvaamisen suhteen täytyy toimia parhaan arvion mukaan. Projektin moottorin suunnittelussa pyritään kiinnittämään erityistä huomiota kestävyteen ja luotettavuuteen, minkä vuoksi turbokäyttöön suunniteltuihin mäntiin kannattaa mielestäni panostaa tässä projektissa. Niillä saadaan muiden etujen lisäksi puristussuhde oikeaksi pilaamatta männän ja kannen välistä paljealuetta.

Mäntäsarjat ovat likimain samanhintaiset, ja muiden harrastajien kokemuksia perusteella vaikutti myös, että ei ole selkeästi parempia ja huonompia mäntiä. JE-Pistonsin uutuustuote herätti kuitenkin mielenkiinnon, sillä syksyllä 2011 he esittelivät ensimmäisinä maailmassa moottoripyörämarkkinoilla juuri Hayabusan turbokäyttöä varten suunnitellun takomännän, joka on hyllytavaraa ja saatavissa vakiokoon lisäksi 2 mm ylikoossa. Mäntäsarjaa on testattu ja kehitetty prostreetluokan turboahdetussa Hayabusassa. 2618 T6-alumiinista valmistetuissa männissä on kapea ja lyhyt helmaosa, jota tuetaan sisä- ja ulkopuolisilla tuilla. Männän muotoilu käy parhaiten ilmi kuvista 25. Valmistaja suosittelee näiden mäntien ja sylinterin välykseksi 0,08 mm:ä, joka vastaa valumäntien välystä. Valitsin projektin moottoriin kyseiset männät 8.7:1 puristussuhteella. Mäntien puristusmittaus, eli matka männäntapista laelle, on 2 mm vakiota pidempi, minkä vuoksi sylinteriryhmän alle on asennettava alumiinilevy korkeuseron kompensoimiseksi. (Bell 2002, 363; Sportrider 2011; Hayabusazone 2012b.)



KUVIO 25. Turbokäyttöön tarkoitetuilla matalapuristeisilla männillä saadaan muiden etujen lisäksi puristussuhdetta laskettua pilaamatta paljealuetta. Huomaa tasainen männän laki ja reunoilla oleva korkea tasainen alue.

Kuten aiemmin todettiin, sopiva paljealueen välys tehostaa palamista ja ehkäisee nakutusta. Sylinterikantta ja sylinteriryhmää on saatettu aiemman omistajan toimesta muokata, jonka vuoksi mäntien vaihtamisen ja muidenkin palotilaan liittyvien muutosten yhteydessä on syytä mitata ja säätää välys. Alun perin rakoa jää 0,050” (1,27 mm), mutta harrastajien kokemusten mukaan paras välys hieman kokoonpanosta ja käyttötarkoituksesta riippuen asettuu usein 0,036” ja 0,043” (0,9144 – 1,0922 mm) välille. Bell suosittelee (2002, 365) teräksisillä kiertokangilla välykseksi vähintään 0,040” (1,016 mm), johon itsekin välyksen asetin käyttämällä kahta 0,010” shimmilevyä 2 mm paksuisen korotuslevyn lisäksi.

Paljealueen välyksen lisäksi on syytä tarkistaa venttiilien minimietäisyys mäntään. Tämä voidaan tehdä kasatussa koneessa pyörittämällä konetta, kunnes venttiilin nosto on maksimissaan ja sen jälkeen painamalla venttiili mäntään asti kiinni ja mittaamalla liike mittakellon avulla venttiilikupista. Toinen vaihtoehto on laittaa muovailuvahaa männän päälle venttiilin alueelle, kasata kone ajoitetuilla nokilla, pyörittää muutama kierros, irrottaa kansi ja mitata puristuneen muovailuvahan paksuus. Tällä keinolla voidaan selvittää myös venttiilin sivuttainen etäisyys männän syvennyksiin ja paljealueen välykset. Koska moottoriin vaihdettiin uudet männät, mittasin etäisyydet varmuuden vuoksi käyttämällä muovailuvahaa, jotta myös venttiilien sivuttaiset etäisyydet saatiin selville. Paljealueen välykset mitta- sin samalla tavalla asettamalla muovailuvahaa männän tasaisille reuna-alueille. (Bell 2002, 363 - 364.)

4.3.3 Nokka-akselit

Vapaasti hengittävässä moottoreissa viritysnokka-akseleilla haetaan usein pitkää aukioloaikaa ja pidempää imu- ja pakoventtiilien päällekkäistä aukioloaikaa. Turbomoottoreihin tällaiset nokat eivät kuitenkaan sovellu, sillä ennen turbiinia oleva pakopaine aiheuttaa virtausta väärään suuntaan suoraan sylinteriin. Turbomoottorin nokka-akseliksi soveltuu parhaiten pienellä overlapilla eli venttiilien yhtäaikaisella aukioloajalla olevat akselit. (Bell 1997, 163 - 164.)

Nokka-akseleita ei tähän moottoriin vaihdeta, mutta sen sijaan alkuperäisille nokka-akseleille asennetaan säädettävät nokkapyörät. Sylinteriryhmän nostaminen aiheuttaa nokka-akselien kiertymisen väärään asentoon suhteessa kampiakseliin. Nokka-akseleille asennetaan puristusliitoksella adapterit ja rattaat, joissa on ura säätöä varten. Parhaimman tehon tuottava nokkien ajoitus täytyy hakea tehodynamometrissä, mutta lähtökohdaksi voidaan asettaa vakioajoitus. Männän ja venttiilin välinen välykset kannattaa konetta rakentaessa mitata eri nokan ajoituksilla, jotta säädettäessä tiedetään asetusten olevan turvallisia käyttää ilman vaaraa männän osumisesta venttiiliin.

4.3.4 Kiertokanget

Kiertokanget ovat todennäköisesti moottorin kovimmalle joutuvia osia, sillä niihin kohdistuu suuria vaihtosuuntaisia voimia. Suurin yksittäinen voima aiheutuu pakotahdilla yläkuolokohdassa, kun mäntä vaihtaa suuntaa. Tämän suuren vetojännityksen aiheuttaa männästä ja sen osista koostuva hitausmassa, joka ensin pysäytetään ja heti perään kiihdytetään täyteen vauhtiin. Suurin rasitus ei siis aiheudu palamisen aiheuttamasta paineesta tai seoksen puristamisesta kasaan, joiden voisi kuvitella olevan suurimpia kiertokangen kuormittajia. (Bell 2002, 354.)

Bellin mukaan (1997, 163) osat kuten kiertokanget ja niiden pultit, laakerit sekä venttiilikoneisto mitoitetaan moottorin suurimman kierrosluvun mukaan ja ne tulevat toimimaan myös ahdetussa moottorissa hienosti, edellyttäen ettei moottorin maksimikierroslukua nosteta. Uudet männät tarvitsevat kuitenkin mittaukseni mukaan hyvin lähelle 10 % lisää painoa, joka lisää kiertokankien rasitusta. Hajonnut kiertokanki tulee usein lohkokosta läpi aiheuttaen hyvin perusteellista tuhoa, jonka vuoksi vaihtamalla ne kestävämpiin varmistetaan osaltaan moottorin luotettavuus. Kiertokangiksi valitsin pääosin muihin verrattuna edullisen hinnan ja harrastajien hyvien kokemusten perusteella Kansisetin H-profiiliset teräs-kiertokanget ARP:n pulteilla.

4.3.5 Voimansiirto

Usein tehon noustessa alkuperäistä korkeammaksi kytkin ei pysty enää välittämään vaihteistolle kasvanutta tehoa, vaan alkaa luistaa. Moottoripyörissä on usein sen tyyppinen kytkin, että ongelmasta voidaan selvitä vaihtamalla jäykemmät jouset, jotka puristavat kytkin- ja välilevyjä tiukemmin yhteen. Tällöin tosin kytkinkahvan painaminen muuttuu raskaammaksi. On myös kehitetty niin sanottuja lock-up kytkimiä, joissa keskipakoisvoima painaa vivun välityksellä kytkinlevyjä tiukemmin yhteen kierrosnopeuden kasvaessa. Tällöin kytkimestä saadaan kevyt-käyttöinen pienillä kierroksilla ja vaihteen vaihdon yhteydessä. Painojen määrää säätelemällä voidaan kytkimen toiminta saada halutuksi. Lock-up kytkin on kuitenkin suhteellisen kallis, eikä välttämättä pakollinen.

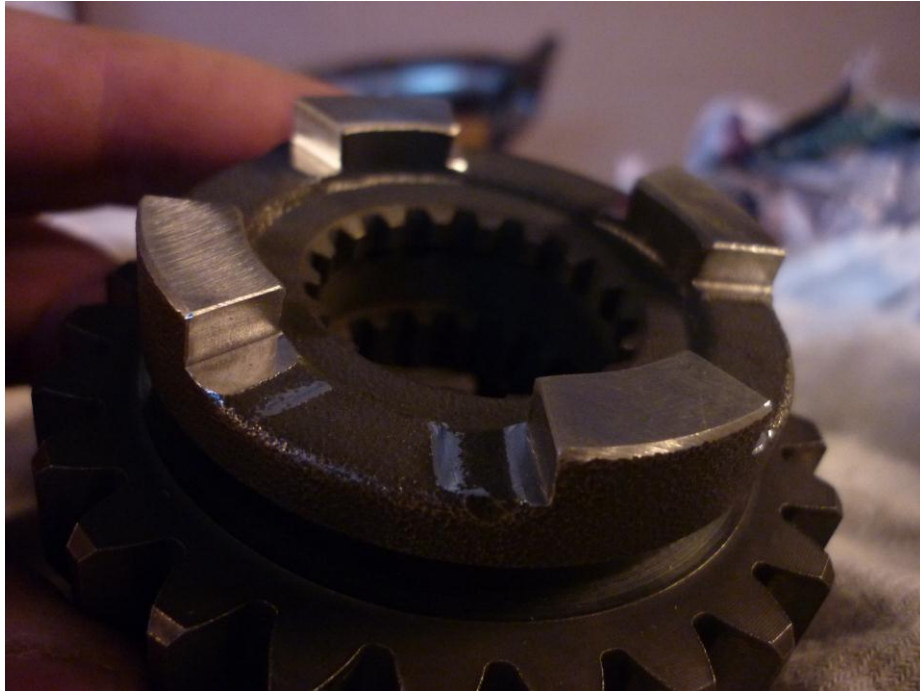
Moottorin rakenteen yhteydessä tarkemmin esitelty kytkimestä löytyvä back-torque-mekanismi auttaa Hayabusassa paitsi estämään takapyörän lukkiutumisen pienemmälle vaihteelle vaihdon yhteydessä, myös kytkimen pitämisessä. Hieman lock-up kytkimen tapaan kiihdyttäessä toistensa päälle kapuavat nokat venyttävät jousia ja lisäävät siten niiden voimaa, jonka vuoksi vakiokytkin on kevyt käyttää ja saattaa silti pitää. Back-torque-mekanismissa on kuitenkin eräs ominaisuus, jonka vuoksi erityisesti kiihdytyskäytössä se korvataan usein yhdestä osasta valmistetulla kappaleella tai hitsataan pysymään tietyssä asennossa. Lähdössä kovaa kiihdyttäessä kytkin haukkaa ja tekee lähdöstä hieman pomppivaa ja hallitsematonta. Yksiosainen kappale tekee kytkimen toiminnasta johdonmukaisempaa ja helpottaa nopeassa lähdössä, kun kytkintä tarvitsee luistattaa ja käyttää korkeita kierroksia. Tässä vaiheessa kun kytkimen toiminnasta suuremmilla tehoilla ei vielä ole kokemuksia, päädyin hitsaamaan kappaleet tigillä yhteen ja käyttämään jäykempiä jousia. Jos kuitenkin kytkimen luistamista pääsee tapahtumaan, niin harrastajien mukaan kytkimen pitäisi pitää hyvin, kun käyttää alkuperäistä back-torque-mekanismia ja vaihtaa puolet tai tarvittaessa kaikki jouset jäykempiin. (Camel 2008.)

4.3.6 Vaihteisto ja öljyvoitelu

Viritetyssä Hayabusassa heikko lenkki on toisiovedon akselissa oleva kohta, joka on uritettu toisiovedon eturatasta varten. Voi olla, että akselin hajoamiseen liittyy myös jonkinlainen käyttövirhe, sillä olen kuullut, että toisinaan akseli on kestänyt suuriakin tehoja. Parannuskeinona voidaan käyttää lujemmasta teräksestä valmistettua akselia, jossa myös rataan kiinnityskohta on kasvatettu suuremmaksi. Tähän moottorin en kohtuullisen arvokasta akselia kuitenkaan vaihda, sillä hajoamiset ovat kuulemani mukaan tapahtuneet useimmin vielä tehokkaammissa moottoreissa. (Hayabusazone 2012a.)

Vaihteistoa läpikäydessä huomasin, että yksi siirtäjä oli kulunut reilusti alle huoltorajan. Todennäköisesti tämän on aiheuttanut vaihteiston ratas, joka ei ole kunnolla vaihtenvaihdon yhteydessä lukittunut paikalleen. Vaihteiston rattaat kytkeytyvät toisiinsa niiden sivussa olevien ulokkeiden avulla. Rattaiden siirtymistä

voidaan ehkäistä viistolla ulokkeen pitopinnalla, joka pyrkii pitämään vaihteen paremmin päällä. Hayabusassa on tehtaan jäljiltä viistottu kaikki muut, paitsi kyseisen 2-vaihteen ratas vapaavaihteen kytkemisen helpottamiseksi. Ongelman korjaamiseksi vaihdoin siirtäjän uuteen ja koneistutin viisteet myös 2-vaihteen rattaaseen. (Aperaceparts 2012b.)



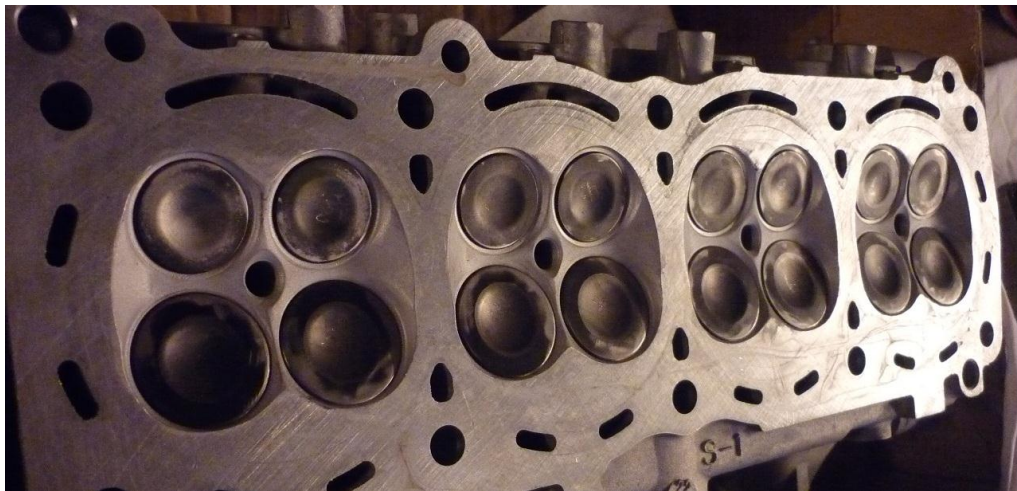
KUVIO 26. Vaihteiston rattaan viistoksi koneistetut pitopinnat.

Yksi vakiomoottorin ongelmista liittyy öljynkiertoon. Öljypumppu imee öljyä kiertoon öljynpohjassa olevan imusuppilon avulla ja pumppu siirtää sen suoraan voideltaviin kohteisiin, kuten kampiakselin ja kiertokankien liukulaakereille. Kovassa kiihdytyksessä ja jarrutuksessa öljy pyrkii jatkamaan liikettään ja pakenemaan, jolloin imusuppilo saattaa päästä imemään ilmaa. Tämän estämiseksi öljypohjaan asennetaan vaakatasoon niin sanottu loiskelevy, joka estää öljyn karkaamisen, mutta päästää kuitenkin öljyn palaamaan moottorista öljypohjaan. Vaikka levy on yksinkertainen valmistaa, päätin kuitenkin hankkia tunnetun valmistajan tekemän, testatun ja hyväksi havaitun tuotteen, jotta voin varmistua moottorille elintärkeän öljykierron toimivuudesta. (Bell 2002, 396.)

4.3.7 Huolto

Samalla kun moottoriin vaihdetaan kestävämpiä osia vanhojen tilalle, tehdään täydellinen peruskunnostus. Moottori puretaan kokonaan ja siitä uusitaan muun muassa kampiakselin ja kiertokankien liukulaakerit, taso- ja öljytiivisteet ja luonnollisesti huoltorajan alle kuluneet osat. Mittausten perusteella moottori vaikutti vähän ajetulta ja kaikin puolin hyväkuntoiselta, vain yksi vaihteiston siirtäjästä oli liian kulunut. Kasaamisen jälkeen myös venttiilivälkykset tarkistettiin ja ensimmäisen käynnistyksen yhteydessä kaasuläpät tullaan synkronoimaan, jotta ne avautuvat yhtäaikaaisesti ja kaikki sylinterit saavat saman määrän ilmaa.

Sylinterikansi on turbomoottorissa tärkeässä asemassa ja sen olisi syytä olla moitteettomassa kunnossa. Venttiileissä tai kannessa oleva karsta voi alkaa kuumana hehkua ja aiheuttaa nakutusta. Myös venttiilien upotuksissa olevat terävät reunat voivat kuumentua ja aiheuttaa seoksen syttymisen ennen aikojaan. Tämän vuoksi terävät venttiilireunat pyöristettiin hiomalla ja lopuksi palotila sekä imu- ja pakokanavat puhallettiin lasikuulilla epäpuhtauksien poistamiseksi.



KUVIO 27. Palotilassa on alun perin teräviä reunoja venttiilien ympärillä, jotka pyöristämällä voidaan ehkäistä kuumasta kohdasta johtuvaa seoksen itsesyttymistä. Samasta syystä karsta on syytä puhdistaa huolella.

4.4 Polttonestejärjestelmä

Polttonestejärjestelmän on kyettävä toimittamaan moottorille riittävästi bensiiniä kaikissa tilanteissa tai vaarana on moottorin rikkoontuminen seoksen ajautuessa liian laihalle. Järjestelmän osat on käytävä läpi ja varmistettava riittävä bensiinin saanti. Kun vapaasti hengittävä moottori muutetaan turboahdetuksi, on myös mietittävä, miten lisärikastus järjestetään.

Mielestäniärkevin vaihtoehto on, jos voidaan korvata pieneksi jääneet osat tehokkaammilla ja ohjelmoida alkuperäinen moottorinohjausjärjestelmä uudelleen. Usein tämä ei kuitenkaan ole mahdollista, jolloin mielestäni paras mutta kallis tapa on vaihtaa koko moottorinohjausjärjestelmä uudelleen ohjelmoitavaan. Nämä järjestelmät ovat kalliita, eikä tämän projektin puitteissa sellaiseen siksi siirtyä. Halpaa ratkaisua haettaessa yksi ratkaisu on jättää alkuperäinen moottorinohjaus koskemattomaksi ja käyttää kertovaa polttoaineensädintä. Tällöin alipainealueella polttoaineen paine pysyy vakiona, mutta ylipaineella säädin alkaa ahtopaineen mukaan kuristaa paluuvirtausta ja rikastaa siten seosta. Tällaista järjestelmää ei kuitenkaan saada kovin tarkasti säädettyä eikä se ota bensiinin annostelussa huomioon muita tekijöitä kuin ahtopaineen.

Yksi ratkaisu on käyttää uudelleenohjelmoitavaa lisärikastusyksikköä ja ylimääräisiä suuttimia. Tällöin alkuperäinen moottorinohjaus- ja polttonestejärjestelmä hoitaa polttonesteen annostelun alipainealueella ja lisärikastusyksikkö ylipainealueella. Tällöin saadaan hyödynnettyä valmistajan säädöt normaalilla toiminta-alueella eikä tarvitse välttämättä säätää kuin ylipainealueen rikastus. Rikastusyksikköä ohjataan vähintään ahtopaineen perusteella, mutta valmistajasta riippuen sillä voidaan lukea tietoa lähes miltä tahansa muultakin anturilta ja korjata suuttimen aukioloaikaa niiden tiedon perusteella. Lisärikastusyksikön käytössä on muitakin etuja, jotka liittyvät siihen, että niiden kanssa käytetään toisia suuttimia, jotka voidaan sijoittaa imusarjassa kauemmas sylinteristä. Pidemmällä matkalla sylinteriin polttoaine ehtii sekoittua paremmin ilmaan ja myöhemmin kaasuläppiin törmäävä polttoaine pirstoutuu pienemmäksi ja tasajakoisemmaksi, joka parantaa palamista. Lisäksi imusarjassa kulkiessaan polttoaine imee lämpöä ilmasta, tehden siitä tiheämpää. (Bell 2002, 122, 195, 206, 214; Bell 1997, 97.)

Valitsin Hayabusaan lisärikastusta varten toisen sarjan suuttimia ja niitä ohjaamaan ruotsalaisen McXpressin 5. sukupolven lisärikastusyksikön, joka oli mielestäni hinta-laatusuhteeltaan paras ratkaisu. Yksikön voi ohjelmoida uudelleen pc:n avulla ja polttoaineensyötön säätää 12x12 taulukon avulla ahtopaineen ja kierrosluvun perusteella. Yksikön mukana tulee myös solenoidi, jonka avulla ahtopaine voidaan asettaa halutuksi kierrosluvun ja kaasunasennon perusteella, jota varten on käytössä 8x8 taulukko. Yksikön mukana tulee ohjelmisto, jonka avulla tietoja voidaan seurata reaaliajassa ja säätää dynamometriajon aikana sekä tallentaa tietoa myöhempää analysointia varten.

Lisäsuuttimien koon selvittämiseksi lasketaan ensin bensiinin tarve. Ahtimen mitoittamisen yhteydessä arvioitiin, että yhden hevosvoiman tuottamiseen kampiakselilta tarvitaan bensiiniä noin 0,55 lb/min/hv. Alkuperäiset suuttimet hoitavat polttoaineensyötön alipainealueella, joten mitoitetaan lisäsuuttimet tehotavoitteen ja alkuperäisen konetehon erotuksena saatavalle teholle. Lisäsuuttimia asennetaan yksi jokaista imukaulaa kohden, joten yhden lisäsuuttimen minimivirtaus ”MV” saadaan laskettua kaavan 11 mukaisesti. Valmistajan ilmoittama moottoriteho vuoden 1999 mallissa oli 172,6 hv. (Aperaceparts 2012a).

KAAVA 11. Lisäsuuttimen koon laskeminen (Bell 1997, 94)

$$MV = \frac{(HP_t - HP_v) \times BSFC}{4} = \frac{(300hp - 172,6hv) \times 0,55 \frac{lb}{min/hp}}{4} \\ \approx 17,5 \text{ lb/min}$$

Suutin on venttiili, jonka aukioloaika ohjataan jännitepulssin pituudella. Maksimi aukioloaika on 100 %, jolloin suutin on auki jatkuvasti. Suuttimet eivät kuitenkaan kestä tätä ongelmitta, minkä vuoksi on käytettävä suurempia suuttimia ja siten rajoitettava maksimi aukioloaika noin 80 %. Lasketaan kaavan 12 mukaisesti suuttimen minimikoko ”MV_{cc}” ja muutetaan samalla paunat kuutiosenttimetreiksi kertoimella 10,5. (Bell 1997, 86, 94; Bell 2002, 198.)

KAAVA 12. Lisäsuuttimien minimikoko

$$MV_{cc} = \frac{17,5 \text{ lb}/\text{min} \times 10,5}{0,80} \approx 230 \text{ cm}^3/\text{min}$$

Uusien suuttimien valinta koon puolesta on helppoa, sillä suuttimen virtaus on yleensä ilmoitettu 3 bar paineella, joka on sama kuin Hayabusan polttoainejärjestelmässä. Saman verran virtaavissa suuttimissa suurimmat erot löytyvät ulkomi-toissa, suuttimen kärjen muotoilussa, suihkun muodossa ja vastusarvossa. Vastuk-seltaan suuttimet ovat yleensä joko matalaohmisia ja ”peak and hold” -tyyppisiä (12 - 16 Ω) tai korkeaohmisia ja ”saturated” -tyyppisiä (1– 3 Ω). Erot liittyvät suuttimien ohjaukseen, jonka vuoksi suutintyyppejä ei voi vaihtaa keskenään ja on valittava sen tyyppiset suuttimet, joille moottorinohjaus on alun perin suunniteltu.

Huomioitavaa suuttimia valinnassa on niiden yhtä suuri virtaus. Bellin mukaan (2002, 202) suurin hyväksyttävä ero kahden suuttimen välillä on noin 2 %, mutta jo uusissa perussuuttimissa valmistajan toleranssi voi olla 3 %, jolloin kahden suuttimen virtaus eroaa pahimmillaan 6 %. Tämän vuoksi olisi syytä käyttää laa-dukkaita virityssuuttimia tai vähintään sellaisia, joista on saatavilla mittaustodis-tus, joka osoittaa riittävän tasaisen virtauksen. (Bell 2002, 202; Tomco 2006.)

Tässä projektissa tärkeää on suuttimien pieni koko, sillä ne sijoitetaan ahtaaseen tilaan polttoainetankin alle. Suuttimiksi tulen valitsemaan joko Hayabusan vakio-suuttimet tai samoilla mitoilla olevat Honda-tyyliset suuttimet. Yksi syy tähän pienen koon ohella on se, että voin ottaa vanhoista suuttimista mitat ja valmistaa suutinhokit ja painekotelon jo ennen itse suuttimien hankkimista. Näin saan pro-jektia vietyä eteenpäin ja siirrettyä suuttimien hankintaa myöhemmäksi, jolloin rahatilanteeni on toivottavasti parempi. Virityssuuttimet ovat uutena hankittuna hyvin arvokkaita, toisin kuin käytetyt vakiosuuttimet. Tämän vuoksi suunnitelma-ni on tarkistuttaa ensin vakiosuuttimet ja jos niiden virtaus on riittävän lähellä toisiaan, hankin toiset samanlaiset. Vakiosuutin virtaa 80 %:n aukioloajalla noin 250 cm³/min, joten koon puolesta se on juuri sopiva. Jos suuttimien kesken heittoa on kuitenkin liikaa, niin ne on kohtuullista korvausta vastaan vaihdettavissa vali-koituun sarjaan, jossa virtaukset ovat 2 %:n sisällä.

Mitoitetaan seuraavaksi polttoainepumpun tuotto ”PP” kaavan 13 mukaisesti. Käytetään samaa kaavaa kuin suuttimia mitoittaessa, mutta vaihdetaan tehoksi ”HP” 300 hv, koska sama pumppu tuottaa virtauksen sekä alkuperäisille että lisäsuuttimille. Bellin mukaan (2002, 208) pumppu on syytä mitoittaa noin 30 % tarvetta isommaksi, jonka huomioon lisäämällä kaavaan kertoimen 1,3. Muutetaan samalla tilavuusvirta tutumpaan yksikköön kertoimella 10,5.

KAAVA 13. Polttonestepumpun mitoitus (Bell 1997, 94)

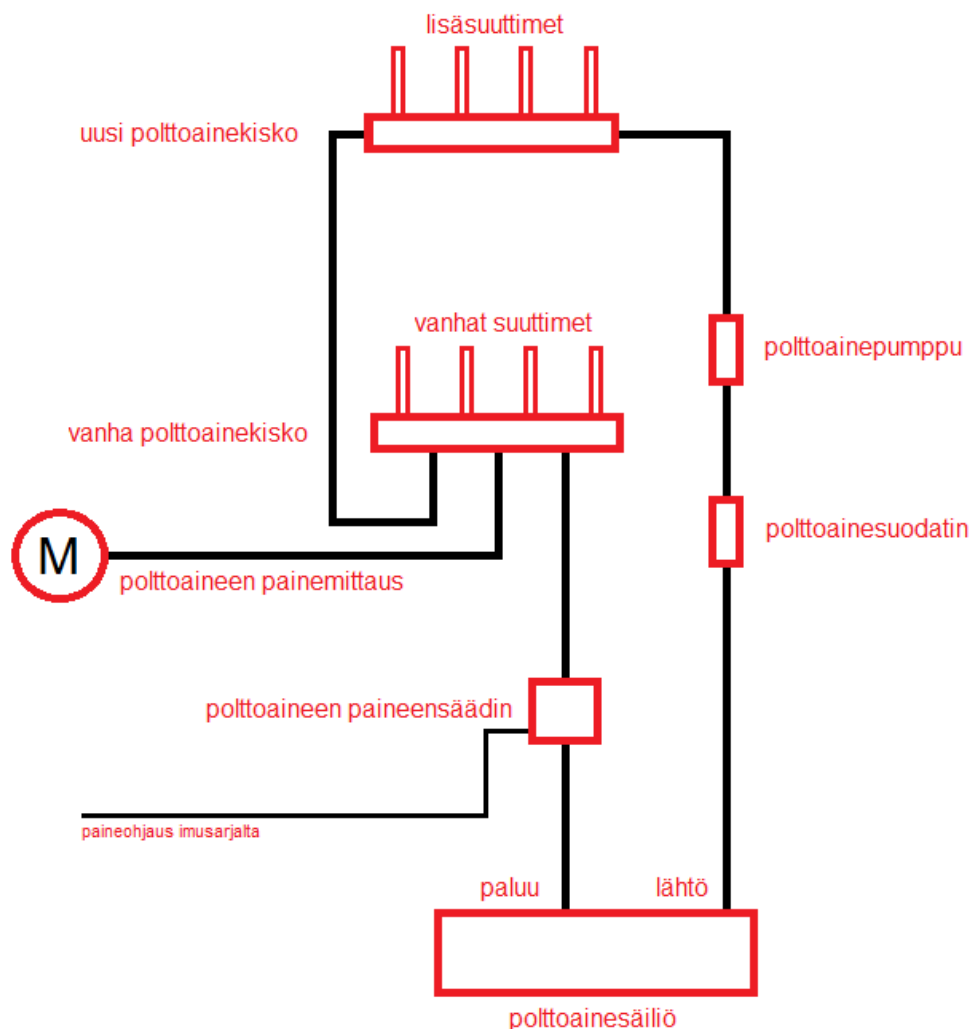
$$PP = HP \times BSFC \times 1,3 \times 10,5 = 300hv \times 0,55 \frac{lb}{min/hv} \times 1,3 \times 10,5$$

$$\approx 2250 \text{ cm}^3/min$$

Pumpun on kaavan mukaisesti kyettävä tuottamaan virtausta vähintään 2250 cm³/min (135 L/h). Polttoainepumpun ominaisuus on, että sen tuottama virtaus vähenee paineen kasvaessa. Ahdetussa moottorissa imusarjassa vallitsee yli-paine, jota vastaan polttoneste ruiskutetaan. Kun käytetään imusarjan paineen mukaan säätyvää polttoaineen paineensäädintä, niin polttoaineen paine saadaan pidettyä koko ajan samana suhteessa imusarjan paineeseen. Tällöin kun voidaan olettaa, että haluttu teho saavutetaan noin 1 bar ahtopaineella, täytyy polttoainejärjestelmässä oleva paine olla saman verran peruspainetta korkeampi. Polttoainepumpun on siis kyettävä tuottamaan laskettu virtausmäärä noin 4 bar paineella, jos peruspaineeksi säädetään alkuperäinen 3 bar. (Bell 2002, 208.)

Polttoainepumpuksi valitsin uuden MSD 2225 pumpun, jonka tuotoksi 3 bar paineella ilmoitetaan 195 L/h ja 5 bar paineella 150 L/h. Pumppu on fyysisesti pienikokoinen ja tuotto riittää helposti kattamaan moottorin polttonesteen tarpeen. Paineensäädin on Hayabusassa integroitu suoraan polttoainepumppuun, joten sitä ei voida hyödyntää. Paineensäätimeksi hankin käytettynä säädettävän Aeromotive 13105 Compactin sen pienen koon ja hyvän hinta/laatusuhteen vuoksi. Myös polttoaineensuodatin on alun perin pumppuyksikössä kiinni, jonka vuoksi ennen polttoainepumppua asennetaan erillinen suodatin.

Suuttimien ja pumpun lisäksi myös polttoainelinjat on uusittava, sillä alkuperäisten suuttimien lisäksi polttoaine täytyy tuoda myös lisäsuuttimille. Lisäsuuttimien polttoaineen jakelua varten suuttimille valmistetaan suutintukki, jonka päähän tuodaan polttoaine suoraan pumpulta. Polttoainekiskon toinen pää yhdistetään letkulla alkuperäiseen polttoainekiskoon. Alkuperäiseen polttoainekiskoon lisätään vielä toinen lähtö, josta polttoaine tuodaan paineensäätimelle ja sieltä takaisin bensatankkiin. Tällä järjestelyllä vältetään letkujen haaroittaminen kahdelle erilliselle polttoainekiskolle, eikä synny umpikujatilannetta, jossa kiskon viimeiselle suuttimelle ei riitä polttoainetta.



KUVIO 28. Polttonestejärjestelmän osat ja kytkentä.

Arvioin putkiston riittävydestä saa laitteiston valmistuttua, kun syöttää paineensäätimen imusarjaliitintään halutun ahtopaineen arvon ja mittaa polttoaineen paineensäätimeltä tulevan paluuvirtauksen, jonka tulisi olla vähintään aiemmin lasketun polttoaineen kulutuksen mukainen. Käytännössä kuitenkin polttoainepumpun jännite ja tuotto laskee muiden sähkölaitteiden vaikutuksesta, joten lopullinen riittävyys selviää, kun moottoria testataan dynamometrissä. (Bell 2002, 211.)

4.5 Moottorinohjaus

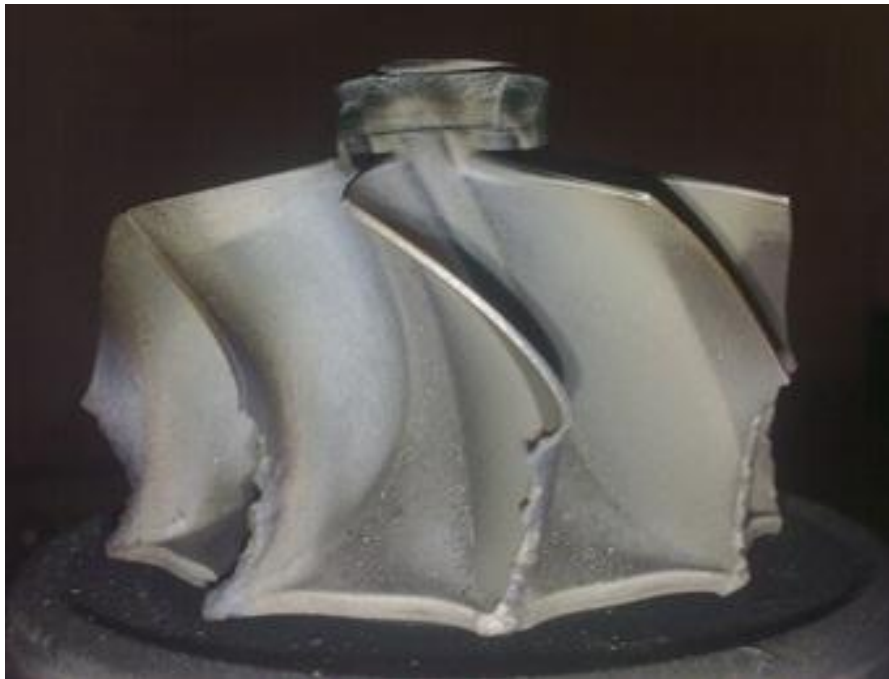
Moottorinohjauksen tehtävänä on laskea antureilta saadun tiedon ja sen muistiin tallennettujen arvojen perusteella suuttimien aukioloaika ja sytytysennakko jokaiseen tilanteeseen sopivaksi. Arvot voi samalla kierrosluvulla poiketa toisistaan paljon, kun verrataan esimerkiksi kiihdytystä ja tasakaasulla ajoa. Tasakaasulla tavoitteena on pieni polttoaineen kulutus ja laiha seos, jolloin suuttimet ovat auki vain vähän aikaa. Myös seoksen tiheys sylinterissä on pieni, minkä vuoksi käytetään suurempaa sytytysennakkoa, jotta kaikki polttoaine ehtii palaa sylinterissä. Samalla kierrosluvulla kaasuläppien auetessa moottorin kuormitus ja ilmamäärä kasvaa, jolloin suuttimia pidetään kauemmin auki rikkaamman seoksen tuottamiseksi. Nyt polttoaineseos sylinterissä on tiheämpi, ja koska ollaan alhaisella kierrosalueella, nakutuksen riski on nopean palamisen vuoksi suurempi ja siksi sytytysennakkoa on pienennettävä. (Bell 2002, 321.)

4.5.1 Säättäminen

Jotta moottorista saadaan muutoksien jälkeen tehokas, luotettava ja taloudellinen, tarvitsee moottorinohjausta säätää. Normaalisti teho mitataan dynamometrillä, jossa tonnin painoinen rulla kiihdytetään vetävän pyörän välityksellä kierrosalueen läpi. Rullan massan perusteella voidaan laskea teho ja vääntö. Säättämiseen sopii paremmin pyörrevirtajarrulla varustettu dynamometri, jolla voidaan pitää rullan ja moottorin kierrosnopeus haluttuna. Säättäminen tapahtuu tällöin testamalla, millä polttoaineen määrällä ja sytytysennakolla saadaan paras vääntö. Sen jälkeen nostetaan rullan nopeus portaittain korkeammaksi ja käydään näin koko

kierrosalue läpi. Tällaisella dynamometrillä saadaan simuloitua paremmin erilaisia ajotilanteita ja kuormitettua moottoria pidempään samalla kierrosluvulla, joka nostaa moottorin lämpöä ja vaikuttaa säätöihin. (Bell 2002, 339 - 340.)

Yksi tärkeimmistä dynamometrijon aikana mitattavista asioista on seossuhde pakoputkeen asennetun lambda-anturin avulla, joka mittaa jäännöshapen määrää pakokaasussa. Liian happipitoinen polttoaineseos voi nopeasti tuhota moottorin, jos seossuhde kiihdyttäessä kasvaa yli 13.2:1. Maksimiteho moottorista saadaan usein noin 12.5:1 seossuhteella, mutta erityisesti turbomoottorit saattavat hyötyä rikkaammastakin seoksesta, kun ylimääräinen bensiini jäähdyttää mäntiä. Tällöin maksimiteho voidaan saavuttaa jopa alle 12.0:1 seossuhteella. Tasakaasulla polttoaineseos säädetään laihemmaksi ja moottorijarrutuksessa syöttö katkaistaan kokonaan polttoaineenkulutuksen laskemiseksi. Liian laiha seossuhde voi nostaa pakolämpöjä huomattavasti ja aiheuttaa moottorivaurion. (Bell 2002, 328.)



KUVIO 29. Liian happipitoinen seos nostaa pakolämpötilaa ja voi rikkoa ahtimen lisäksi muitakin osia. Kuvassa on turboahtimen pakosiipi, jonka kärjet ovat sulaneet liian korkean lämpötilan vuoksi.

Toinen tärkeä mittaus varsinkin uuden turbomoottorin rakentamisen jälkeen on pakopaineen seuraaminen ahtopaineen kanssa. Sillä saadaan hyvä kuva ahtimen turbiinin mitoituksen onnistumisesta. Ihanteellista olisi, kun pakopaine ennen turbiinia ei olisi 25 % ahtopainetta korkeampi maksimitehon kohdalla. Hayabusassa 1 bar ahtopaineella pakopaineen olisi siis syytä maksimitehon kohdalla olla alle 1,25 bar. Pakopainetta ennen turbiinia kasvattaa myös pakoputkiston aiheuttama pakopaine turbiinin jälkeen. Edellä mainitut lukemat edellyttävätkin, että mittauksen aikana käytetään avonaista pakoputkea, jossa ei muodostu vastusta ollenkaan tai huomioidaan pakoputkiston aiheuttama pakopaine. (Bell 2002, 444.)

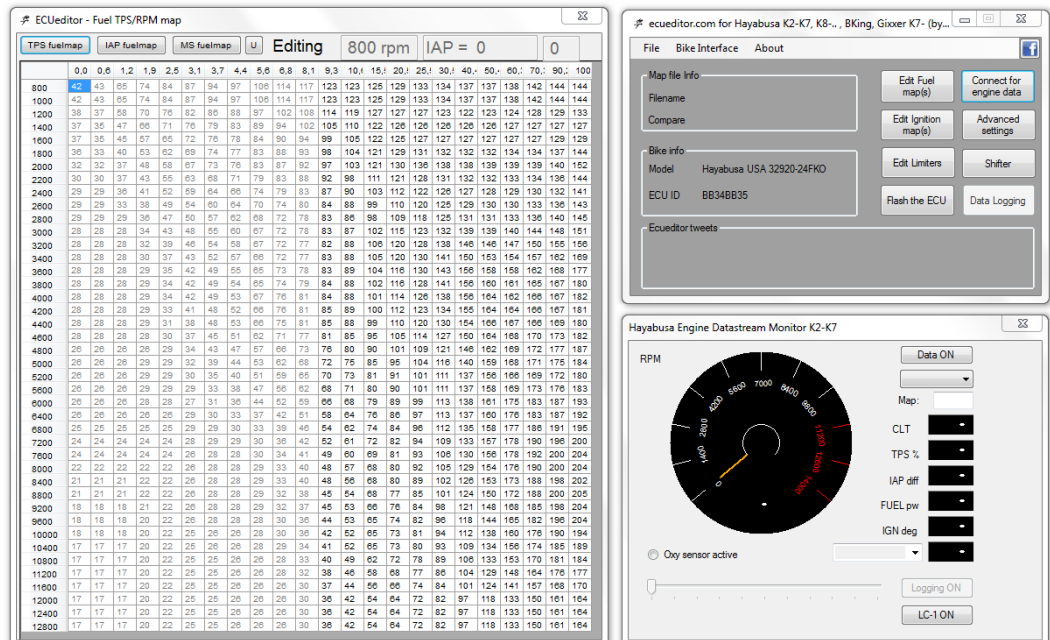
4.5.2 Lisärikastus

Kuten aiemmin polttoainelaitteiden yhteydessä kerrottiin, tässä projektissa hyödynnetään alkuperäistä moottorinohjausta, mutta ylipainealueella bensiniin annostelu järjestetään erillisen ohjelmoitavan ohjausyksikön ja lisäsuuttimien avulla. McXpressin toimittama lisäruiskun ohjausyksikkö on sähköliitännöiltään helppo asentaa, sillä se tarvitsee käyttöjännitteen lisäksi vain hyvin vähän johdottamista.

Asennusohjeen (LIITE 4) mukaisesti punainen johto tuodaan +12 VDC jännitteeseen, joka aktivoituu virta-avaimen kääntämisen jälkeen. Maadoitus kytketään rengasliittimen avulla akun miinus-napaan. Sininen johto on kierrosluvun seuranta varten ja se kytketään alkuperäisen ensimmäisen suuttimen harmaa-valkoiseen johtoon. Lisäsuuttimia voidaan ohjata maksimissaan 8 kappaletta ja ne kytketään ohjausyksikön vihreän ja keltaisen johdon kanssa rinnan. Lisäksi ahtopaineen säätämistä varten on solenoidiventtiili, joka on sähköjen puolesta valmiiksi johdotettu ohjausyksikköön. Sähköliitännöiden lisäksi kytketään ahtopainetta ohjaava solenoidi ahtimen kompressorilta hukkaportin kellolle menevän letkun väliin. Viimeinen letku tuodaan ohjausyksikön paineanturilta painekoteloon, jonka kautta ohjausyksikkö saa tiedon imusarjan paineesta. Lisäruiskuyksikön ohjelmointi ja tiedonkeruu tehdään kotelon sisältä löytyvän USB-liittimen kautta. Ohjausyksikköön on valmiiksi ladattu polttoainekartta McXpressin omalle turbosarjalle, mutta luonnollisesti moottorien kokoonpanojen ollessa erilaiset tätä karttaa ei ole syytä käyttää kuin pohjana uudelle säädölle.

4.5.3 Ecu-editor

Myös alkuperäistä moottorinohjausta on mahdollista säätää tietyin edellytyksin. Innokas harrastajien joukko on selvittänyt uudempien Suzuki-moottoripyörien ohjausyksikön toimintaa ja luoneet edellytykset moottorinohjauksen uudelleenohjelmoinnille. Muun muassa polttoaine- ja sytytyskartat sekä lukuisat muut ominaisuudet ovat säädettävissä ilmaisen ohjelmiston kautta ja ladattavissa alkuperäiseen moottorinohjausyksikköön. Tietokoneen kautta voidaan seurata reaaliajassa antureiden dataa, tallentaa sitä ajon aikana myöhempää käyttöä varten sekä lukea ja nollata vikakoodeja. (Ecueditor.com 2012.)



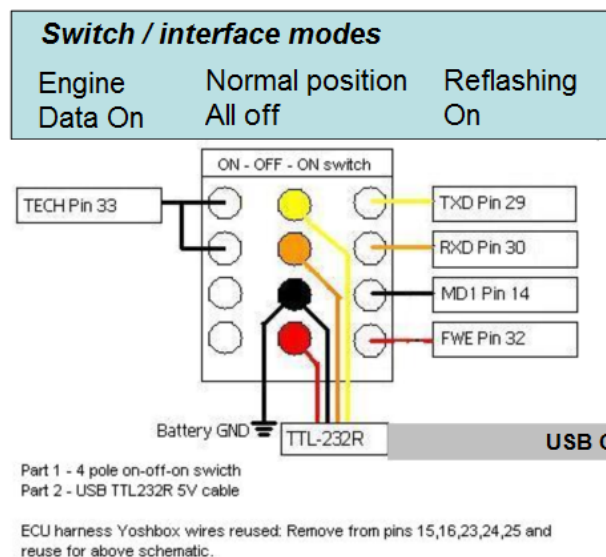
KUVIO 30. Näkymä Ecu-editor ohjelmasta, jossa vasemmalla kaasunasentoon perustuva polttoainekartta, oikealla ylhäällä pääkäyttöliittymä ja oikeassa alareunassa reaaliaikainen datan seuranta, jossa nähtävillä muun muassa kaasun asento, sytytysennakko ja suuttimien pulssin pituus.

Vaikka alkuperäinen moottorinohjaus saattaisi suoriutua kohtuullisen hyvin alipainealueen moottorinohjauksesta ilman säätöäkin, niin esimerkiksi puristussuhteen lasku voi aiheuttaa säätämisen tarvetta polttoainekartoissa. Lisäksi jos naku-

tusta ilmenee ahtopaineilla säädön aikana, voi olla tarpeen säätää sytytysennakkoa hieman pienemmäksi (Bell 2002, 73). Myös alkuperäisen kierrosrajoittimen toiminta jättää toivomisen varaa ahdetussa moottorissa. Alun perin maksimikierrokset rajoitetaan pehmeästi katkaisemalla ensin ulommaisten sylinterien ja vasta sen jälkeen keskimmäisten sylinterin bensiininsyöttö. Ahdetussa moottorissa turvallisempaa on katkaista bensiinin tulo kaikilta suuttimilta yhtä aikaa, jonka pystyy muuttamaan ohjelmiston avulla.

Uudelleenohjelmointia varten tarvitaan kaapeli, jolla tietokone yhdistetään moottorihjausyksikköön. 2002 - 2007 vuosimallien Hayabusissa se voidaan rakentaa TTL-RS232-kaapelista ja 3-asentoisesta kytkimestä kuvion 31 osoittamalla tavalla. Tiedonsiirto kulkee Rxd-liittimen kautta ulospäin ja Txd-liittimen kautta sisään. Ohjelmointitila aktivoidaan maadoittamalla pinni 14 (MD1) ja syöttämällä 5 VDC:n jännite pinniin 32 (FWE). (PetriK 2008.)

Full reflashing and engine data interface for K2-K7 Hayabusa
An USB cable connected permanently to the bike for reflashing
 by PetriK, rev 1, 4.5.2008



This interface is based on using USB to RS232TTL converter using one ON-OFF-ON switch with 4 separate contacts.

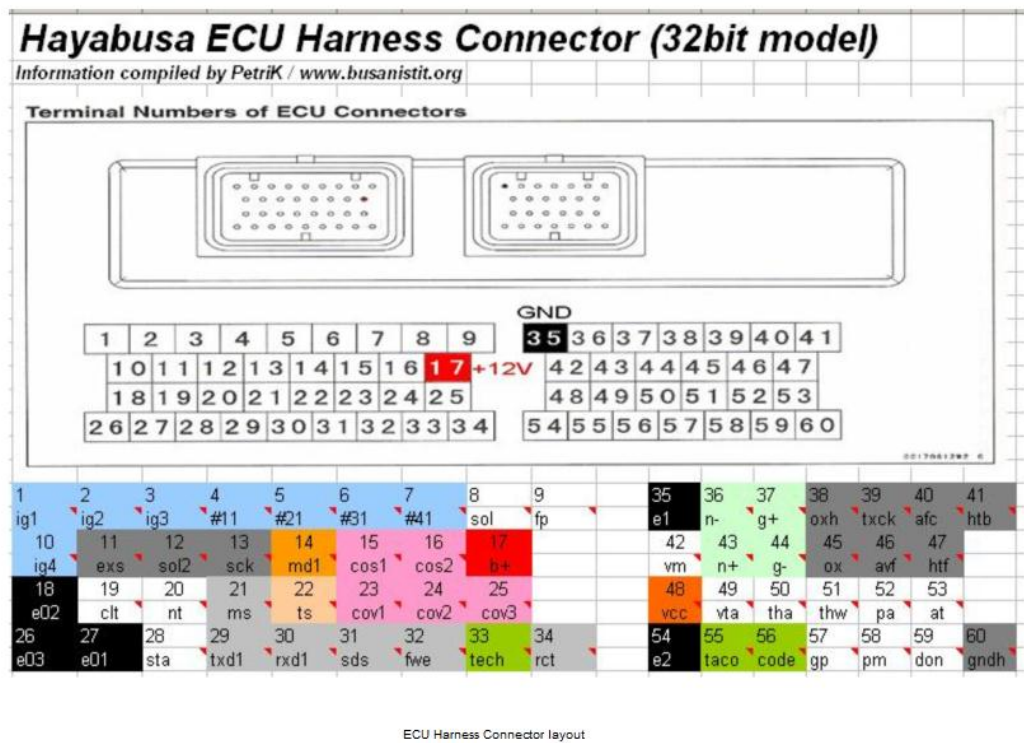
The TxD,RxD, FWE and MD1 are connected to ECU harness connector to empty slots. The Gauge data and GND must be connected to wires that are already connected to ECU.

USB connector to computer for data stream Monitoring or for ecu programming.

Programming and gaugedata interface for K2-K7

KUVIO 31. Hayabusa gen1 ohjelmointikaapelin kytkentä (MacMadigan 2008)

Vanhimmissa 1999 - 2001 vuosimalleissa, kuten myös projektin moottorissa, moottorinohjauksen ohjelmoiminen vastaavalla tavalla edellyttää moottorinohjausyksikön ja magneeton pyörijän korvaamista 2002 – 2007 -mallisella. Lisäksi 1999 ja 2000 -vuosimalleissa tarvitsee vaihtaa kahden pinnan paikkaa moottorinohjausyksikön liittimessä. Siirrettäviä johtoja on numero 56, joka siirretään paikalle 33, ja numero 60, joka siirretään paikalle 53. Ohjausyksikön paikkojen numerointi on esitetty kuviossa 20. (Busanistit.org 2007-2011.)



KUVIO 32. Hayabusan ensimmäisen sukupolven 32-bittisen mallin moottorinohjausyksikön liittimien numerointi. (MacMadigan 2008)

5 YHTEENVETO

Työn tarkoituksena oli oppia ahdetun moottorin toimintaa ja konkreettisena tuotoksena rakentaa kestävä ja tehokas moottori. Teorian opettelemista varten hankin runsaasti kirjallisuutta ja tutustuin aiheeseen kuukausia ennen minkään konkreettisen asian tekemistä. Projektin alussa tiesin hyvin vähän moottorin turboahtamisesta, mutta projektin aikana tietotaitoni karttui vauhdilla. Aihe on laaja, minkä vuoksi haasteena oli projektin rajaus. Jo esimerkiksi ahtimen optimaalisesta mitoituksesta voisi tehdä yhden opinnäytetyön, mutta halusin kuitenkin valita aiheeksi moottorin rakentamisen koko laajuudessaan.

Projektin myötä pääsin myös tekemisiin paikallisten teollisuutta palvelevien yritysten kanssa ja todennäköisesti tulen työn puolesta asioimaan heillä tulevaisuudessaakin. Tällaisia ovat mm. Etra Oy, Univer Oy, BE Group Oy Ab, Dunlop Hi-Flex Oy, Ares Oy ja Liukkosen Pultti Oy. Moottoria rakentaessa tarvikkeiden ostamisen lisäksi on täytynyt teettää mm. hydraulikkaletkuja, laser-leikkausta, koneistusta, sorvausta ja muita erikoisosia. Mekaniikkaosien suunnittelussa käytin Solid Works 3D- ohjelmistoa, joka on yleisesti käytössä alan yrityksissä.

Ongelmia projektin aikana tuotti mm. alkuperäisen moottorinohjauksen muutoksia koskevan tiedon hankkiminen, sillä siitä ei juuri löydy painettua tietoa. Uudelleenohjelmitavuutta on kehitetty harrastajien toimesta vuosien varrella, minkä vuoksi oli työlästä löytää kaikkein tuorein ja pätevin tieto. Tästä syystä muun muassa moottorin lisärikastusta koskien jouduttiin tekemään kalliita viime hetken muutoksia, jotka osaltaan vaikuttivat projektin viivästymiseen.

Kaiken kaikkiaan olen erittäin tyytyväinen projektin toteutukseen. Vaikka työ jäi hieman kesken, niin alkuperäisestä tavoitteesta saada kaikki valmiiksi huhtikuun puolivälissä ei silti jääty paljoa. Työn tekeminen alkoi heinäkuussa 2011, eli se on opinnäytetyön valmistumisen aikaan kestänyt noin 10 kuukautta. Oikeastaan harmittamaan jäi vain se, ettei moottoria ehditty säätää ja mitata dynamometrissä, minkä vuoksi konkreettinen todiste tehon kasvamisesta jäi pois opinnäytetyöstä. Olen kuitenkin vakuuttunut, että tehotavoite saavutetaan, sillä moottorissa on potentiaalia suuremmillekin tehoille.

5.1 Kustannusten hallinta

Koska tarkoituksena oli suunnitelman tekemisen lisäksi myös toteuttaa ja kustantaa projekti itse, kustannustehokkuus nousi tärkeään asemaan: Piti saada rakennettua hyvin toimiva ja kestävä kokonaisuus ja vieläpä mahdollisimman edullisesti. Koska hyvää ei yleensä saa halvalla, pidin rakentaessa kuitenkin lähtökohtana, että käytän eurot mieluummin moottorin rakentamiseen kuin sen korjaamiseen. Tämän vuoksi, kun mietin jonkin osan tai toimenpiteen tarpeellisuutta, vaihdoin sen mieluummin varmuuden vuoksi.

Kustannukset olen saanut hillittyä tekemällä osia mahdollisuuksien mukaan itse ja valitsemalla käytetyn osan, silloin kun se on mielestäni ollut perusteltua. Esimerkkinä itse tehdyn osan tuomasta säästöstä toimii parhaiten painekotelon suunnittelu ja valmistaminen. Vesi-ilma-välijäähdytystä pidetään yleisesti tehokkaana välijäähdyttimenä, mutta sen suosiota laskee korkea hinta ja huono saatavuus. Hayabusaan on saatavilla tietääkseni vain yhdeltä valmistajalta painekotelo, jossa on projektin moottorin tapaan kiinteästi rakennettu vesi-ilmavälijäähdytys. Kotelot valmistetaan tilauksesta ja niiden hinta on tullin, veron ja toimituskulujen jälkeen n. 3000 €, kun projektin osan hinnaksi tuli noin 350 €. Toisaalta, vaikka itse tekemällä säästöä on kertynyt merkittävästi, budjetti on silti reilusti. Suurimman osan kustannusten noususta on aiheuttanut moottorin läpikotainen kunnostaminen, joka ei ole välttämätöntä ahtamisen kannalta, mutta kuitenkin syytä tehdä.

Vaikka sinällään opinnäytetyön tavoitteena ei ole missään vaiheessa ollut kuluttajille myytävä valmis turbosarja, niin kuitenkin esimerkiksi painekotelon ja pakosarjan tapauksessa voisi ajatella niiden jatkokehittämistä kaupalliseen tarkoitukseen. Kokonaisen turbosarjan ongelmana on mielestäni se, että hinta kertasijoituksena on korkea ja moni asiasta kiinnostunut haluaa rakentaa itse omanlaisensa kokoonpanon. Kun osia ostaa pikkuhiljaa, niin ei tarvitse kerralla sijoittaa suurta summaa. Kuten aiemmin esitin esimerkin vesi-ilmavälijäähdytetyn painekotelon hinnoista ja saatavuudesta, voisi tällaiselle olla kysyntää. Suosituimpiin malleihin voisi suunnitella omanlaisensa painekotelon ja tehdä lisäksi muutaman erilaisen yleismallin. Näissä osissa virittäjät arvostavat laatua ja ovat usein siitä myös valmiita maksamaan.

5.2 Jatkokehitys

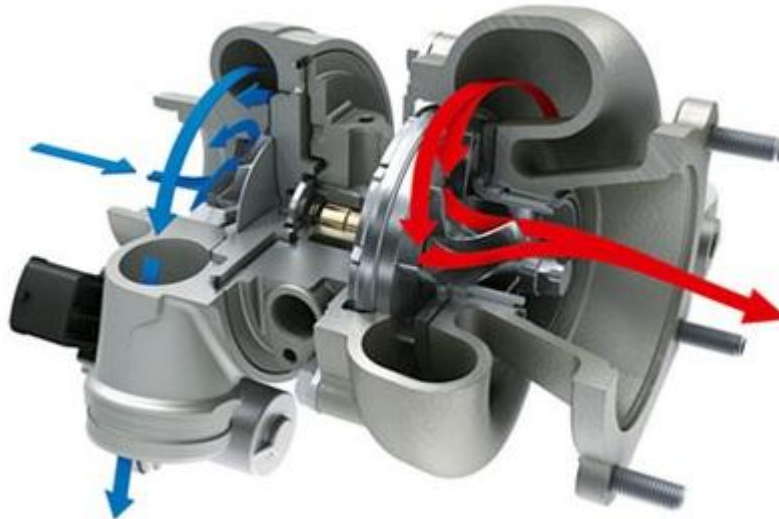
Opinnäytetyön aikana en ehtinyt viedä projektia täysin loppuun, lähinnä budjetin ylittymisen vuoksi. Puuttuvia osia ovat muun muassa pakoputkisto, suuttimet ja polttonestelinjat sekä ilmaputket ahtimelta painekotelolle, jonka lisäksi moottori täytyy säätää. Luonnollisesti ensimmäinen tavoite on saada moottori käyntikuntoon ja säädettäväksi tehdynamometriin, minkä jälkeen voidaan miettiä, mitä osa-alueita tarvitsee parantaa tai mitä voidaan jatkossa kehittää.

Yksi potentiaalinen kehityskohde on kytkin. Jäykemmillä jousilla luistoa ei pitäisi tapahtua, mutta samalla kytkinkahvan painamiseksi tarvitaan enemmän voimaa. Pidemmän päälle olisi parempi, kun kytkimen vaihtaisi lock-up-tyyppiseen, jotta saadaan kevyt tuntuma kytkinvipuun. Toinen vaihtoehto voisi olla ahtopaineen mukaan kiristytvä kytkin.

Kiihdytysajoa ajatellen moottorinohjauspuolella voisi myös olla parannettavaa. Suuri teho on vaikea hallita nopeassa kiihdytyksessä, minkä vuoksi kiihdytysmoottori voidaan säätää siten, että käytännössä koko kiihdytysmatka ajetaan kaasupohjassa ja tehoa säädetään ahtopaineen avulla. Oikeastaan järkevintä olisi päivittää sähköt uudemman sukupolven Hayabusaa vastaavaksi, sillä sen moottorinohjauksen säädettävyyden on parempi ja siinä on enemmän ominaisuuksia, kuten juuri ahtopaineen elektroninen hallinta, lähtökierrosrajoitin (launch control) ja luistonesto. Mielestäni tärkein parannus uudemman mallin moottorinohjauksen säädettävyydessä on ylipainetta tunnistavan MAP-anturin kytkentämahdollisuus, jonka myötä moottori voidaan säätää suoraan myös ylipainealueella eikä siten erillistä lisärikastusyksikköä ja lisäsuuttimia tarvita. Tämän ominaisuuden puuttuminen ensimmäisen sukupolven Hayabusista on mielestäni yksi suurimmista heikkouksista turbokäyttöä ajatellen, minkä vuoksi tulen hyvin todennäköisesti lähitulevaisuudessa aloittamaan sähköjen päivittämisen.

Mielenkiintoinen kehityskohde olisi vaihtaa ahdin niin sanottuun muuttuvageometriseen ahtimeen. Tällaisessa ahtimessa turbiinisiiven ympärillä on elektronisesti ohjattavat siivet, jotka muuttavat turbiinipesän A/R-suhdetta ja turbiinille menevän ilmavirran nopeutta. Tällöin voidaan saavuttaa nopea ahtopaineiden

nousu pienen A/R-suhteen avulla ja kasvattaa sen kokoa ilmavirran kasvaessa. Muuttuvageometrisessa ahtimessa ei tarvita edes erillistä hukkaporttia, sillä läppiä avaamalla voidaan rajoittaa turbiinin pyörimisnopeutta. Muuttuvan turbiinipesän turvin tällaisella ahtimella voidaan myös saavuttaa tilanne, jossa pakopaine on koko ajan pienempi kuin ahtopaine. Tällainen ahdin tarvitsee älykkään elektronisen ohjauksen kaasua ohjaaville läpille, minkä vuoksi käyttöönotto ei ole yksinkertaista. Muuttuvageometrisia ahtimia on käytetty dieselmootoreissa jo 90-luvulta saakka, mutta bensiinimootorin kuumemmat pakokaasut ovat olleet ongelma. Vuonna 2006 esitelty Porsche 911 Turbo on vielä tälläkin vuosikymmenellä yksi harvoista bensiinimootoreista, jossa tällainen on käytössä.



KUVIO 33. Borg-Warnerin ja Porschen yhdessä kehittämän VTG-ahtimen leikkauskuva, jossa kääntyvät turbiinipesän siivet näkyvät heti turbiinisiiven takana. Lämpötilan sietokykyä on saatu parannettua avaruusteknologiassa käytettyjen erikoismateriaalien avulla.

LÄHTEET

PAINETUT LÄHTEET

Bell, A. 2002. Forced Induction Performance Tuning. Sparkford, Yeovil, Somerset, BA22 7JJ, UK: Haynes Publishing.

Bell, A. 2007. Nelitahtimoottorin virittäminen. Helsinki: Alfamer Kustannus Oy.

Bell, C. 1997. Maximum Boost, Designing, Testing and Installing Turbocharged Systems. Cambridge, USA: Bentley Publishers.

Coombs M. 2004. Suzuki GSX1300R Hayabusa Service and Repair Manual. Sparford, Yeovil, Sormerset, BA22 7JJ, UK:Haynes Publishing.

Mauno, E. 2002. Moottoripyörän tekniikka. Helsinki: Alfamer Kustannus Oy.

Mauno, E. 2005. Virittäjän käsikirja 1, nelitahtimoottorit. 5. painos. Helsinki: Alfamer Kustannus Oy.

Mauno, E. 2006. Virittäjän käsikirja 3, polttoainelaitteet. 3. painos. Helsinki: Alfamer Kustannus Oy.

Valtanen, E. 2008. Tekniikan taulukkokirja. 16. painos. Jyväskylä: Genesis-Kirjat Oy.

ELEKTRONISET LÄHTEET

Anthony, S. 2007. Air Filtration Test. Bob Is The Oil Guy [viitattu 9.3.2012]. Saatavissa: <http://www.bobistheoilguy.com/airfilter/airtest2.htm>

Aperaceparts. 2012a. 1999 Suzuki GSX1300R Hayabusa. APE [viitattu 14.3.2012]. Saatavissa: <http://aperaceparts.com/tech/specshayabusa.html>

Aperaceparts. 2012b. Transmission undercutting. APE [viitattu 23.3.2012]. Saatavissa: <http://www.aperaceparts.com/transmissions.html>

Bell Intercoolers. 2011. Intercooling FAQs. Bell Intercoolers [viitattu 7.2.2012]. Saatavissa: <http://www.bellintercoolers.com/pages/techFAQ.html>

Benson T. 2008. Idea Otto Cycle. National Aeronautics and Space Administration [viitattu 12.3.2012]. Saatavissa: <http://www.grc.nasa.gov/WWW/k-12/airplane/otto.html>

Bioenergiatieto. 2011. Moottori. Bioenergiatieto [viitattu 25.3.2012]. Saatavissa: http://www.bioenergia.fi/default/www/etusivu/tietoa_bioenergiasta/energiatuotanon_tekniikka/polttotekniikka_nestemaisille_polttoaineille/moottori/

Boehm M. 2007. 2008 Suzuki GSX1300R Hayabusa II - World Exclusive. Motorcyclist [viitattu 25.3.2012]. Saatavissa: http://www.motorcyclistonline.com/features/122_0708_2008_suzuki_gsx1300r_hayabusa/viewall.html

Busanistit.org. 2007-2011. Vakioecun:n modaus, eli täydellinen säätösystemi (26 sivua). Busanistit.org [viitattu 27.3.2012] Saatavissa: <http://www.busanistit.org/foorumi/ikonboard.cgi?act=ST;f=34;t=3434;st=0>

Camel. 2008. Hayabusa clutch – When Good Clutches go Bad. The EDGE Products – Builder Forums [viitattu 30.1.2012]. Saatavissa:

<http://www.edgebuggyforums.com/viewtopic.php?f=9&t=4321>

Ecueditor.com Online Help. 2011. Hayabusa Gen 1 Edit Fuel Maps. Woolich Racing [viitattu 25.3.2012]. Saatavissa:

http://www.woolichracing.com/ecueditor_help/Hayabusa%20Gen%201.EditFuelMaps.ashx

Enginebasics.com. 2010. Air to Air Vs Water to Air Intercoolers. Enginebasics.com [viitattu 24.3.2012]. Saatavissa:

<http://www.enginebasics.com/Advanced%20Engine%20Tuning/Water%20vs%20Air%20Intercooler.html>

Fivella, J. 2009. Suzuki GSX1300R Hayabusa – A Decade Of Dominance. Superstreetbike.com [viitattu 11.4.2012]. Saatavissa:

http://www.superstreetbike.com/features/0906_sbkp_1999_2009_suzuki_gsx1300r_hayabusa/index.html

Hayabusazone. 2012a. High-Performance Engine Components for Suzuki Hayabusas. Hayabusazone [viitattu 23.3.2012]. Saatavissa:

<http://www.hayabusazone.com/transmissions.html>

Hayabusazone. 2012b. Piston kits GSX1300R HAYABUSA 1999-2007.

Hayabusazone [viitattu 11.2.2012]. Saatavissa:

<http://www.hayabusazone.com/pbe.html>

Honeywell. 2012a. Turbocharger guide Vol4. Turbobygarrett [viitattu 7.3.2012].

Saatavissa: <http://www.turbobygarrett.com/turbobygarrett/productcatalog>

Honeywell. 2012b. Turbochargers. Turbobygarrett [viitattu 5.3.2012]. Saatavissa: <http://www.turbobygarrett.com/turbobygarrett/turbochargers>

Ilmor Engineering. 2011. 5-Stroke Concept Engine. DucCutters [viitattu 29.11.2011]. Saatavissa: <http://www.duccutters.com/ilmor-5StrokeEngine.tpl>

K&N Engineering. 2012. Filter Selection. K&N Filters [viitattu 2.4.2012]. Saatavissa: http://www.knfilters.com/filter_facts.htm

Lyons, P. 2006. Inside Bruce Crower's Six-Stroke Engine. Autoweek [viitattu 29.11.2011]. Saatavissa: <http://www.autoweek.com/article/20060227/FREE/302270007>

MacMadigan Oy. 2008. Full reflashing and engine data interface for K2-K7 Hayabusa. MacMadigan Oy [viitattu 27.3.2012]. Saatavissa: http://macmadigan.no-ip.com/Public/ECU/interface/interface_files/frame.htm

NFCRC. 2009. NFCRC Tutorial: Reciprocating engine. National Fuel Cell Research Center [viitattu 29.11.2011]. Saatavissa: <http://www.nfcrc.uci.edu/EnergyTutorial/reciprocatingengine.html>

Proctor, C. 2011. Internal Combustion Engine. Encyclopedia Britannica [viitattu 28.11.2011]. Saatavissa: <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/290504/internal-combustion-engine>

Sportrider. 2011. JE Pistons releases new FSR design for turbo Hayabusa motorcycles. Sportrider [viitattu 11.2.2012]. Saatavissa: http://www.sportrider.com/industry_news/146_1110_je_pistons_releases_new_fsr_design_for_turbo_hayabusa_motorcycles/index.html

Suzuki Motor Corporation. 1999. Suzuki Hayabusa 1300 [viitattu 13.1.2012]. Saatavissa: http://dixonarchive.com/hayabusa/images/modelhistory/1999_brochure/page2.jpg

Suzuki Worldwide Motorcycle-ATV. 2005. Suzuki Hayabusa osanumerot 99-03 [viitattu 10.4.2012]. Saatavissa: http://www.alpha-sports.com/suzuki_parts.htm

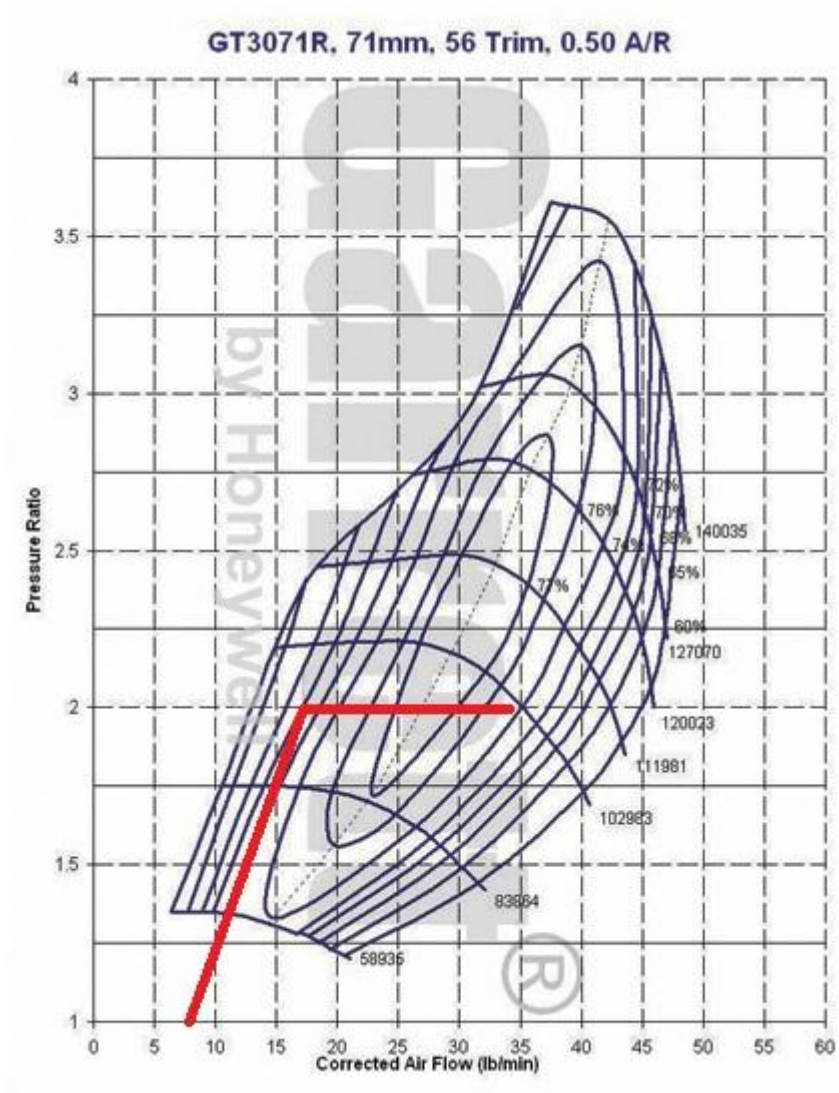
The Auto Channel. 1999. Suzuki Hayabusa v's Honda Blackbird 1999. The Auto Channel [viitattu 25.3.2012]. Saatavissa: http://www.theautochannel.com/vehicles/new/reviews/motorcycles/1999/abachofen_suzuki_honda.html

Tomco. 2006. Tomco Tectips, Fuel Injectors. Tomco Inc [viitattu 14.3.2012]. Saatavissa: http://www.tomco-inc.com/Tech_Tips/ttt37.pdf, http://www.tomco-inc.com/Tech_Tips/ttt38.pdf

LIITTEET

- LIITE 1 Kompressorikartta
- LIITE 2 Painesuhteesta riippuvat F:n arvot
- LIITE 3 Selvitys mutkaputkista pakosarjan tekoa varten
- LIITE 4 McXpress-lisärikastusyksikön asennusohje
- LIITE 5 Kustannusten jakautuminen osa-alueittain
- LIITE 6 Paineotelon osan työpiirustus 1
- LIITE 7 Paineotelon osan työpiirustus 2
- LIITE 8 Paineotelon osan työpiirustus 3
- LIITE 9 Suutinholkien työpiirustus
- LIITE 10 Imukaulan työpiirustus
- LIITE 11 Polttoainekiskon työpiirustus
- LIITE 12 Paineotelon kokoonpanopiirustus
- LIITE 13 Pakosarjan laipan työpiirustus
- LIITE 14 Ahtimen laipan työpiirustus1
- LIITE 15 Ahtimen laipan työpiirustus2
- LIITE 16 Pakosarjan kokoonpanopiirustus

LIITE 1. Garrett GT3071R-ahtimen kompressorikartta, jossa piirtämäni punaiset viivat kuvaavat painesuhdetta ja ilmamäärää projektin moottorissa kierrosalueen läpi (Honeywell 2012b, Turbochargers – GT3071R)



LIITE 2. Painesuhteesta riippuvat F:n arvot (Bell 2002, 69)

Table 5.1. Factors for calculating compressor outlet temperatures

Pr	F	Pr	F	Pr	F
1.35	0.089	2.25	0.258	3.3	0.402
1.4	0.100	2.3	0.266	3.4	0.414
1.45	0.110	2.35	0.274	3.5	0.426
1.50	0.120	2.4	0.281	3.6	0.437
1.55	0.130	2.45	0.289	3.7	0.448
1.6	0.142	2.5	0.296	3.8	0.459
1.65	0.152	2.55	0.303	3.9	0.470
1.7	0.162	2.6	0.311	4.0	0.480
1.75	0.172	2.65	0.318	4.2	0.501
1.8	0.181	2.7	0.325	4.4	0.521
1.85	0.192	2.75	0.331	4.6	0.540
1.9	0.199	2.8	0.338	4.8	0.559
1.95	0.208	2.85	0.345	5.0	0.577
2.0	0.217	2.9	0.352	5.3	0.603
2.05	0.225	2.95	0.358	5.6	0.628
2.1	0.234	3.0	0.365	5.9	0.653
2.15	0.242	3.1	0.377	6.4	0.691
2.2	0.250	3.2	0.390	7.0	0.735

LIITE 3. Selvitys saatavilla olevista mutkaputkista pakosarjan tekoa varten

Tuote	Halkaisija	Vahvuus	Taivutussäde	Kulma	Materiaali	Hinta	Kauppias
J-Käyrä	35 mm	1,5 mm	?	180	Teräs	8,00 €	Martelius
J-Käyrä	38 mm	1,5 mm	?	180	Teräs	8,00 €	Martelius
J-Käyrä	38 mm	1,5 mm	?	180	AISI304	16,00 €	Martelius
J-Käyrä	44,5 mm	?	?	180	Teräs	8,50 €	Martelius
J-Käyrä	45 mm	1,5 mm	75 mm	180	AISI409	13,50 €	Martelius
J-Käyrä	45 mm	1,5 mm	75 mm	180	RST	17,00 €	Martelius
J-Käyrä	41,5 mm	1,5 mm	80 mm	180	Teräs	8,50 €	Martelius
J-Käyrä	41,5 mm	1,5 mm	70 mm	180	Teräs	9,00 €	Martelius
J-Käyrä	42 mm	1,5 mm	70 mm	180	AISI409	13,50 €	Martelius
J-Käyrä	42 mm	1,5 mm	80 mm	180	AISI409	13,50 €	Martelius
Turbokäyrä	42 mm	2 mm	70 mm	90	AISI409	7,06 €	Martelius
Turbokäyrä	42 mm	2 mm	70 mm	130	AISI409	8,57 €	Martelius
Turbokäyrä	42 mm	2 mm	70 mm	180	AISI409	10,09 €	Martelius
Kuumaluja putki 1m	40 mm	2 mm	suora putki	0	309/309S	72,00 €	AMW Dynoservice Ay
Kuumaluja putkikäyrä	40 mm	2 mm	60 mm	180	309/309S	55,00 €	AMW Dynoservice Ay
Pakosarjan mutka	42 mm	2,5 mm	?	90	FE52	2,50 €	Proccater
Pakosarjan mutka	48,5 mm	3 mm	?	90	FE52	2,80 €	Proccater
J-Putki	38 mm	1,5 mm	75 mm	180	Teräs	9,00 €	Tarvikemotti
J-Putki	41,5 mm	1,5 mm	80 mm	180	Teräs	10,00 €	Tarvikemotti
J-Putki	44,5 mm	1,5 mm	75 mm	180	Teräs	10,00 €	Tarvikemotti
Mutka	38 mm	3 mm	?	90	Kattilaputki	6,00 €	Proturbo
Mutka	42,4 mm	3 mm	?	90	Kattilaputki	?	Proturbo

LIITE 4. McXpress-lisärikastuksen ohjausyksikön asennusohje

External EFI-system

Install the new EFI control box in the tooltray in the rear of your bike.

Connect the fuelpump on the same wire as the stock fuelpump.

The stock fuelpumpfuse will be too weak. Replace it to a 15 amps use.

(Located in the front/left of the bike, under the plastic cower)

The injectors shall be connected to the green and yellow wire from the EFI-box.

(All injectors will open at the same time)

The red wire shall be connected to a +key wire on the bike. (We prefer to connect it to the orange/white wire on the connector that used to go to the VCSV valve that used to be on the left inside of the frame above the output shaft.)



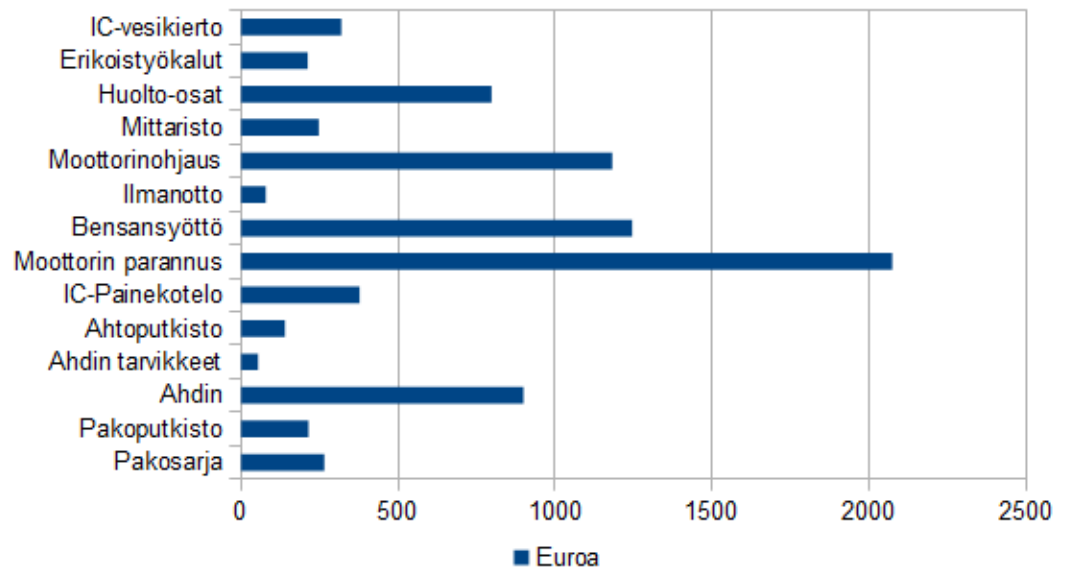
The blue wire from the EFI-box is the one that shall count what RPM the engine is running at. Connect the blue wire to the grey/white one the stock injector number one.

The EFI control box is already programmed, so you don't have to adjust anything.

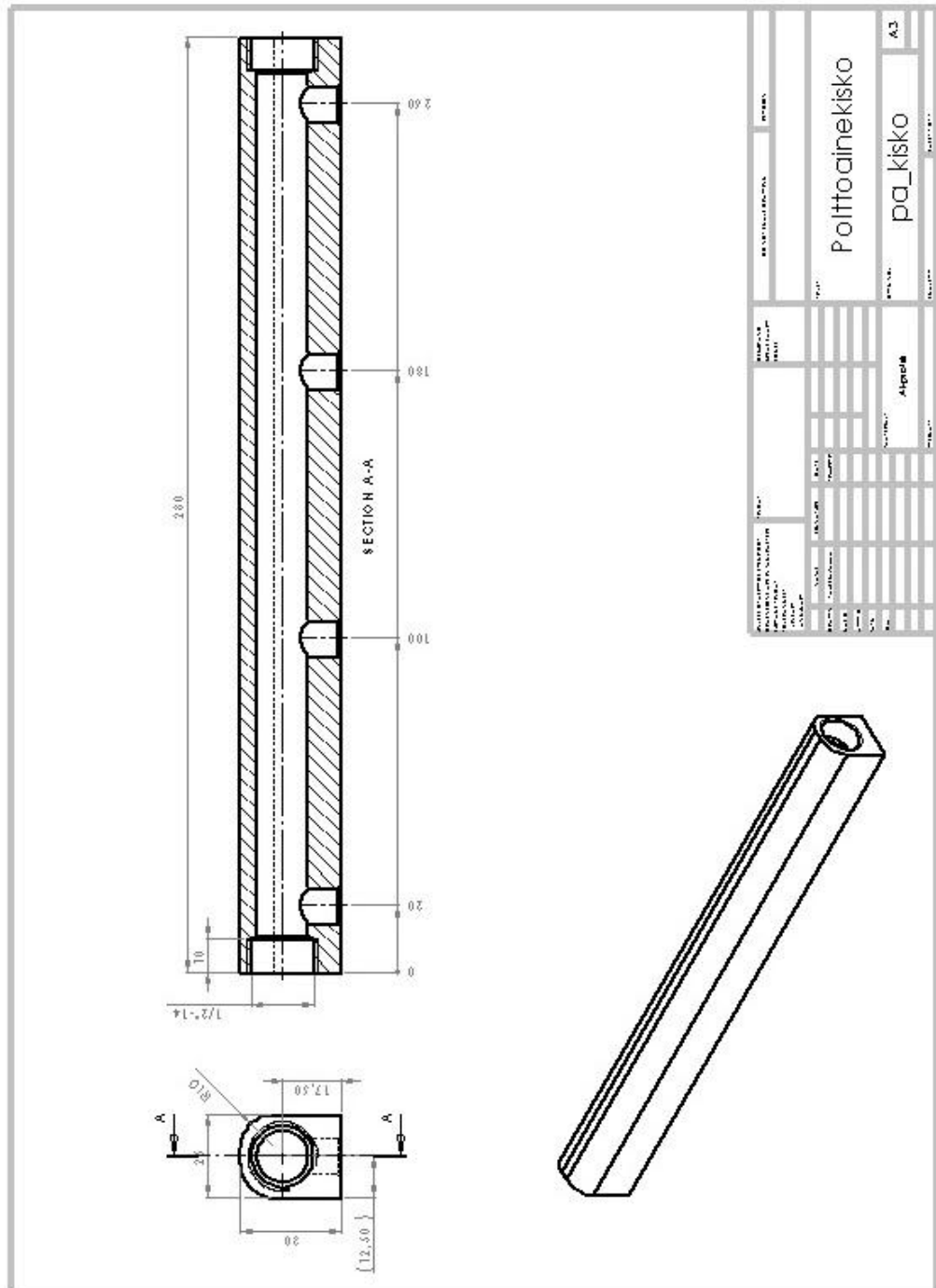
If you want, you can do fuel-adjustments via a PC-computer.

Just order the software and a cable from the PC to the EFI-box from us.

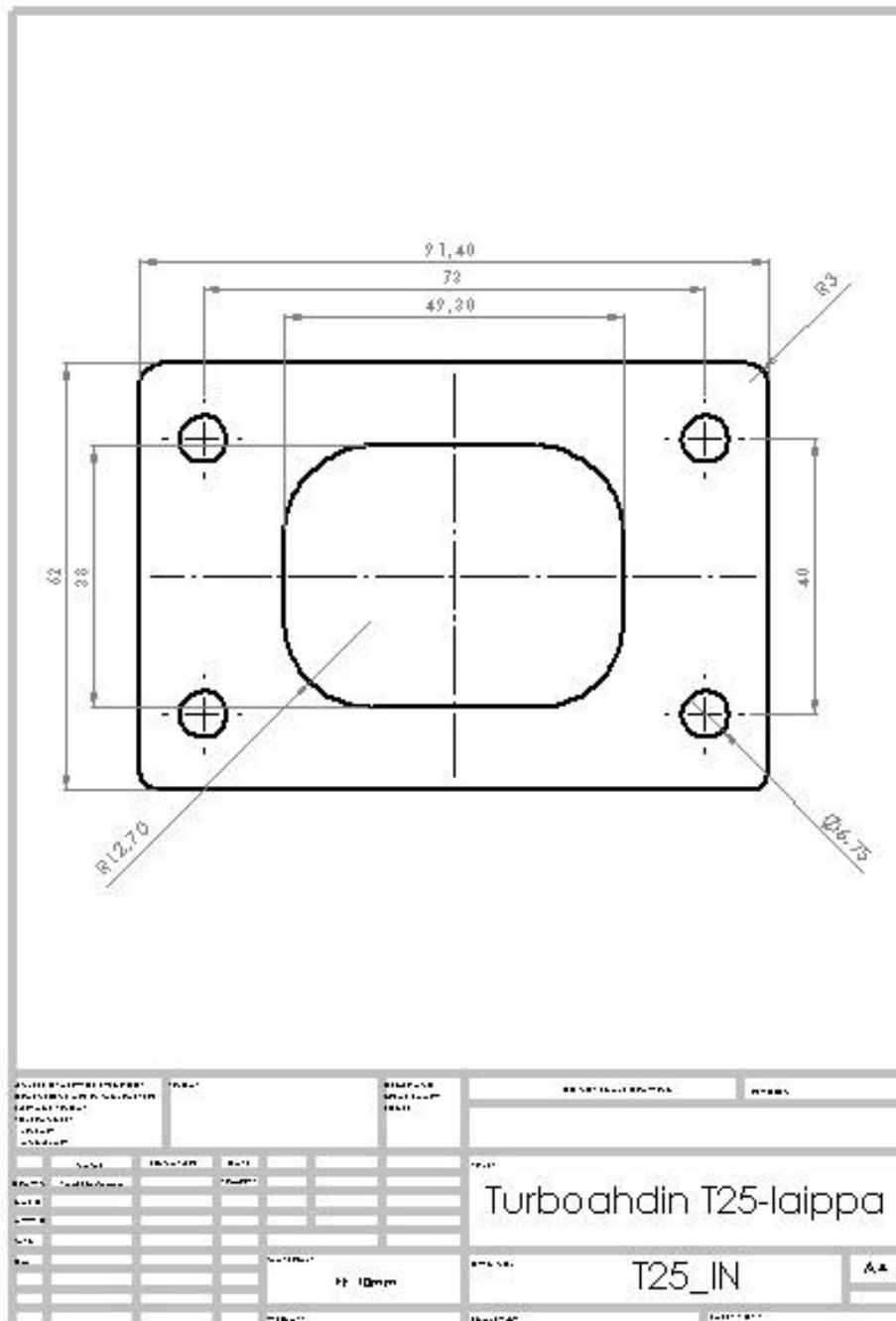
LIITE 5. Projektin kustannusten jakautuminen osa-alueittain



LIITE 11. Polttoainekisko



LIITE 14. TurboahTIMEN turbiinipESÄN sisÄänmenon laippa



LIITE 16. Hayabusa turbopakosarja T25-laipalla (Garrett GT30)

