



TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN TOIMIALA

Auto- ja kuljetustekniikka

Autotekniikka

INSINÖÖRITYÖ

FORMULA STUDENT MOOTTORIN KEHITYSTYÖ

**Työn tekijä: Ville Ahonen
Työn valvoja: Marko Törrönen
Työn ohjaaja: Marko Törrönen**

Työ hyväksytty: 14. 05. 2008

Marko Törrönen



ALKULAUSE

Tämä insinööriyö käsittelee viidennen Helsingin ammattikorkeakoulun Formula Student -kilpa-auton HPF007:n moottorin suunnittelua ja toteutusta.

Insinööriyön tavoitteena oli suunnitella ja toteuttaa Helsingin ammattikorkeakoulun Formula Student -kilpa-autoon ensimmäinen vapaasti hengittävä moottori.

Haluan kiittää työn valvojaa ja ohjaajaa Marko Törröstä, Formula Student -projektin isää Matti Parpolaa ja HPF007 moottorin suunnitteluun osallistuneita Mikko Aholaa ja Timo Keinästä. Lisäksi haluaisin kiittää Ossi Oikarista, joka auttoi suunnittelemaan moottorin käytännön testaamista.

Erietyiset kiitokset ansaitsevat myös projektin pääyhteistyökumppanit Audi Finland, Mobil1, Henkel, Tekniikan Maailma, Valmet Automotive ja lukuisat muut pienemmät tukijat, jotka ovat avustaneet projektia rahallisesti, materiaalitukena tai pelkästään tietotaitonsa avulla.

Erietyisesti haluan muistaa kiitoksilla Henry Ford:n Säätiötä, jolta saatu apuraha mahdollisti täysipäiväisen työskentelyn projektin parissa kesän ja talven 2006 aikana.

Ville Ahonen

INSINÖÖRITYÖN TIIVISTELMÄ

Tekijä: Ville Ahonen	
Työn nimi: Formula Student moottorin kehitystyö	
Päivämäärä: 23.4.2008	Sivumäärä: 66 s. + 5 liitettä
Koulutusohjelma: Auto ja Kuljetustekniikka	Suuntautumisvaihtoehto: Tuotetekniikka
Työn valvoja: Insinööri Marko Törrönen	
Työn ohjaaja: Insinööri Marko Törrönen	
<p>Tämän insinööritöön tarkoituksena oli suunnitella moottori Helsingin ammattikorkeakoulun Formula Student -kilpa-autoprojektiin kilpailukaudelle 2007. Tavoitteena oli kehittää ensimmäinen vapaasti hengittävä moottori edellisten autojen turboahdettujen moottoreiden sijaan. Tämän muutoksen tarkoituksena oli lisätä auton ratasuorituskykyä, vähentää polttoaineenkulutusta ja parantaa auton käsiteltävyyttä.</p> <p>Suunnittelun alussa kartoitettiin edellisten moottoreiden hyvät ja huonot puolet ja ideoitiin mahdollisia parannuskeinoja sekä tapoja niiden toteuttamiseen.</p> <p>Koska moottorin mallintaminen matemaattisesti on hyvin haastavaa, käytettiin suunnittelun alkuvaiheesta asti erilaisia simulointiohjelmiä. Ohjelmien käyttö oli tehokasta verrattuna perinteisiin laskentamenetelmiin, koska niillä pystyttiin laskemaan tuhansia laskutoimituksia lyhyessä ajassa.</p> <p>Moottorin testaamiseen ja simulointiin haluttiin käyttää mahdollisimman paljon aikaa ennen sen sijoittamista varsinaiseen autoon. Tällä tavoin saatiin verrattaen lyhyt suunnittelu- ja testiaikataulu käytettyä mahdollisimman hyvin hyödyksi.</p> <p>Käytännön testaaminen ja kilpailuista saatu palaute osoitti, että auton suorituskykyä ja käsiteltävyyttä saatiin parannettua huomattavasti vuoden 2006 autoon verrattaessa.</p> <p>Vuoden 2007 moottorin kehitystyön tuloksena havaittiin vapaasti hengittävän moottorin olevan kilpailukykyinen Formula Student -kilpailuluokassa verrattaessa turboahdetun moottorin käyttämiseen.</p>	
Avainsanat: Formula Student, moottori, imusarja, pakosarja, paineaallot, palotapahtuma	



ABSTRACT

Name: Ville Ahonen	
Title: Development of Formula Student Race Car Engine	
Date: 23.4.2008	Number of pages: 66 pages + attachments
Department: Automotive Engineering	Study Programme: Automotive Design Engineering
Instructor: Engineer Marko Törrönen	
Supervisor: Engineer Marko Törrönen	
<p>The objective of this Bachelor's Thesis was to design a new engine for Formula Student Race car for Helsinki Polytechnic for season 2007. The goal was to develop the first naturally aspirated engine compared to previous use of turbocharged engines. Reason for this change was to increase track performance, reduce the fuel consumption and make the car more driveable at track conditions.</p> <p>Design processes were started by gathering knowledge about the good and bad things from the previous engines.</p> <p>Because the correct modelling the engine mathematically is extremely challenging several simulation software's were used to model the engine. The use of these programs was very useful compared to calculating with traditional methods.</p> <p>The plan was to use simulating and pre-testing as much as possible before installing the engine to the car. This way it was possible to use the limited testing period as efficient as possible.</p> <p>Results from practical testing period and experiences from race events showed that the car's track performance capabilities was improved compared to previous cars.</p> <p>Engine development during season 2007 proved that using naturally aspirated engine in Formula Student racecar was very wise and competitive solution compared to using a turbocharged engine.</p>	
Keywords: Formula Student, engine, intake manifold, exhaust manifold, pressure waves, combustion	

SISÄLLYS

ALKULAUSE

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

1	JOHDANTO	1
2	SUUNNITTELUN LÄHTÖKOHDAT	2
2.1	Formula Student -kilpailun sääntöjen pääkohdat moottorin osalta	3
2.2	Tärkeimmät vaatimukset Formula Student -moottorille	4
3	HPF006-AUTON MOOTTORI	5
3.1	Ongelmat bensiinien kanssa	5
3.2	Kaasuläppä	6
3.3	Tehon annosteleminen	7
3.4	Polttoainetankki HPF006-autossa	10
4	PIKAVALMISTUS	12
4.1	Pikamallinnusmenetelmät	12
4.1.1	<i>Fused Deposition Modeling, FDM</i>	13
4.1.2	<i>Lasersintraus, SLS</i>	13
4.1.3	<i>Stereolitografia, SLA</i>	15
4.2	Valmistusmenetelmien hyödyntäminen HPF007:n moottorissa	16
4.2.1	<i>Imusarja</i>	16
4.2.2	<i>Kuristin ja kaasuläppä</i>	17
5	HPF007:N MOOTTORI	18
5.1	Simulointi	18
5.2	Puristussuhde ja palotila	20
5.2.1	<i>Palamistapahtuma</i>	20
5.2.2	<i>Nakutus</i>	21
5.2.3	<i>Esisyntyminen</i>	22
5.2.4	<i>Puristussuhde</i>	22
5.2.5	<i>Dynaamisen puristussuhteen laskeminen</i>	23
5.2.6	<i>Puristussuhde HPF006:n moottorissa</i>	26
5.2.7	<i>Puristussuhteen muutos HPF007:n moottorissa</i>	27
5.2.8	<i>Männät</i>	28
5.3	Kansi	29
5.3.1	<i>Kannen muutokset</i>	29

5.3.2	<i>Kannen virtaus</i>	31
5.4	Nokka-akselit	32
5.4.1	<i>HPF006:n moottorin nokka-akselit</i>	33
5.4.2	<i>HPF007:n moottorin nokka-akselit</i>	35
6	MOOTTORIN IMUPUOLI	40
6.1	Kuristin	40
6.1.1	<i>Kuristimen CFD -malli</i>	40
6.1.2	<i>Kuristimien käytännön testaaminen</i>	43
6.2	Kaasuläppä	45
6.3	Imusarja	46
6.3.1	<i>Paineaallot</i>	47
6.3.2	<i>Helmholtz-resonaattori</i>	49
6.3.3	<i>Imusarjan primääriputket</i>	50
6.3.4	<i>Plenumi</i>	52
6.3.5	<i>Imusarjan valmistus</i>	53
7	PAKOSARJA JA PAKOPUTKI	55
7.1.1	<i>Pakosarjan mitoittaminen</i>	55
7.1.2	<i>Pakosarjan testaaminen</i>	57
7.2	Käytetyt testausohjelmat	61
7.2.1	<i>SuperFlow-moottoridynamometri</i>	61
7.2.2	<i>MAHA-alustadynamometri</i>	61
7.2.3	<i>Tatech-tiedonkeruu</i>	62
7.3	Erilaisilla polttoaineilla testaaminen	63
8	YHTEENVETO	66
	VIITELUETTELO	68

1 JOHDANTO

Alun perin Yhdysvalloista alkunsa saanut Formula SAE on kansainvälinen tekniikan alan opiskelijoiden kilpailu, jossa suunnitellaan ja valmistetaan pienikokoinen formulatyypinen kilpa-auto. Kilpailun säännöt ovat tehty niin, että ne eivät rajoita liikaa erilaisten teknisten ratkaisujen tekemistä. Autot suunnitellaan ja rakennetaan noin vuoden kestävässä prosessissa, jonka jälkeen autoilla kilpaillaan muita korkeakouluja ja yliopistoja vastaan kansainvälisissä kilpailutapahtumissa. Kilpailuissa arvoidaan suunnitelutyön lisäksi seuraavat ajo-osuudet: kiihdytys, skip-pad eli kahdeksikkoympyrä, sprint eli yhden nopean kierroksen ajo-osuus, sekä 25-30 kierrosta sisältävä endurance ajo-osuus.

Tässä insinööriyössä käsitellään vuoden 2006 ja 2007 aikana suunnitellun ja valmistetun Helsingin Ammattikorkeakoulun Formula tiimin HPF007:n (Helsinki Polytechnic Formula Engineerin Team) auton moottorin rakentamista, sekä siinä käytettyjä teknisiä ratkaisuja. Lisäksi selvitetään moottorin testaamisen kulkua ja perustellaan ratkaisuja, joita on muutettu edellisiin moottoreihin verrattaessa. Pääasiallisesti vertailukohtana käytetään vuonna 2006 valmistunutta HPF006-autoa, koska itselläni on ollut eniten kokemusta näiden autojen moottoreiden kehitystyössä mukana olemisesta.

Työ keskittyy myös HPF007:n käytännön suorituskyvyn parantamiseen verrattaessa vuoden 2005 ja 2006 aikana kehitettyyn HPF006-autoon.

Kyseessä on järjestyksessään neljäs insinööriyö joka keskittyy Stadian Formula Student tyyppisten kilpa-autojen moottoreiden rakentamiseen. Tämä insinööriyö on kuitenkin ensimmäinen joka keskittyy vapaasti hengittävän moottorin kehittämiseen. Edellisissä autoissa on tähän asti käytetty turboahdettua ja välijäähdytettyä moottoria.

Lisäksi keskitytään HPF007:n moottorin SuperFlow-moottoridynamometrillä testaamiseen, sekä HPF006:n ja HPF007:n ratasuorituskyvyn muutoksiin, sekä siihen kuinka itse moottori on auton suorituskyvyn vaikuttanut.

Työssä ei käsitellä HPF007:n jäähdytysjärjestelmää, öljynkiertoa, tai polttoainejärjestelmää koska niiden mitoittaminen on käsitelty tarpeeksi kattavasti edellisissä Formula Student projektiin liittyvissä insinööritöissä.

2 SUUNNITTELUN LÄHTÖKOHDAT

HPF007-auton suunnittelun lähtökohtana oli parantaa HPF006-auton perusrakennetta ja ajettavuutta, sekä siirtyä mahdollisesti vapaasti hengittävän moottorin käyttämiseen autossa. Huomioon ottaen tiiviin vuosirytmien kilpailukautena, oli täysin uudentyypin moottorin kehittäminen suuri haaste. Edellisten vuosien moottoreissa oli aina käytetty turboahdinta ja nyt haluttiin saada selvyys siitä voisiko auton suorituskyky pitää ennallaan, tai mieluusti parantaa edellisiin autoihin verrattaessa. Tärkeänä suunnittelu argumenttina pidettiin moottorin painon pienentämistä entisestään verrattuna edellisten moottorien painoon.

Koska moottorin kehitystyössä keskityttiin uudentyypiseen moottoriin, haluttiin kuitenkin pitää varasuunnitelmana mahdollisuus käyttää turboahdettua moottoria myös HPF007-autossa. Tällöin olisi todennäköisesti käytetty HPF006-auton moottoria hyvinkin samanlaisena kuin se oli kaudella 2006.

Alkuvaiheessa oli jo selvää, että moottorin vääntöalueesta haluttaisiin mahdollisimman laaja-alainen. Myös HPF007:n moottorin (kuva 1) kaasun vastaavuudesta haluttiin saada herkempi HPF006:n moottoriin verrattaessa.

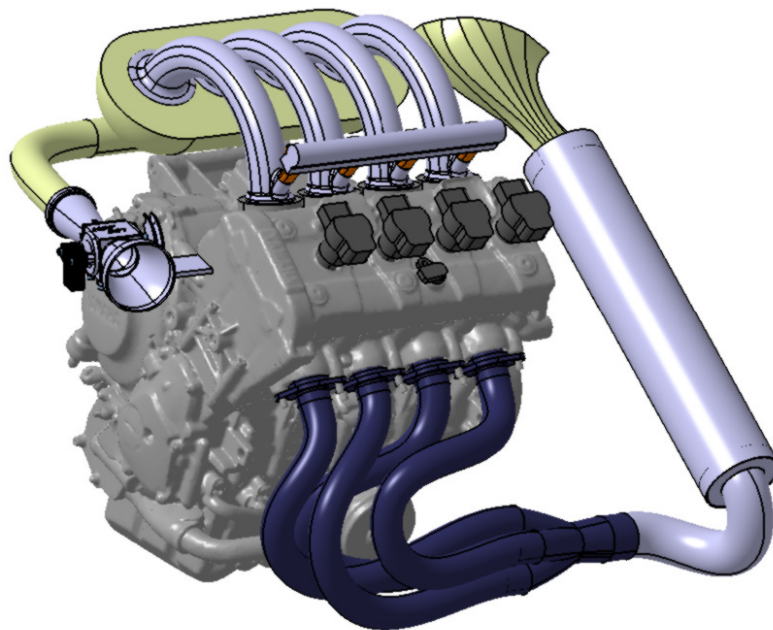
Imusarjan valmistuksessa haluttiin mahdollisesti käyttää muuta materiaalia kuin alumiinia, koska imusarjan painoa haluttiin pienentää. Uusien valmistusmenetelmien, kuten pikamallinnuksen ja liimauksen, toivottiin myös tuovan enemmän vapautta imusarjan geometrisille muodoille.

Pakosarjan mitoitus on tärkeämmässä roolissa kuin edellisillä autoissa ja sen suunnitteluun ja testaamiseen haluttiin käyttää mahdollisimman paljon esisuunnittelua ja käytännön testaamista.

Polttoainesäiliön suunnitteluun ja testaamiseen haluttiin käyttää riittävästi aikaa, koska kaudella 2006 tankin suunnittelu aiheutti useita ongelmatilanteita.

Myös moottorin painoa haluttiin vähentää huomattavasti, koska moottorin paino koko auton massasta on n. 30 %. Jo pelkän turboahdinten ja välijäähdyttimen pois jättämisen toivottiin pudottavan painoa huomattavasti.

Korvaamattomana apuna käytettiin Motec- ja Tatech-tiedonkeruujärjestelmän dataa, jota oli kerätty kaudella 2006 kilpailuista ja testeistä.



Kuva 1. HPF007:n moottorin kokoonpanomalli.

2.1 Formula Student -kilpailun sääntöjen pääkohdat moottorin osalta

Kilpailusarjan säännöt ovat hyvin avoimet koskien itse moottoria. Perussääntöinä on että koneen tulee olla nelitahtinen otto-moottori. Sylinterien lukumäärä, eikä niiden sijoittelua ole rajoitettu. Moottorin iskutilavuus saa olla maksimissaan 610 kuutiosenttimetriä.

Sekä mekaanisten että turboahtimien käyttäminen on sallittua. Myös ahtoilman jäähdytystä saa käyttää, mutta vain ulkoilman käyttäminen jäähdyttämiseen on sallittu. Tämä sääntö rajaa pois vesi-ilmavälijäähdyttimien käytön sekä esim. hiilihappojäällä täytetyn ns. charge cooler -välijäähdyttimien käytön.

Kaikki moottorille tuleva imuilma tulee johtaa 20 mm:n kuristimen läpi käytettäessä normaalia bensiiniä. Jos polttoaineena käytetään E85-

etanolipolttoainetta, on kuristimen suurin sallittu läpimitta 18,5 mm. Kuristin on sijoitettava kaasuläpän jälkeen ennen ahdinta /1/.

Kilpailuissa käytetty polttoaine riippuu kilpailupaikasta. Yhdysvalloissa on FSAE kilpailussa valittavana 100 oktaanista SUNOCO kilpabensiiniä, 94-oktaanista normaalibensiiniä sekä etanolin ja bensiinin seosta E85 (etanolin osuus n. 85 %). Formula Student -kilpailussa englannissa on valittavana 98E-bensiini ja E85. Formula Student Saksassa on käytettävissä Shell V-Power bensiiniä 99+ oktaanisena sekä E85 etanolipolttoainetta.

2.2 Tärkeimmät vaatimukset Formula Student -moottorille

Formula Student kilpailuissa käytettävän moottorissa tulee ensisijaisesti olla hyvä teho-painosuhte. Moottorin tehon pitää tietysti olla riittävä suhteessa auton kokonaispainoon. Pääsääntöisesti kilpailuissa käytettävät moottorit ovatkin alun perin moottoripyöristä. Tehon ja väännön tuoton tulisi olla tasaista ja helposti kuljettajalle hallittavaa. Monesti kilpailuissa ajetaan radoilla, joissa ei välttämättä tarvitse ajaa kuin kahdella vaihteella. Tällöin on erittäin hyvä, jos moottorin vääntöalue on mahdollisimman laaja.

Yhtenä arvosteluna kilpailuissa on moottorin polttoaineen kulutus. Tähän asiaan kannattaakin kiinnittää huomiota kun moottoria säädetään. Koska autoista ei edellytetä päästömääräyksiensä mukaisia päästöjä, voi moottorin säätää osakuormalla liian laihalle (tuotantomootoreissa säädetään moottori päästömittauksien takia $\lambda=1$). Laihan seoksen käyttö aiheuttaa ylimääräistä rasitusta moottorille ja moottori tulisi valita niin, että se kestää tämän ylimääräisen rasituksen.

Myös autossa käytetyn vaihteiston pitäisi kestää enemmän rasitusta kuin mihin se on esimerkiksi moottoripyörässä suunniteltu. Tämä johtuu siitä, että Formula Student -autossa on kaksi vetävää pyörää, moottoripyörässä vain yksi. Tämä aiheuttaa lisääntyneiden vetävien pyörien kitkan kanssa sen, että vaihteiston rasitus kasvaa.

3 HPF006-AUTON MOOTTORI

HPF006:n moottorina käytettiin Yamaha R6 2004 -moottoria. Moottori oli turboahdettu ja välijäähdytetty. Moottorin kehitystyössä onnistuttiin hyvin ja moottorin suorituskyky oli erittäin hyvä. HPF006:n moottorin huipputeho oli 110 hp ja vääntö 100 Nm. Moottorin peruskonstruktio oli huomattavasti kompaktimpi verrattuna edellisvuosien autoihin.

Ennen kuin moottori oli asennettuna varsinaisesti autoon, oli moottorilla takanaan mittava testaaminen SuperFlow-moottoridynamometrillä. Tämä havaittiin nopeuttavan moottorin säätökarttojen oikeaksi saamista.

Moottorin teho ja vääntö oli erittäin hyvä silloin kun autolla ajettiin kiihdytyksiä ja sen vaikutus HPF006-auton kokonais suorituskykyyn oli huomattava, varsinkin nopeilla radoilla. Huonona puolena oli tehon annostelemisen vaikeus ja moottorin käytös hitaammilla kilpailuosuuksilla.

3.1 Ongelmat bensiinien kanssa

Ongelmia ilmeni heti ensimmäisessä FSAE-kilpailussa Detroitissa. FSAE 2006 -kilpailun kilpailujärjestäjien Sunocon 100-oktaaninen (kauppanimike 260 GT, RON+MON/2) bensiini osoittautui sopimattomaksi moottorille, joka oli säädetty Neste Oy:n 98E (RON) -bensiinille. Vaikka Sunocon 100-oktaanista (Sunocon 100-oktaaninen vastaa RON-lukemaltaan 105-oktaanista MON luokituksen bensiiniä) oli ostettu suomessa ja moottorille oli tehty säätökartat, eivät säädöt päteneet kilpailujärjestäjien tarjoamaan Sunocon 100-oktaaniseen bensiiniin.. Epäilykset kohdistuivat etanoliin, jota käytetään oktaaniluvun nostamiseen.

Suomessa myytävässä bensiinissä etanolin osuus on huomattavasti pienempi kuin USA:ssa myytävissä bensiinilaaduissa. Nesteen myymässä 98 E-bensiinissä etanolin osuus on < 5 % (vrt. järjestäjän ilmoittamaan 8 %:iin). Etanolin määrän eron ollessa näin pieni ei sen vaikutus sytytys ja polttoainekarttoihin ole merkittävä, joten epäilimme, etteivät kisajärjestäjien ilmoitukset bensiinien lisäaineisuuksista, tai laaduista pitäneet täysin paikkaansa (liite 1). Tähän ei valitettavasti saatu täyttä varmuutta, koska järjestäjät eivät myöntäneet, että heidän tarjoamissaan polttoaineissa olisi eroavaisuuksia etukäteen ilmoitettuihin bensiinilaatuihin. On kuitenkin syytä

olettaa, ettei järjestäjien tarjoama bensiini vastannut sille ilmoitettuja ominaisuuksia.

Kilpailupaikalla moottorin säätäminen on hyvin rajallista ja aikavievää, vaikka vuonna 2006 FSAE-kilpailussa uudelleen säätämisessä onnistuttiin kohtalaisen hyvin. Ongelmia oli myös muilla kilpailuun osallistuneilla kilpailijoilla, kuten Oxford Brooks Universityllä. Yhteistä kaikille, joilla oli ongelmia bensiinin kanssa, oli se, että kilpailijoiden alkuperämaa sijaitsi Euroopassa. Euroopassa ja Yhdysvalloissa myytävissä bensiinien koostumuksissa saattaa olla huomattaviakin eroja.

Kokemukset bensiinilaatujen eroista antoi myös hyviä syitä kokeilla mahdollisimman montaa bensiinivalmistajaa HPF007:n moottorin säätämisessä, jotta emme kohtaisi samoja ongelmia kaudella 2007. Tarkoituksena oli käyttää polttoainetta jota kulkeutuu Pohjois-Amerikasta maahantuoduista autoista. Vaikka kansainväliset kuljetussäännöt kieltävät tankattujen autojen kuljettamisen Yhdysvalloista Eurooppaan, saimme tiedon, että asiaa ei valvota kovin aktiivisesti. Tämä antoi mahdollisuuden käyttää bensiiniä, jota oli tankattu Suomeen tuotuihin autoihin. Tällöin olisimme voineet ajaa testiajaja bensiineillä, joita myydään yhdysvalloissa.

3.2 Kaasuläppä

Kaasuun vastaavuutta ei saatu kuitenkaan täysin sille tasolle mitä aikaisemmin keväällä testeissä. Osaltaan tästä syytettiin huonoa bensiiniä, mutta vastaavia ongelmia oli ollut jo ennen FSAE2006-kilpailua. Tällöin vika paikallistettiin kaasuläppän alueelle, mutta tarkkaa syytä ei löydetty. Ongelmat esiintyivät huonona kaasuun vastaamisena, sekä muutamilla kerroilla kaasu jumittui auki asentoon.

Nämä seikat huomioiden vikaa yritettiin paikallistaa jumiutuvasta kaasuvaijerista ja itse kaasuläppäkotelosta. Kun kaasuläppän toimintaa tutkittiin tarkemmin, havaittiin, että ensinnäkin sen virtauspinta-ala oli liian suuri suhteutettuna siihen, että kaikki imuilma kulkee joka tapauksessa 20 mm halkaisijaltaan olevan kuristimen läpi.

Kaasuläpän mitoitukseen voi käyttää kaavaa 1 /2, s. 16/:

$$d = \sqrt{\frac{2 * n * \eta * v_i}{\pi * v * 100\%}} \quad (1)$$

d = kaasuläpän halkaisija [mm]

n = moottorin kierrosluku [1/s]

η_v = volumetrinen hyötysuhde [%]

v_i = iskuilavuus [dm³]

v = virtausnopeus kaasuläpän läpi [m/s]

Alkuarvoina moottorista käytettiin kierroslukua 13000 1/m ja volumetrista hyötysuhdetta 110 %. Iskuilavuus on 5,99 dm³. Sopiva virtausnopeus kaasuläpällä on 60 m/s, jolloin virtaushäviöt eivät nouse liian suuriksi. Näillä arvoilla saadaan kaasuläpän halkaisijaksi 30,2 mm.

Kaasuläpän halkaisijaksi oli kuitenkin päätetty 48 mm halkaisija, joka on virtauspinta-alaltaan noin 50 % suurempi kuin laskennallisesti oikea halkaisija. Kun kaasu on pohjassa, ei suurempi kaasuläppä aiheuta mitään ongelmia, koska tällöin tärkeintä on, että virtausvastus kuristimelle on mahdollisimman pieni. Pienillä kaasun avautumisasennoilla liian suuri läppä aiheuttaa ongelmia ilman annostelussa koneelle. Tällöin pienikin muutos kaasuläpän asennossa muuttaa kaasuläpän ohi pääsevän virtauksen määrää niin paljon, ettei tehoa pysty kontrolloimaan riittävän tarkasti. Tämä seikka korostuu etenkin käytettäessä perinteistä läppätyylistä kaasuläppää.

3.3 Tehon annosteleminen

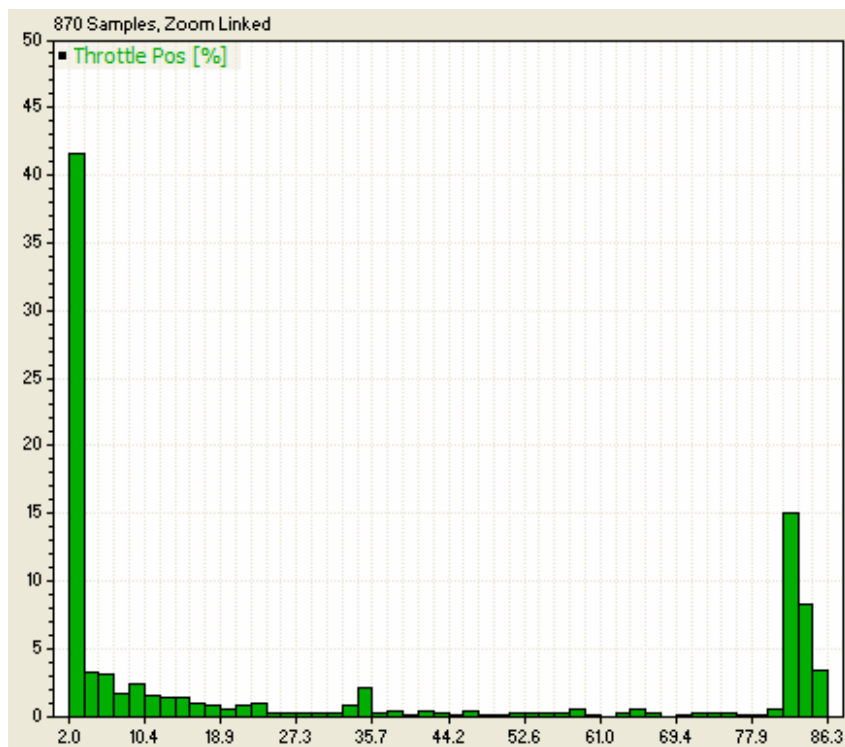
HPF006-autossa ongelmia ilmeni pienillä kaasunasennoilla jolloin kuskin tulisi pystyä säätelemään tehon määrää tarkasti. Tarkka kaasun säätely mahdollistaa Tehoa oli kyllä riittävästi läpi moottorin kierrosalueen, mutta sen tarkka annostelu oli vaikeaa, tai jopa mahdotonta. Tämä ilmiö korostui erityisesti, kun kaasupoljinta painettiin välillä 2-7 %. Tämä tietysti aiheutti ongelmia varsinkin skidpad-ajo-osuuksissa sekä radalla mutkien läpi ajettaessa eli silloin, kun haluttiin käyttää tasakaasua pienellä kaasun

avautumisasennolla. Yleensä lopputulos olikin se, että kuljettajan halutessa lisää tehoa käyttöön ei pieni kaasupolkimen liike vaikuttanut mitenkään. Hieman lisää painettaessa tehoa olikin liikaa käyttötärpeeseen nähden ja tuloksena oli vetävien pyörien pidonmenetys, tätä kautta ylioajamista ja edelleen huonompi kierrosaika.

Kilpailuissa radat ovat yleensä hyvin mutkaisia ja radoilla ajettavat keskinopeudet jäävät pieniksi, tämän vuoksi on ensiarvoisen tärkeää, että tehoa on käytettävissä heti kun kuljettaja haluaa sitä käyttöön. Lisäksi on huomioitava, että ajotilanteessa tarvittavan tehon määrän pystyy hallitsemaan annostelevaan mahdollisimman tarkasti.

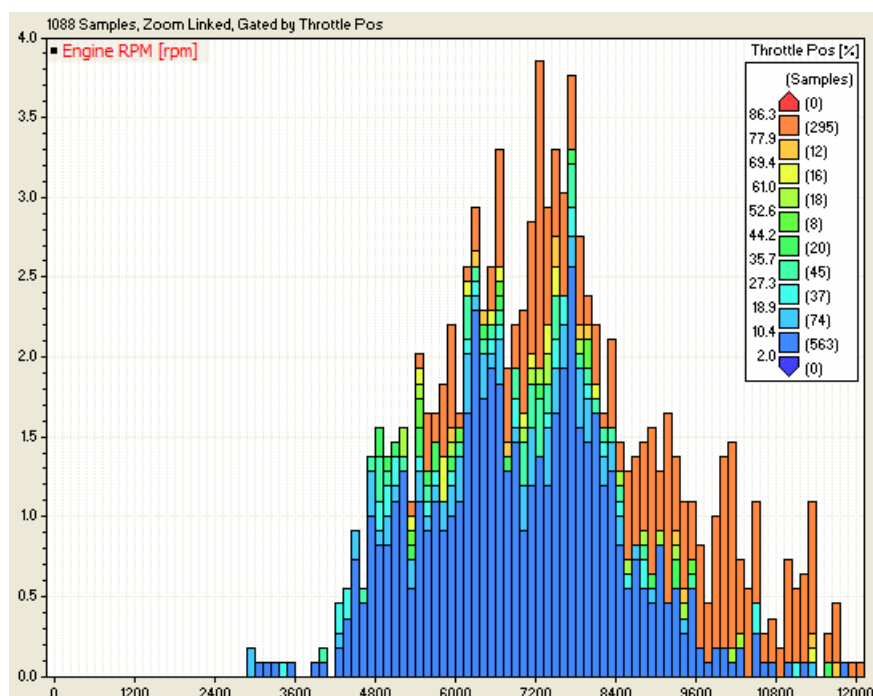
Osaltaan kaasun käytön vaikeuteen vaikutti kaasuläppän ja kaasupolkimen suunnittelu. Useissa testeissä havaittiin, että kaasuläppä takerteli, tai kaasuvaijeri ei liikkunut sujuvasti.

FSG 2006 -kilpailussa kerättyä Motec-tiedunkeuruun dataa analysoitaessa havaittiin, että autoa ajetaan suurimmaksi osaksi kaasuasennon ollessa 2-5 % sekä täydellä kaasun asennolla. Seuraavassa kaaviossa (kuva 2) on Motec-tiedunkeuruujärjestelmän matematiikkakanavaa käyttäen luotu histogrammi FSG 006 -kilpailussa kaasun käytöstä. Y-akselilla on prosentuaalinen määrä kuinka suuri on kaasun käyttöaste, X-akselilta voidaan lukea kaasun asento. Molemmat tiedot ovat kerätty yhden kierroksen aikana Formula Student Germany -kilpailussa vuonna 2006.



Kuva 2. Kaasun asennot ja niiden käyttöasteet

Kuten kuvasta 3 voidaan huomata, ajetaan autoa n. 50 % ajasta alle 5 %:n kaasunavautumisasennolla ja vastaavasti vain 5 % ajasta käytetään täyskaasuasentoa. Vastaavasti kuvasta 4 on nähtävissä, että täyskaasun käyttö ajoittuu lähinnä siihen, kun kierrosluku on yli 8000 kierrosta. Alemmilla kierrosluvuilla käytössä on tätä pienemmät kaasun avautumisasennot, ja koska tällöin ajetaan hitaampia osuuksia radalla, on erityisen tärkeää, että moottorin kaasunvastaavuus olisi viiveetöntä.



Kuva 3. Alle 5 %:n kaasun asennot suhteutettuna moottorin kierroslukuun.

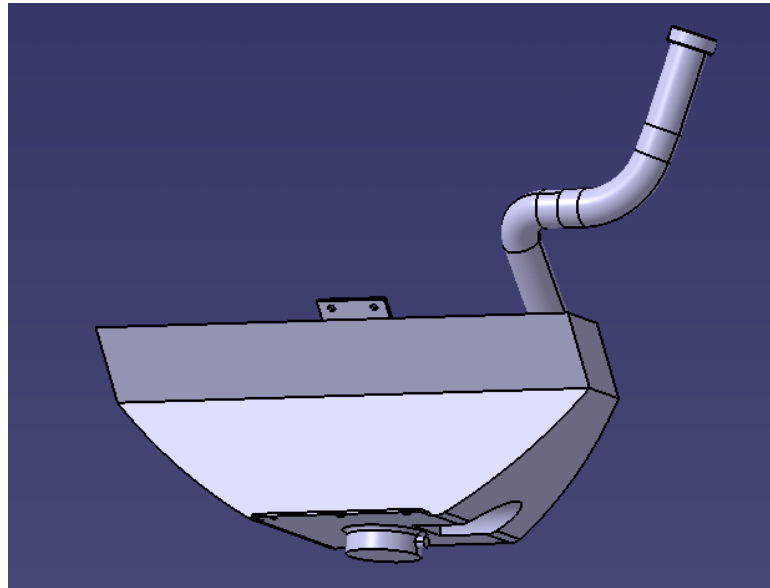
3.4 Polttoainetankki HPF006-autossa

HPF006-auton suurin heikkous oli sen polttoainetankki. Tankin tilavuus oli noin 7,5 litraa, joka oli määrällisesti riittävä kilpailussa tarvittavaan bensiinin määrään (endurance-kilpailun aikana turboahdettu Formula Student -auto kuluttaa noin 3,5-4,0 litraa polttoainetta). Ongelmat esiintyivät silloin kun kilpailusta oli jo suurin osa ajettu ja tankki oli enää osittain täynnä. Polttoaine riitti kyllä kilpailun loppuun asti, mutta viimeisillä kierroksilla oli moottorin käynti epätasaista ja polttoaineensuihkutus pätkivää. Pahimmillaan ongelma ilmeni Formula Student Germany -osakilpailussa vuonna 2006, jossa auto sammui viimeisellä kierroksella.

Polttoainetankin huono toimintavarmuus johtui sen muotoilusta. Tankki oli asennettu kuljettajan selän taakse poikittain ja se oli muodoltaan ylöspäin kapeneva (kuva 4). Tällä tavoin toteutettuna sen toiminta oli tyydyttävä niin kauan, kun polttoainetta oli riittävästi tankissa. Kun polttoaineen määrä oli kulutettu noin puoleen tankin tilavuudesta, oli polttoaineella enemmän tilaa liikkua sivuttain tankin sisällä. Vaikka tankin pohjalla oli erillinen keräyssäiliö, ei sen tilavuus riittänyt kompensoimaan polttoaineen liikkeen aiheuttamaa katkosta polttoainepumpulle. Kun polttoainepumppu sai ilmaa sisäänsä,

meni ilma edelleen polttoainelinjastoon sekä suuttimille, mikä edelleen aiheutti ruiskutuksen pätkivää toimintaa.

Ongelmaa yritettiin korjata lisäämällä poikkinaisia loiskelevyjä tankkiin, sekä suurentamalla pohjalla olevaa polttoaineen keräyssäiliötä. Polttoainesäiliön toimivuus parani tällä tavoin jonkin verran, muttei riittävästi. Myös tankin sisälle asennettavan vaahdon käyttämistä harkittiin, muttei sitä koskaan kokeiltu varsinaisesti.



Kuva 4. HPF006:n Polttoainetankki oikealta takaa katsottuna.

4 PIKAVALMISTUS

Uutena valmistusmetodina käytettiin rapid prototype (pikavalmistus) valmistusmenetelmää HPF007:n moottorin osien valmistuksessa. Kyseistä menetelmää oli käytetty jo kaudella 2006, mutta silloin osat olivat vain suunnittelun apuna, ts. niitä ei käytetty moottorin, tai auton muiden osien lopullisina tuotteina. Pääasiassa syynä tähän oli, että osat olivat valmistettu FDM-menetelmää käyttäen, joka ei ole mekaanisilta ominaisuuksiltaan kovin kestävä ja on tarkoitettu lähinnä visuaalisten mallien valmistukseen.

Rapid prototyping käsittää useita eri menetelmiä mallien, prototyyppien ja työvälineiden valmistukseen. Pikavalmistus tarkoittaa fyysisen kappaleen valmistusta suoraan numeerisen määrittelyn pohjalta, käyttäen apuna tuotteen CAD-mallia. Prosessi on täysin automaattinen ja geometrisilta rajoituksiltaan vapaa. Pikavalmistuksessa ei käytetä lastuavaa työstöä tai käsityötä. Käytännössä eri pikavalmistus menetelmissä, erityyppisiä materiaaleja muunnetaan eri metodeilla nestemäisestä olomuodosta kiinteäksi.

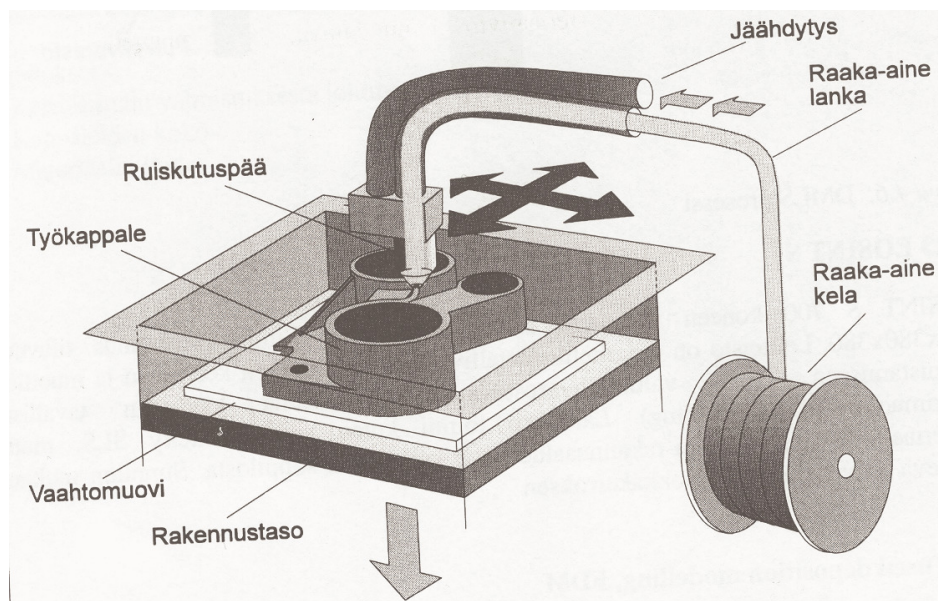
4.1 Pikamallinnusmenetelmät

Kaikki pikamallinnusmenetelmät perustuvat järjestelmään, jossa kiinteään kappaleeseen päädytään CAD-suunnittelun kautta. Mallinrakennuskone tarvitsee geometriakuvaukseen usein ns. STL-tiedoston, joka on 3D-systemsin kehittämä 3D CAD -mallin esitysmuoto. 3D-mallin pinta jaetaan kolmioihin, jotka muodostavat uuden murtopinnan. Murtopinta on ennalta määrättävissä olevan toleranssin päässä oikeasta mallista. Malli jaetaan tämän jälkeen mallinrakennuskoneessa x-y-tasoiin viipaleisiin. Viipaleiden kerrospaksuus määräytyy kerralla rakennettavan kerrospaksuuden mukaan. Viipaleiden ääri viivat ja niiden väliin jäävät pinnat kovetetaan, tai rakennetaan menetelmästä riippuvalla tekniikalla. Malli rakennetaan 2D-viipaleista, joita pinotaan päällekkäin kunnes saavutetaan haluttu muoto. Menetelmän haittana on rakenteen porrasmaisuus, joka vaikuttaa saavutettavaan mallien tarkkuuteen. Menetelmän etuna on yksinkertainen kaksikulotteinen toimintaperiaate .

Seuraavana esitellään lyhyesti pikamallinnusmenetelmät, joita käytettiin HPF007:n moottorin osien valmistukseen.

4.1.1 Fused Deposition Modeling, FDM

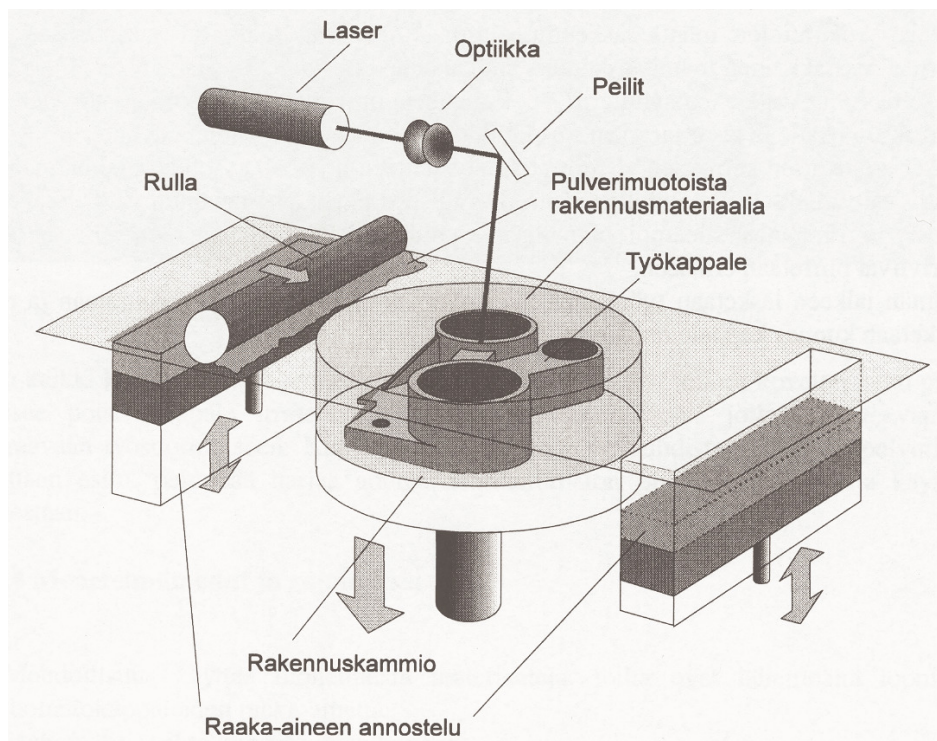
Menetelmässä malli tehdään ruiskuttamalla siihen suuttimen lävitse lämmintä termoplastista materiaalia. Ruiskutusta suoritetaan pieni kerros kerrallaan ja lämpötilan säädön prosessissa täytyy olla todella tarkkaa, jotta ruiskutettu materiaali jäähmettyy nopeasti edellisen kerroksen päälle. Menetelmän periaate on esitetty kuvassa 5 /3/.



Kuva 5. FDM-menetelmä /5/

4.1.2 Lasersintraus, SLS

Laitteiston rakennuskammiota lämmitetään infrapunalla lähelle pulverin sulamispistettä. Tällä pystytään pienentämään tarvittavan laserin tehoa, sekä vähentämään syntyviä jännityksiä. Materiaali syötetään mäntien avulla polttotasolle ja levitetään siihen rullalla. Kerroksen levityksen jälkeen sintrataan laserilla halutut kohdat materiaalista. Tämän jälkeen lasketaan kappaletta kerros paksuuden verran ja aloitetaan uusi työkierto. Lasersintrauksen periaate on esitetty kuvassa 6. /4; 5/

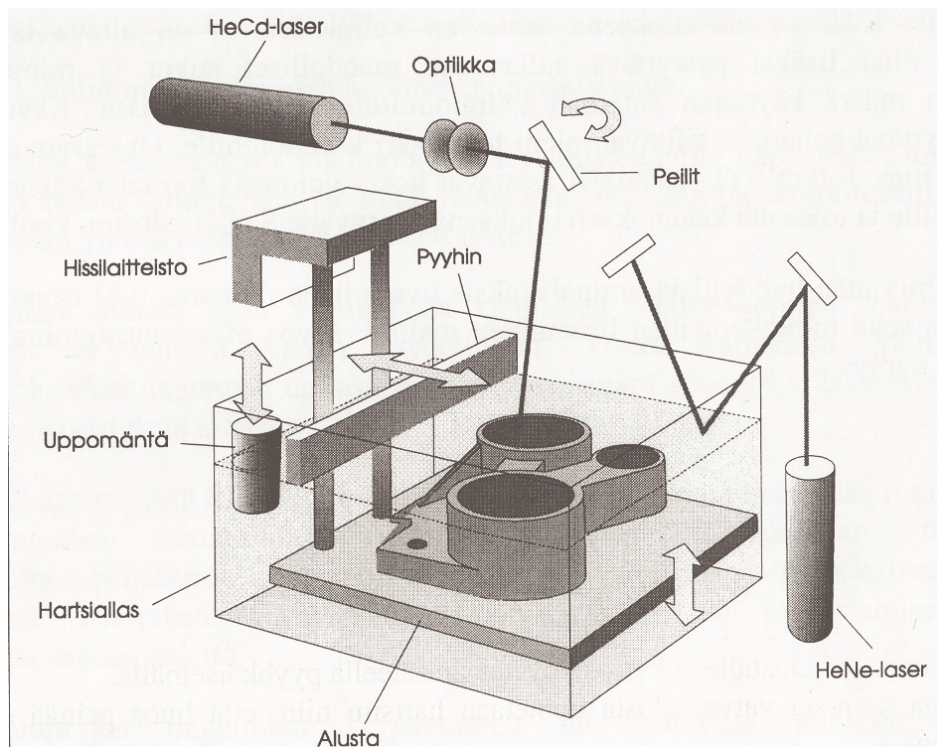


Kuva 6. SLS-menetelmä /5/

Lasersintrauksella tehtäviä mallinnuksia ei tarvitse erikseen tukea vaan käyttämätön pulveri tukee kappaletta. Tästä johtuen voidaan kappaleita sijoittaa mihin asentoon tahansa mallinnusaltaaseen, mikä mahdollistaa useankin kappaleen yhden aikaisen tekemisen. Yhden kerroksen paksuun on noin 0,15mm ja kuten muissakin pulveri menetelmissä saattaa loppu pinta jäädä hiukan karheaksi. Laitteissa käytetään yleensä HeCd (Helium Cadmium) -laseria. Sintrauksen etuna ovat myrkyttömät materiaalit, jotka muistuttavat tuotantomateriaaleja. Lisäksi materiaali on helppo ja nopea vaihtaa toiseen. Kone on pikavalmistuslaitteeksi nopeatoiminen. Uusimmissa laitteissa nopeutta kasvatetaan entisestään käyttämällä kahta laseria. /4; 5/

4.1.3 Stereolitografia, SLA

Stereolitografiassa kovetetaan nestemäistä valokovettuvaa hartsia laserin avulla kerroksittain. Stereolitografian toimintaperiaate on esitetty kuvassa 7.



Kuva 7. SLA-menetelmä /5/

Kappaletta kovetetaan nestekerroksen pintaan laserin avulla, siten että aina yhden kerroksen jälkeen lasketaan alustaa hiukan lisää altaaseen. Tosin ennen seuraavan kerroksen kovettamista tasoitetaan edellisen kerroksen pinta pyyhkimellä. Koska kappale rakennetaan nestealtaaseen, on sen tukemiseen yleensä käytettävä erilaisia tukirakenteita. Menetelmässä on kaksi laseria HeNe (Helium Neon) -laser, joka tutkii altaan pintaa, ja HeCd (Helium Cadmium) -laser, joka kovettaa ainetta. Prosessia ohjataan tietokoneella. Valmis kappale on todella hauras, ja se pitää vielä erikseen kovettaa uunissa UV-valon avulla. Tämän jälkeen saattaa olla vielä tarpeellista tehdä lämpökäsittelyjä jännitysten poistamiseksi. Valmistuksessa on otettava hartsista syntyvät vaaralliset höyryt. Laitteistoilla voidaan valmistaa jopa kuutiometrin kokoisia kappaleita. /4; 5/

4.2 Valmistusmenetelmien hyödyntäminen HPF007:n moottorissa

HPF007:n moottorissa oli tarkoitus käyttää pikamallinnus menetelmällä valmistettuja osia lopullisina moottorikonstruktion komponentteina.

4.2.1 Imusarja

Autoteollisuudessa yleisesti käytettävä valmistusmateriaali imusarjan valmistuksessa on ABS-muovi (akryyliniiriibutadieenistyreeni). ABS omaa hyvät kemikaalien sietokyvyt, ei ole altis halkeilulle, kestää lämpötilojen vaihtelua, sekä on helppo valmistaa tarkkoihin mittoihin, sekä on materiaalina kevyt (tiheys $\sim 1 \text{ g / cm}^2$).

Imusarjan materiaalin valintaan vaikuttavia tekijöitä olivat materiaalin lämmönsietokyky (moottorin pintalämpötila voi nousta jopa 150 asteeseen), kemikaalien sietokyky (moottoriöljy, bensiini, puhdistamiseen käytetyt liuottimet) sekä materiaalin tulisi kestää tärinää ja toistuvaa mekaanista rasitusta. Lisäksi sen puhtaanapidon tulisi olla helppoa. Erityisen tärkeää oli tietysti, että valmistus tarkkoihin mittoihin olisi helppoa ja nopeaa.

Kemikaalien kestokykyä testattiin upottamalla näytepala bensiiniin useaksi vuorokaudeksi. Havaittiin, etteivät testatut muovilaadut (alumide, prototool), liuenneet tai silminnähden haurastuneet bensiinissä.

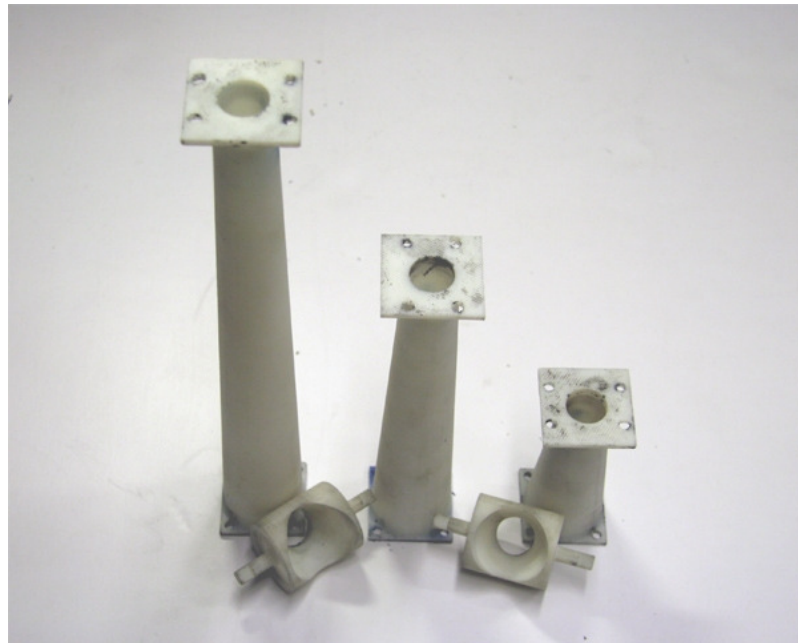
Alumiden rakenne koostuu ABS-muovista ja sen seassa olevista alumiini rakeista, joiden osuus on jopa 50 % materiaalista. Huonona puolena materiaalissa on, ettei alumiini sula sintrausprosessissa vaan säilyttää rakeisen olomuodon muovissa. Tämä edelleen vaikuttaa hieman valmiin kappaleen mittatarkkuuteen (n. 0,25 mm), mutta huomioonottaen imusarjan vaatimukset, ei sen katsottu haittaavan. Sen mekaaniset ominaisuudet muistattavat ABS-muovia, mutta se on huomattavasti jäykempää kuin ABS (liite 2).

Näiden kriteerien perusteella imusarjan materiaaliksi valittiin alumide sen hyvän lämmön sietokyvyn, riittävän murtolujuuden sekä riittävän mittatarkkuuden vuoksi. Myös valmiin tuotteen pinta on visuaalisesti siistinnäköinen (pinta muistuttaa valualumiinia) ja oli lisäksi maalattavissa.

4.2.2 Kuristin ja kaasuläppä

HPF006-autossa oli kuristimissa käytetty FDM-menetelmällä valmistettuja kuristimia. Materiaalina oli tällöin ABS-muovi. Johtuen FDM-menetelmästä ei kuristimen mekaaninen kestävyys ollut kovin hyvä ja sitä jouduttiinkin vahvistamaan hiilikuitukomposiitilla.

Koska HPF007:n moottorin kuristimen valmistusta haluttiin yksinkertaistaa verrattuna HPF006:n kuristimiin (hiilikuituinen ulkokuori, sisäosa valmistettu FDM-menetelmällä), materiaaliksi valittiin Alphaformin Prototool (kuva 8) materiaali sen erinomaisten mekaanisten ominaisuuksien kannalta (liite 2). Jo edellä mainittua ABS-muovi käytettiin myös kuristimen ja kaasuläpän vertailumateriaalina.



Kuva 8. Prototool-materiaalista valmistettuja kuristimia sekä barrelityyppisiä kaasuläppiä.

5 HPF007:N MOOTTORI

HPF007-auton moottorina käytettiin Yamaha R6 -moottoripyörän moottoria. Yamahan R6-moottori on vakiona, 599-kuutioinen, nelisylinterinen vapaasti hengittävä nelitahtimoottori. 65,5 millimetrin porauksella ja 44,5 millimetrin iskulla toimivan moottorin puristussuhde on 12.4:1. Moottori on varustettu kahdella kannen yläpuoleisella nokka-akselilla, venttiilien lukumäärä on 16. Voima välittyy kampiakselilta nokka-akseleille jakoketjun välityksellä.

Sytytystulppa on sijoitettu keskelle palotilaa, venttiileiden väliin. Maksimikierrosluku on rajoitettu 15500 kierrokseen minuutissa ja huipputeho 90 kW @ 13000 kierroksella. Maksimivääntö esiintyy tuhat kierrosta huipputehoa alempana ja on 69 Nm @ 12000.

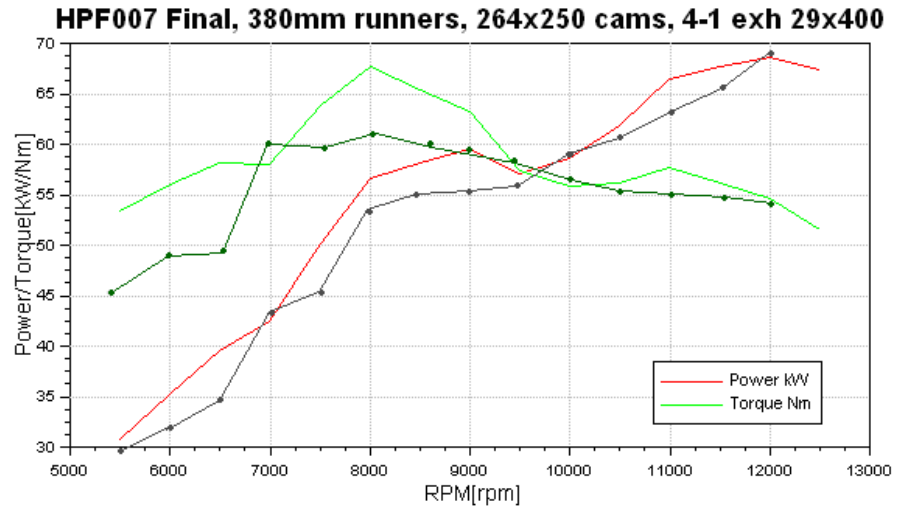
Moottori on varustettu kuusi nopeuksisella sekventiaalivaihteistolla, joka saa käyttövoiman kampiakselilta hammasrattaan välityksellä. Kytkimenä toimii märkä monilevykytkin

5.1 Simulointi

Koska HPF007:ssä käytettiin vapaasti hengittävää moottoria turboahdetun moottorin sijaan, suunniteltaessa HPF007:n moottoria oli käytettävä paljon aikaa simulointiin. Koska suunnittelu-aika on hyvin rajallinen, säästää moottorisimulointiohjelmien käyttäminen huomattavasti käytännön testiaikaa. Simuloinnissa käytettiin AVL Boost -ohjelmaa, joka on 1-ulotteinen moottorin kiertosykliin ja kaasunvaihtoon perustuva ohjelma. Pääasialliset tavoitteet olivat imusarjan ja pakosarjan mitoittaminen, sekä oikeantyyppisen vääntökäyrän ennustaminen.

Jotta mallinnettavasta moottorista saataisiin mahdollisimman oikea, on mallin rakentamisessa huomioitava itse oikeiden fyysisten mittojen lisäksi putkien, kanavien ja sylinterin virtausominaisuudet. Edelleen on huomioitava termodynamiikan lait, jotka vaikuttavat moottorin lämmönsiirtoon ja kaasujen liikkeeseen.

AVL Boost -simuloinnin eri kokoonpanoja käytettiin edelleen moottoridynamoterissä, ja kuten kuva 9 osoittaa, simuloinnin tuloksia voitiin käyttää luotettavana vertailukohtana käytännössä saatuihin tuloksiin.



Kuva 9. Simuloinnin vertailu moottoridynamometrin tuloksiin.

Päätavoitteena moottorin suunnittelussa on saada moottorille mahdollisen hyvä volumetrinen hyötysuhde (liite 3), jonka maksimoiminen on suorassa yhteydessä moottorista saatavaan tehoon. Volumetrinen hyötysuhteen voi arvioida laskemalla.

$$\eta_v = \frac{60 \dot{m}_i}{N^* V_d \rho_i} * 100\% \quad (2)$$

\dot{m}_i = Ilman massavirta, joka menee venttiileiden läpi [kg/s]

N^* = $N / 2$ nelitahtisille moottoreille, N kaksitahtisille

N = Moottorin kierrosnopeus [min^{-1}]

V_d = Moottorin iskutilavuus [m^3]

ρ_i = Ilman tiheys moottorille tulevassa ilmassa [kg/m^3]

Ilman massavirta on arvioitu AVL Boost -ohjelmalla 0,07 kg/s (liite 3), moottorin kierrosnopeudeksi asetettiin 13000 1/min. Iskutilavuus on 0,0006 m^3 ja ilman tiheys 1,2041 kg/m^3 . Näillä arvoilla saadaan tulokseksi volumetriseksi hyötysuhteeksi 89 %. Arvo ei ole nykyaikaiselle nelitahtiselle korkealle kierroksisille ottomoottorille kovin hyvä, mutta huomioon on

otettava, että kaikki imuilma moottorille tulee 20 millimetriä halkaisijaltaan olevan kuristimen läpi.

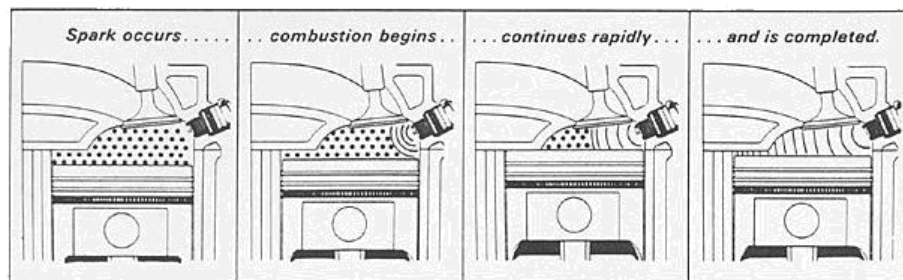
5.2 Puristussuhde ja palotila

5.2.1 Palamistapahtuma

Normaalin otto moottorin ideaalisessa palamistapahtumassa ilma-polttoaineseos palaa kontrolloidusti ja säännönmukaisesti palotilassa (kuva 10). Palamistapahtuma alkaa sytytystulpasta noin 5-45 kampiakselin astetta ennen yläkuolokohtaa, riippuen moottorin kierroksista ja kuormitusasteesta. Tämä sytytysennakko mahdollistaa palamisprosessille aikaa kehittää korkea paine oikeaan kohtaan kampiakselikierrosta.

Sytytyshetkellä sytytystulpan kärki- ja sivuelektrodin välille muodostuu valokaari joka sytyttää ilma-polttoaineseoksen. Syttymisen jälkeen palorintama etenee palotilassa ja sen lämpötila nousee, mikä edelleen kiihdyttää palamista ja palorintaman etenemistä. Tämä nopeasti kiihtyvä palaminen on seurausta liekkirintaman etenemisestä polttoaineseoksessa ja turbulenttisen pyörteilyn johdosta palavan alueen pinta-ala on suurempi kuin staattisessa seoksessa.

Normaalissa palamistapahtumassa palorintama etenee seoksessa polttoaineelle tyypillisten palamisominaisuuksien mukaan. Paine nousee palotilassa tasaisesti maksimiarvoon, kuluttaen miltei kaiken polttoaineen ja sylinteripaine laskee männän liikkeessä alaspäin. Tavoitteena on, että sylinteripaine on korkeimmillaan kun mäntä saavuttaa yläkuolokohdan, tai hieman sen jälkeen. Tällöin laajeneva kaasu antaa parhaan mekaanisen hyötysuhteen moottorille.



Kuva 10. Normaali palotapahtuma sylinterissä.

5.2.2 Nakutus

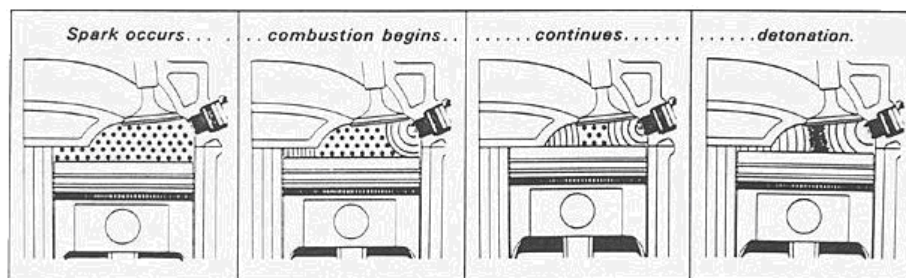
Kun normaalisti palavan liekkirintaman ulkopuolelle jäävä palamaton polttoaine-ilmaseos kuumenee kasvavan palamislämmön ja paineen vaikutuksesta, nakutusta - eli detonointia - esiintyy (kuva 11). Kyseisiä rajuja syttymisiä voidaan luonnehtia ilma-polttoaineseoksen kontrolloimattomaksi räjähdysmäiseksi palamiseksi. Tällöin sylinteripaine nousee korkeammaksi kuin suunniteltu ja vahingoittaa moottoria. Vahinkojen määrä vaihtelee lievän nakutuksen aiheuttamasta pienistä pintavahingoista rajun nakutuksen paineiskun aiheuttamiin mäntä- ja kansivaurioihin.

Nakutusriskiä voidaan vähentää käyttämällä korkeampioktaanista polttoainetta, rikastamalla ilma-polttoaineseosta (rikkaampi seos sisältää enemmän polttoainetta, joka sitoo lämpöä, joka taas alentaa palotilan lämpötilaa), vähentämällä hetkellistä sylinterin maksimipainetta laskemalla moottorin kierroksia, vähentämällä imusarjan painetta ja näin ollen vähentää ilman määrää, sekä vähentämällä moottorin kuormitusastetta. Myös suuri karstan määrä palotilassa voi lisätä nakutusriskiä.

Koska nakutus liittyy läheisesti palotilan lämpötilaan ja paineeseen voidaan nakutusriskiä vähentää jo moottorin suunnitteluvaiheessa. Nakutusriskiä vähentäviä keinoja ovat esimerkiksi: puristussuhteen pienentäminen, pakokaasun takaisinkierätys, sytytysennakon muuttaminen, palotilan muotoilu ja jäähdytysjärjestelmän riittävä kapasiteetti /7/.

Nakutus aiheuttaa erittäin suuren ja piikkimäisen paineen nousun palotilassa, mutta sen kesto on yleensä hyvin lyhyt. Katsottaessa palamistapahtuman kuvaajaa huomataan, että ennen sytytyshetkeä sylinteripaine nousee tasaisesti, mutta nakutushetkellä on havaittavissa korkea piikki sylinteripaineessa. Tämä korkea paineen nousu seuraa vasta varsinaisen sytytyshetken jälkeen.

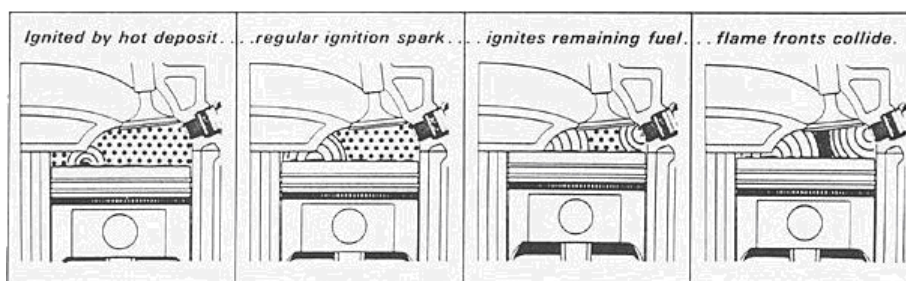
Yleinen oletus on, että nakutuksen hetkellä kuultavan äänen aiheuttaa kahden palamisrintaman kohtaaminen. Nakutushetkellä paineaallot aiheuttavat moottoriin mekaanisiin osiin resonanssia, joiden taajuus on noin 5000–7000 Hz. Nakutuksen ääni (joka on havaittavissa erityisellä nakutussensorilla, tai korvin kuultavissa), on siis seurausta moottorin akustisista reaktioista nakutuksen aiheuttamiin paineaaltoihin. Nakutuksen taajuus riippuu myös moottorissa käytetyistä materiaaleista (alumiini, teräs).



Kuva 11. Nakutuksen syntyminen

5.2.3 Esisytyminen

Esisytyminen sekoitetaan monesti terminä nakutukseen. Kyseessä on kuitenkin kahdesta eri ilmiöstä. Esisyttymisellä tarkoitetaan ilma-polttoaineseoksen ennen aikaista syttymistä, joka tapahtuu ennen sytytystulpan kipinän aiheuttamaa seoksen syttymistä (kuva 12). Syttymisen aiheuttaa jokin muu kuuma kohta palotilassa. Näitä voi olla esimerkiksi väärä sytytystulppa, jonka pintalämpötila nousee liian kuumaksi tai karstan aiheuttama kuuma piste männän pinnassa tai kannessa. Myös esisyttymisessä palotilan paine ja lämpötila nousee äkisti. Tämä voi aiheuttaa nakutusta ja edelleen johtaa esisyttymiseen. Esisyttymisen riskiä voi yrittää pienentää samoin keinoin kuin nakutustakin. /7/



Kuva 12. Esisytyminen

5.2.4 Puristussuhde

Puristussuhde on polttomoottorin puristustilavuuden ja iskutilavuuden summan suhde puristustilavuuteen. Puristussuhde siis kertoo, kuinka paljon polttoaine-ilmaseos puristuu ennen syttymistään. Tästä voidaan käyttää myös ilmaisu *staattinen puristussuhde*.

Staattisen puristussuhteen laskemiseen käytetään kaavaa 3.

$$CR = \frac{\frac{\pi}{4} dS + (V_c - V_p)}{(V_c - V_p)} \quad (3)$$

CR = staattinen puristussuhde

S = iskunpituus

d = sylinterin halkaisija [mm]

V_c = palotilan tilavuus, sisältäen puristuneen kannentiivisteiden aiheuttaman tilavuuden

V_p = männänlaen tilavuus (=0, jos käytetään tasalakista mäntää, mikä tulee sylinteriryhmän tasolle. Negatiivinen jos mäntä on kovera)

5.2.5 Dynaamisen puristussuhteen laskeminen

Edellä mainittu staattisen puristussuhteen laskemiskaavasta 3 saatava arvo on hieman harhaanjohtava. Siinä oletetaan, että sylinteri on täysin tiivis sen jälkeen, kun mäntä on puristustahdissa alakuolokohdassa ja puristettava ilmamäärän tilavuus on juuri sen hetkinen sylinteritilavuus.

Tosiasiasa imuventtiilin sulkeutuminen määrä ajankohdan jolloin varsinainen puristustahdissa tapahtuva ilman kokoonpuristuminen ja paineen nouseminen alkaa. Tämän jälkeistä tapahtumaa kutsutaan dynaamiseksi puristussuhteeksi. Dynaamisen puristussuhteen arvo riippuu siitä kuinka kauan imuventtiili on auki alakuolokohdan jälkeen (JAKK). Mitä myöhemmin imuventtiili sulkeutuu, sitä pienempi on dynaaminen puristussuhde. On myös muistettava, että dynaaminen puristussuhde on aina pienempi kuin staattinen puristussuhde.

Korkeampi ilmoitettu puristussuhde ei siis automaattisesti tarkoita, että varsinainen puristuspaine on korkeampi ilmoitetun puristussuhteen kasvaessa.

Männän sijainti imuventtiilin sulkeutumiskohdassa JAKK /8/:

$$S_e = \left(\frac{S}{2}\right) + R + \left(\frac{S}{2}\right) \cos A - \sqrt{R^2 - \left(\frac{S}{2}\right)^2 \sin^2 A} \quad (4)$$

S_e = toiminnallinen iskunpituus [mm]

S = iskunpituus [mm]

R = kiertokangen pituus [mm]

A = imuventtiilin sulkeutumiskohta JAKK [astetta]

Nimellinen sylinterin tilavuus /8/:

$$V_n = d^2 * S * \frac{\pi}{4} \quad (5)$$

V_n = sylinterin tilavuus, kun mäntä on AKK:ssa

d = poraus [mm]

S = iskunpituus [mm]

Palotilan tilavuus, laskennallinen, kun on tiedossa tehtaan ilmoittama puristussuhde /8/:

$$V_c = \frac{VN}{CRN - 1} \quad (6)$$

Nimellinen sylinterin tilavuus /8/:

$$V_e = d^2 * SE * \frac{\pi}{4} \quad (7)$$

V_e = sylinterin tilavuus, imuventtiilin sulkeutuessa (JAKK)

S_e = toiminnallinen iskunpituus [mm]

Staattinen puristussuhde, kun tiedetään palotilan tilavuus /8/:

$$CR_n = \frac{(V_n + V_c)}{V_c} \quad (8)$$

jossa

V_n = sylinterin tilavuus, kun mäntä on AKK:ssa

V_c = laskennallinen palotilan tilavuus (jos palotilan tilavuus ei ole tiedossa)

Nimellinen puristussuhde /8/:

$$CRE = \frac{(VE + VC)}{VC} \quad (9)$$

Absoluuttinen puristuspaine /8/:

$$CP = (CR_e^{n_n} * AP) \quad (10)$$

jossa

CP = absoluuttinen puristuspaine [bar]

n = polytrooppivakio: 1,2

AP = ulkoilman paine [bar]

Oheisissa kaavoissa on lisäksi huomioitava, että ne perustuvat moottoriin jonka volumetrinen hyötysuhde on 100 %. Kuten kappaleessa 5.1 todettiin on HPF007:n moottorin volumetrinen hyötysuhde $\eta_v = 89$ %. Kun tämä otetaan huomioon saa kaava 10 muodon:

$$CP = (CR_e^{n_n} * AP) * \frac{\eta_v}{100\%}$$

Arvioitu dynaaminen puristusaine /8/:

$$GP = (CRE^n * AP) - AP \quad (11)$$

Sylinteritilavuus-puristusaineindeksi /8/:

$$\frac{V}{P} = CP * V_e * z * 0,3\% \quad (12)$$

jossa

$z = \text{sylinterien lukumäärä}$

Viimeiseksi laskettua V/P-indeksiä voidaan käyttää moottorin suorituskyvyn muutoksen karkeaan arviointiin. Sen tulokset eivät ole absoluuttisia, vaan niitä tulee käyttää vertailuun. Se toimii apuvälineenä, kun puristussuhdetta ja imuventtiilin ajoitusta muutetaan. Laskettuja arvoja voidaan vertailla ja todeta kuinka paljon muutos on vaikuttanut itse dynaamiseen puristussuhteeseen. /8/

5.2.6 Puristussuhde HPF006:n moottorissa

HPF006:n moottorissa puristussuhdetta laskettiin vakiomootorin 12,5:stä 11,75:teen. Puristussuhteen laskemisella haluttiin vähentää riskiä nakutukseen, joka olisi todennäköistä vakioipuristussuhteella. Puristussuhteen laskeminen oli toteutettu jyrsimällä männän laesta materiaalia. Tällä tavoin säilytetään palotilan squish-alue verrattuna siihen jos puristussuhteen laskeminen olisi toteutettu paksummalla kannentiivisteellä.

Turboahdetussa moottorissa on nakutusriski korkea, jos käytetään näin korkeita puristussuhteita. Myös imuilman lämmöt ovat yleisesti huomattavasti korkeammat kuin vapaasti hengittävässä moottorissa.

Käytettäessä turboahdinta on ahtamisen jälkeinen ilma yli 100-asteista. Lämpöä saadaan toki pienennettyä välijäähdyttimellä, mutta pääsääntöisesti imulämpö on aina korkeampi kuin vapaasti hengittävässä moottorissa. HPF006:n moottorin imulämmöt vaihtelivatkin 35-65 asteen välillä, verrattuna HPF007:n moottorin 15-25 asteeseen. Tiedot imulämmöistä saatiin moottorinohjausjärjestelmän tiedonkeruusta.

Nakutuksen ja esisytymisen riskiä voi vähentää alentamalla ahtopainetta, mutta tällöin menetetään myös tehoa. Pienikin puristussuhteen laskeminen auttaa tässä tapauksessa, koska korkeammalla ahtopaineella saavutetaan parempi hyötysuhde kuin puristussuhdetta alentamalla menetetään.

5.2.7 Puristussuhteen muutos HPF007:n moottorissa

Puristussuhdetta haluttiin nostaa vakio moottoriin verrattaessa. Toivomuksena oli saada hieman parempi hyötysuhde moottorissa, ja puhtaampi palamisprosessi. Tärkeänä asiana pidettiin sitä, ettei puristussuhteen nostaminen heikentäisi moottorin luotettavuutta ja mekaanista kestoikää.

Originaalit männät vaihdettiin korkeampipuristeisiin Wiseco-takoalumiinimäntiin. Verrattuna alkuperäisiin valumäntiin, saavutetaan korkeampi staattinen puristussuhde. Wiseco ilmoittaa männille staattiseksi puristussuhteeksi 13,4:1 tai 13,5:1 lähteestä hieman lähteestä riippuen. Puristussuhde oli ilmoitettu erisuuruiseksi paketissa, jossa männät toimitettiin, verrattuna valmistajan web-sivulla ilmoitettuun arvoon.

Ristiriitaisista tiedoista johtuen katsottiin tarpeelliseksi mitata puristussuhde omatoimisesti. Mittausmetodina käytettiin nesteen avulla suoritettavaa metodia.

Mittausten mukaan puristukset ovat kuitenkin n. 13,8:1. On kuitenkin huomioitava, että pienikin mittavirhe aiheuttaa tulosten vääristymistä johtuen hyvin pienistä palotiloista, sekä sylinterilavuuksista. Mitattu palotila oli suuruudeltaan 18 kuutiosenttimetriä eli 18 millilitraa. Myös mittausnesteen viskositeetti vaikuttaa mittaustarkkuuteen.

Aluksi harkittiin käytettävän myös vakio kannentiivistettä ohuempaa tiivistettä. Vakio kannentiivisteen paksuus on 0,75 mm ja saatavilla olevan ohuemman tiivisteen paksuus 0,45 mm. Tällöin yhdessä korkeampipuristeisten mäntien kanssa käytettynä puristussuhde olisi lähellä 15:1, mutta tästä luovuttiin koska arveltiin sen tuovan enemmän riskitekijöitä kuin varsinaista hyötyä tehon lisäämisen kannalta. Tällöin on myös riskinä venttiilien osuminen mäntiin, koska kannen ja männän etäisyys pienenee.

5.2.8 Männät

Männät olivat hieman karkeaa tekoa tehtaan jäljiltä, joten mäntiä päädyttiin hieman muotoilemaan männän lakien terävien kulmien osalta (kuva 12). Tämä toimenpide edesauttaa palorintaman etenemistä palotilassa, sekä vähentää nakutuksen riskiä. Muotoilemisen hyötynä jo edellä mainittuja mäntien mahdollisia kuumia pisteitä saadaan vähennettyä mäntien pinnasta. Materiaalia ei haluttu poistaa liikaa koska tällöin olisi ollut vaarana kumota mäntien tuoma puristussuhteen nostaminen. Muotoilun jälkeen saatiin männän lakeen huomattavasti jouheammat muodot kuin tehtaalta tullessaan varsinkin sytytystulpan kohdalta. Sytytystulpan alue on erityisen tärkeä koska työtahdissa palorintaman eteneminen alkaa sytytystulpan muodostamasta kipinästä. Muotoilu on palorintaman etenemisen kannalta toivottavaa, sekä seoksen tasaisen palamisen edesauttamisen kannalta tärkeää.



Kuva 12. Vertailukuvassa vasemmalla mäntä tehtaalta lähtiessään ja oikealla männän laen siistimisen jälkeen. Terävien reunojen minimoimisella pyritään nakutus- ja esisyttymisherkkyden minimointiin.

Männäntappeihin teetettiin DiArc-timanttipinnoitus, jonka pitäisi vähentää kiertokangen yläpään ja männäntapin välistä kitkaa ja näin ollen parantaisi mekaanista hyötysuhdetta. Timanttipinnoitteen kitkakerroin on hyvin matala - vain viidesosa teräksen vastaavasta. Myös pinnoitteen paksuus on vain noin mikrometrin, joten se ei pitäisi vaikuttaa välyksiin. /9/

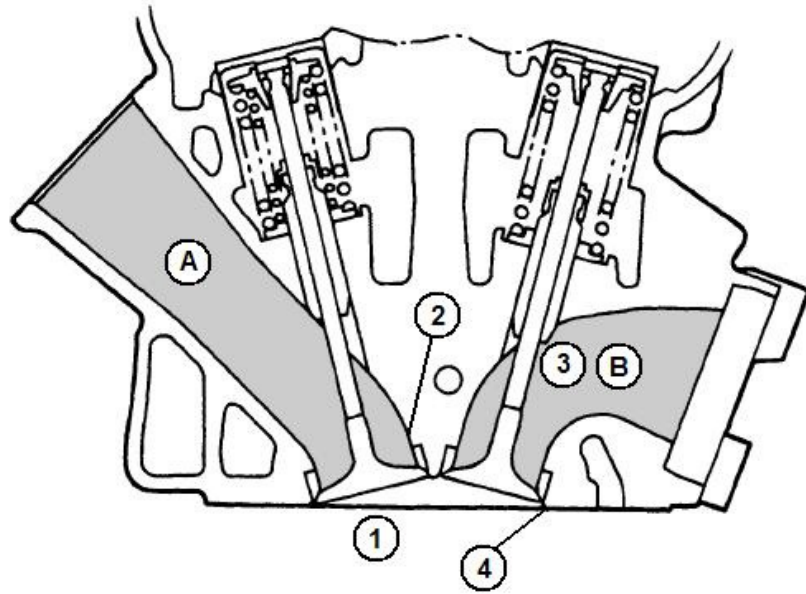
Varsinaisia kitkakertoimen muutoksen varmistavia mittauksia aiheeseen liittyen ei kuitenkaan tehty tässä vaiheessa ajanpuutteen vuoksi.

5.3 Kansi

5.3.1 Kannen muutokset

HPF007:n moottorin suurin osa SuperFlow-testiajoista tehtiin vakio kannella. Vapaasti hengittävässä moottorissa onkin ensiarvoisen tärkeää, että imutahdin aikana sylinteriin imettävä ilma kulkisi mahdollisimman jouheasti imukanavistoa pitkin. Valupurseet poistettiin kanavista ja imukanavan (kuva 13, A) seetipintaa (kuva 13, 2) edeltävää aluetta muotoiltiin hieman. Muotoilulla pyritään saavuttamaan mahdollisimman kohtisuora virtauksen kohtaamiskulma venttiiliin nähden, tällöin myös venttiilin lautasta pitkin kulkevat virtaukset saadaan pidettyä mahdollisimman tasaisina. Myös tällä kertaa venttiileihin tehtiin ns. 30 asteen ns. back-cut-viiste. Kyseinen viiste vähentää terävää kulmaa venttiililautasen ja seetipinnan välillä. Viisteen poistaminen taas vähentää pyörteilyn muodostumista aivan venttiilin pinnassa parantaen virtausta. Vaikutus on havaittavissa varsinkin pienillä nostoilla venttiilin avautumiskohdassa, jolloin virtausnopeudet ovat suuria.

Pakokanavan (kuva 13, B) venttiilin ohjureista (kuva 13, 3) poistettiin materiaalia, koska haluttiin saada kanavasta yhtenäinen ilman pientä pykälää jonka ohjuri muodostaa. Pieni lyhennys ohjurista jakaa venttiiliin varteen kohdistuvaa pintapainetta hieman epätasaisesti, mutta koska moottorin käyttöikä on verrattain lyhyt, ei tämän katsottu aiheuttavan liikaa ylimääräistä rasitusta venttiileille, tai venttiilikoneistolle.



Kuva 13. Halkileikkaus kannen kanavien muodoista

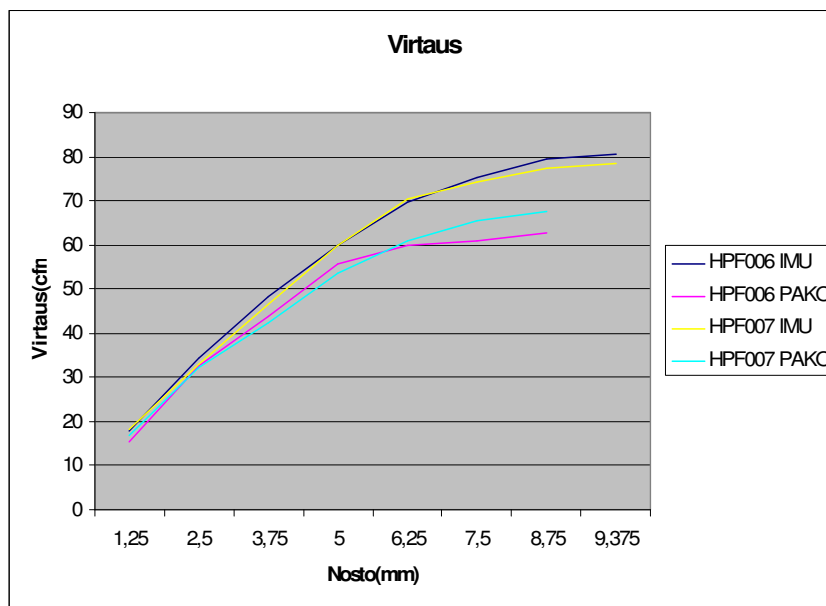
Seeti - pinnat koneistettiin uudestaan, jotta voitiin varmistaa että ylimääräistä ohivuotoa ei synny huonon tiivistyspinnan takia. Palotilojen reuna-alueet pyöristettiin tämän jälkeen, jotta vältettäisiin teräviä reunoja palotilassa (kuva 13, 4). Tiiveyden mittaukseen käytettiin alipainemittausta. Mittauksessa tukittiin venttiileille johtava kanava ja kanavan tiiveys mitattiin alipainemittarilla. Alipaineen luomiseen käytetään, joko käsikäyttöistä tai moottorilla toimivaa alipainepumppua.

Hyvänä arvona, huomioiden venttiilin varren kumin aiheuttamat vuodot, voi pitää n. 500–800 millibaarin alipainetta. Koneistuksen ja venttiilien läppäyksen jälkeen arvot liikkuvat n. 300–400 millibaarin tietämillä. Tähän ei tyydytty vaan venttiilit läpättiin eli hiomatahnaa avuksi käyttäen venttiilin ja kannen seeti pinnan tiivistyskohta hiottiin vielä kahteen kertaan. Tämän jälkeen päästiin varsin hyvään 600 millibaariin. Mittaukset tehtiin käytetyillä venttiilinvarren kumeilla, joten voidaan olettaa että uusilla kumeilla mittaustulokset olisivat olleet vielä parempia.

Venttiilinvarrenkumi on säteishuulitiiviste, joka menettää tiivistys ominaisuuksia aina kun venttiili vedetään tiivisteen läpi, vahingoittaen tiivistysreunaa. Syytä onkin, että aina venttiilit irrotettaessa myös

venttiilinvarrenkumit vaihdettava. Tärkeää on että venttiilin ja seetipinnan välillä on hyvä tiiveys, ettei työtahdinaikana sylinteripaine pääse laskemaan vuotavien venttiilien vuoksi. Tämä edelleen aiheuttaa sylinteripaineen laskemisen työtahdin aikana, joka heikentää moottorin suorituskykyä.

5.3.2 Kannen virtaus



Kuva 14. Virtauspenkissä saadut tulokset, vertailussa HPF006:n moottorin ja HPF007:n moottorin kannet.

Kanaviin tehtyjen muutosten jälkeen mitattiin kannet virtauspenkissä (kuva 14). Vertailukohtana käytettiin HPF006:n moottorissa käytettyä kantta. Mittauspaineena käytettiin 254 mm vesipatsasta vastaavaa yli- tai alipainetta, riippuen siitä, mitattiinko imu- vai pakopuolen virtauksia. Jotta mittaustulokset olisivat vertailukelpoisia HPF006:n moottorin kanssa, mitattiin molemmat kannet samaan aikaan, samalla virtauspenkkilaitteistolla. Tällöin saadaan varmasti vertailukelpoiset tulokset. Tärkeää on myös, että virtaustuloksia ei lueta vain lukuarvoja katsomalla, vaan huomionarvoisempaa on keskittyä muutoksiin virtausarvoissa. Tämä sen takia, että vaikka virtauspenkit ovat kalibroitu näyttämään oikeita virtausarvoja, eivät lukemat ole välttämättä absoluuttisen oikeita.

HPF007:n moottorin kanteen tehdyt muutokset olivat mittaustulosten perusteella varsin onnistuneet, koska varsinaisesti suurempaa kanavien

muotoilua ei haluttu vielä lähteä tekemään. Suuremmat virtaustulokset eivät automaattisesti tarkoita, että kansi olisi parempi moottorin kannalta. Jos kanavien kokoa kasvattaa vain siinä toivossa että haluaa suurempia virtausarvoja, voi lopputulos olla, että koneesta saatava teho laskee. Tämä perustuu osaltaan siihen, että suuremmissa kanavissa on ilman määrä myös suurempi. Jotta tämä ilmamäärä saataisiin sylinteriin imutahdin aikana, tarvitaan suuremman ilmamassan liikkeelle saamiseksi enemmän työtä ja myös aikaa. Näinkin korkealle kiertävässä koneessa on imutahdin pituus hyvin lyhyt, ja jos siitäkin käytetään liikaa aikaa ilman liikkeelle saamiseksi, on sylinterin täytös huonompi kuin mihin päästäisiin pienemmillä kanavien tilavuuksilla.

5.4 Nokka-akselit

Nokka-akselin merkitys moottorin suorituskykyyn on erittäin suuri. Nokka-akseleiden tehtävänä on liikuttaa venttiileitä, jotta ilma-polttoaineseos pääsee sylinteriin ja pakokaasu pois sieltä, tällöin puhutaan moottorin kaasunvaihdosta. Nokka-akselin suunnittelussa ei voida pelkästään huomioida, sitä moottorin yksittäisenä komponenttina, vaan se on huomioitava osana moottorikokonaisuutta. Sen oikea-aikainen ja tyyppinen toiminta on edellytyksenä moottorin parhaan suorituskyvyn saavuttamiseksi.

Teoreettisesti ajateltuna ideaalimoottorin kaasunvaihtoa pidettäisiin osittain staattisena tilanteena, jolloin optimaalinen hetki imuventtiilin aukenemiseen olisi silloin kun pakotahti on päättynyt ja mäntä on yläkuolokohdassa (YKK). Kun mäntä saavuttaisi alakuolokohdan (AKK), imuventtiili sulkeutuisi. Sekä imu –että pakuventtiili pysyisivät kiinni puristustahdin ja työtahdin ajan, kunnes mäntä olisi jälleen AKK:ssa. Tämän jälkeen pakuventtiili avautuisi ja sulkeutuisi jälleen, kun mäntä saavuttaisi YKK:n.

Käytännössä asiat eivät kuitenkaan ole näin. Moottoriin annosteltaessa ilma/polttoaineseosta ja poistettaessa pakokaasuja, omaavat nämä kaasut massan ja edelleen liike-energian. Jos imuventtiili suljettaisiin kun mäntä on AKK:ssa, sylinterissä olisi osittainen alipaine, kun toivottavaa olisi lievää ylipaine (vapaasti hengittävässä moottorissa). Onkin siis tehokkaampaa pitää imuventtiiliä avoinna vielä AKK:n jälkeen, kun mäntä liikkuu takaisin kohti YKK:ta, vaikka varsinainen puristustahti on alkanut. Vastaavasti

pakoventtiiliä pidetään auki vielä sen jälkeen kun mäntä on ohittanut YKK:n, vaikka mäntä liikkuu jo takaisin kohti AKK:ta, jotta sylinteristä saadaan poistettua kaikki ylimääräinen pakokaasu. Mitä nopeampi on moottorin pyörintänopeus, sitä suurempi vaikutus ilman liikkeellä on kaasunvaihtoon.

Normaalisti moottoreissa nokka-akselin toiminta-aika on 255-265 astetta kampiakselin kierrosta. Tämä on n. 80 astetta enemmän kuin teoreettisen ideaalimoottorin nokka-akselin toiminta-aika. Jos venttiilin nostoa ei huomioida, on sylinteriin saatavan ilma-polttoaineseoksen määrä suoraan verrannollinen imuventtiilin aukioloaikaan.

Venttiilin noston määrä vaikuttaa moottorin tehoon, mutta vähemmän itse moottorin luonteeseen. Tiettyyn pisteeseen asti venttiilin nostolla on mahdollista saada enemmän virtausta sylinteriin ja pois sieltä. Venttiilin noston määrää rajoittavat venttiilikoneiston mekaaniset ominaisuudet. Jos venttiilin aukioloaika pidetään vakiona, mutta nostoa kasvatetaan, on venttiiliä nostettava nopeammin kuin pienemmillä nostoilla. Tämän kiihtyvyyden maksimiarvon määrää venttiilikoneiston muiden komponenttien mekaaniset ominaisuudet. Kiihdytettäessä venttiiliä liian nopeasti se irtoaa nokka-akselin pinnasta ja palautuessaan iskeytyy nokan pintaan aiheuttaen ylimääräistä kulumista. Tästä voi myös seurata venttiilien iskeytyminen mäntiin.

Pääsääntöisesti korkeammalla nostolla saadaan vääntökäyrää nostettua kautta kierrosalueen tasaisesti, kuin että se lisäisi ala- tai yläväännön määrää. Tässä kohtaa on erittäin tärkeää itse nokan nousukulman määrittäminen oikein ilman, että nokkaan tai venttiilikoneistoon tulee lisää rasiusta tai ylimääräistä kulumista.

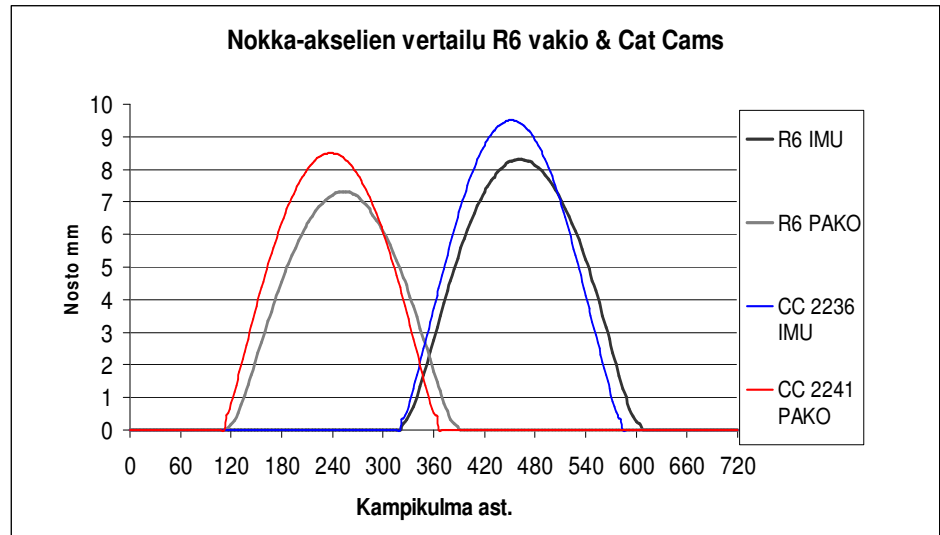
5.4.1 HPF006:n moottorin nokka-akselit

HPF006-auton moottorissa käytettiin Belgialaisen Cat Cams -yhtiön valmistamia nokka-akseleita. Cat Camsilla on vuosien kokemus nokka-akseleiden valmistuksesta ja suunnittelusta. Koska nokka-akseleiden suunnittelu on hyvin monimutkainen prosessi, ei suunnittelua haluttu tehdä täysin itsenäisesti. Huomioon otettavia seikkoja ei ole pelkästään nokkien noston ja toiminnallisen ajan määrä, vaan haastellisempaa on määrittää nokka-akseleiden aiheuttamat rasituksen venttiilikoneiston komponenteille. Määritettäväksi jäi kuitenkin venttiilin maksiminosto, johon vaikuttavia

seikkoja on moottorin mekaaniset rajoitukset, sekä virtausominaisuuksien asettamat rajoitukset. Varsinainen nokka-akselien suunnittelun teki Cat Cams.

Tarpeellinen maksiminosto määritettiin mittaamalla kannen virtausta virtauspenkissä. Vakiomoottorin imuventtiilin nosto on 8,5 mm, ja virtauspenkin avulla tutkittiin, saataisiinko virtausta parannettua lisäämällä venttiilin nostoa. Venttiilin nostoa kasvatettiin aina 10 millimetriin, koska huomattiin, että tätä suuremmilla nostoilla ei virtauslukemiin tullut juurikaan parannusta. Pakoventtiilillä vastaavasti vakionosto on 7,25 millimetriä ja parhaat virtaustulokset mitattiin myös noin 9 millimetrin nostolla. Varsinaisia nokkien maksiminostoja jouduttiin kuitenkin pienentämään, jotta vältettäisiin venttiilien osuminen mäntiin. Täten venttiilien maksiminostoiksi saatiin 9,5 mm imuventtiilille ja 8,25 pakoventtiilille. Muutoin nokkien profiilien suunnittelun toteutti Cat Cams (kuva 15).

Kuvassa 14 on vakio nokka-akseleita verrattuna Cat Camsin valmistamiin nokka-akseleihin. Huomattavaa on, että vaikka venttiilien nostoa on kasvatettu, on venttiilien aukioloaika pienentynyt (taulukko 2). Kokemus on osoittanut, että tällä tavoin sylinterin täytös on paljon parempi kuin vastaavasti pidemmällä aukioloajalla. Vaikka aukioloaika on pienempi, on virtauspinta-alan koko suurempi nokan aukioloajan, eli sylinteriin on mahdollisuus tällä tavoin saada enemmän ilmaa kuin vakio nokilla saavutettaisiin. Syy siihen, ettei aukioloaikaa pidetty vakiopituisena on imuventtiilin osalta se, että sulkemalla se hieman aikaisemmin oli mahdollista nostaa moottorin dynaamista puristussuhdetta.



Kuva 15. Nokka-akselaiden vertailukuvaajat.

Taulukko 1. Nokka-akseleiden nostot.

1 millin nostolla	Yamaha R6	HPF007
Imuventtiili aukeaa	20 EYKK	30 EYKK
Imuventtiili sulkeutuu	48 JAKK	30 JAKK
Pakovenntiili aukeaa	47 EAKK	45 EAKK
Pakovenntiili sulkeutuu	10 JYKK	4 EYKK

5.4.2 HPF007:n moottorin nokka-akselit

HPF007:n moottorin nokka-akseleina haluttiin käyttää samoja kuin HPF006:n moottorissa. Tämä siksi, että nokka-akseleiden muutoksella oli saavutettu huomattava parannus HPF006:n moottorin alkuperäisiin nokka-akseleihin verrattuna. Vaikka Cat Cams oli ilmoittanut nokka-akseleiden kierrosluvun maksimirajaksi 12000 kierrosta minuutissa, haluttiin kierrosrajoitinta nostaa noin 13000 kierrokseen.

Yamaha R6 -moottorissa huipputeho saavutetaan 13000 kierroksella ja vastaavasti huippuvääntö 12000 kierroksella. HPF007:n moottorin haluttu huippuvääntön kierrosalue oli noin 8000 kierroksen paikkeille. Huipputehon toivottiin asettuvan mahdollisimman lähelle maksimikierroslukua, koska tällöin saavutettaisiin mahdollisimman laaja moottorin käyttöalue.

Aluksi valittiin kierrosnopeus, johon HPF007:n moottori haluttiin mitoittaa. Haluttu kierrosluku oli 12800 kierrosta. Kierrosluvun valinta perustui ensimmäisiin dynamometri mittauksiin joissa alun perin oli käytetty 12000 kierrosrajoitinta. Mittauksissa havaittiin, että 500 kierroksen lisäämisellä saatiin vielä hieman tehoa lisää, tästä. Tähän arvoon lisättiin 300 kierrosta, koska ei haluttu kierrosrajoittimen katkaisevan tehoa liian äkillisesti. Tatech moottorinohjausjärjestelmässä on ns. soft-cut-kierrosrajoitin, joka alkaa kierrosten rajoittamisen jo hieman ennen varsinaista asetettua kierrosrajoitinta. Jotta voitaisiin olla varmoja venttiilikoneiston rasitusten määrästä muutoksen jälkeen, haluttiin määrittää niihin kohdistuvat rasitukset:

Valitun kierrosnopeuden perusteella saatiin määritettyä n_k . Koska nokka-akselit pyörivät puolet hitaammin kuin kampiakseli, on tulos jaettava 2:lla sekä saatettava muotoon, josta saadaan yhden asteen pyörähdykseen kuluva aika sekunteina eli n_n

$$n_k = 12800 \frac{1}{\text{min}} \approx 213,33 \frac{1}{s} \quad (13)$$

$$n_n = \frac{1}{2} n_k \frac{1}{s} \Rightarrow \quad (14)$$

$$n_n = \frac{1}{2} n_k * 360 \text{ deg} = \frac{1}{2} n_k * 360 \frac{\text{deg}}{s}$$

jossa

$n_k = \text{kierrosnopeus, kampiakseli}$

$n_n = \text{kierrosnopeus, nokka – akseli}$

Tästä saatiin arvoksi 38400 astetta/s. Kiihtyvyys saatiin nokka-akselin mittausrasitusteella, ja koska tiedettiin asteen pyörähdykseen kulunut aika, voitiin kiihtyvyys a määrittää

$$a = y * \frac{1}{10^6} \frac{m}{\text{deg}^2} \quad (15)$$

jossa

$$a = \text{nokka-akselin aiheuttama maksimikihtyvyys venttiilikoneistoon, } \left[\frac{m}{s^2} \right]$$

$y = \text{nokka-akselin kiihtyvyys mittauslaitteella mitattuna}$

Venttiilikoneiston liikkuvien osien massa on 56,36 g imupuolella ja 55,5 pakopuolella. Painoissa on huomioitu venttiili, jousilautaset, venttiililukot, paininkupit ja säätöpalat, sekä venttiilijouset (vain puolet venttiilien massoista huomioidaan liikkuviksi massoiksi). Näiden tietojen avulla voidaan laskea voima, jonka nokka profiilin geometrisen muodon kiihtyvyys aiheuttaa venttiilissä. Kun kaava 15 edelleen yhdistetään nokka-akselin venttiilikoneistoon kohdistavan voiman kaavaan 16,

$$F = ma \quad (16)$$

jossa

$F = \text{nokka-akselin kohdistama voima} \quad [N]$

$m = \text{venttiilikoneiston liikkuvat massat} \quad [kg]$

saadaan

$$F = m * y * \frac{1}{10^6} \frac{m}{\text{deg}^2} \quad (17)$$

Tällä kaavalla saatiin imuventtiilille kohdistuvaksi voimaksi 484,4 N ja pakoventtiilille 455,0 N. Jousivakio k saadaan mittaamalla jousen puristamiseen tarvittama massa m liikematkalla s .

$$k = \frac{\Delta F}{\Delta s} = \frac{g^* \Delta m}{\Delta s} \quad (18)$$

$$k = \text{jousivakio} \left[\frac{N}{mm} \right]$$

$F = \text{jousen puristamiseen tarvittava voima [N]}$

$m = \text{jousen puristamiseen tarvittava massa [kg]}$

$s = \text{jousen puristuma [mm]}$

On erityisen tärkeää huomioida, että jousen puristuman arvona käytetään vastaavaa puristumaa kuin missä nokan profiilin huippukiihtyvyys on mitattu. Sekä vakio nokka-akseleissa että Cat Cams -nokissa oli huippukiihtyvyys hyvin lähellä maksiminostoa, joten vastaavia arvoja käytettiin myös laskentakaavoissa.

Kun vertaillaan jousivakiota ja nokan kohdistamaa voimaa venttiilikoneistoon voidaan määrittää varmuuskerroin venttiilijouselle. Tämä saadaan jakamalla jousen venttiiliin kohdistama voima, nokka-akselin kohdistamalla voimalla.

Varmuuskerroin HPF007:n imuventtiilille = 1,7

Varmuuskerroin HPF007:n pakoventtiilille = 1,6

Vastaavasti verrattaessa näitä tuloksia R6 vakionokka-akseleiden arvoihin, (kierrosrajoitin 15500 min^{-1}), jossa

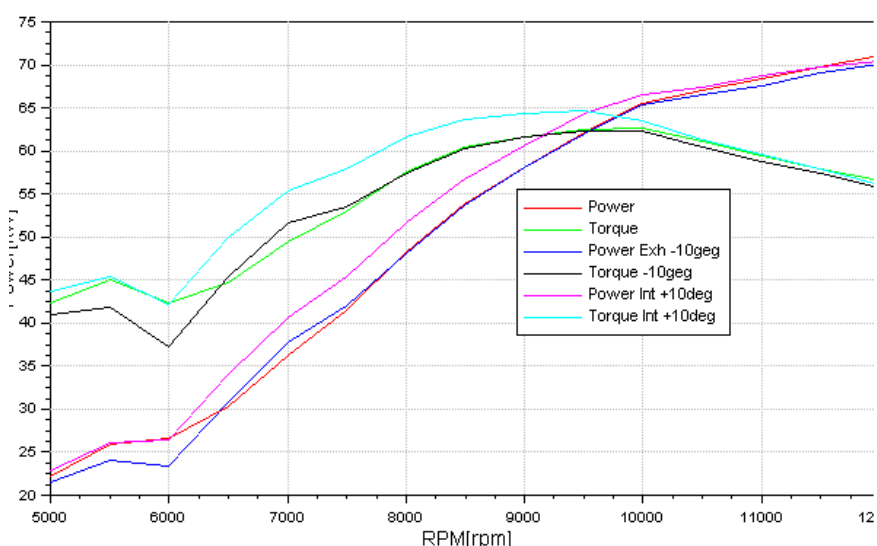
Varmuuskerroin vakio imunokka-akselille = 1,18

Varmuuskerroin vakio pakonokka-akselille = 1,12

Huomataan, ettei varsinainen nokan kiihtyvyys aiheuta lisärasituksia venttiilikoneistolle. Näillä tietojen perusteella voitiin poislukea venttiilin kellumisen mahdollisuus venttiilikoneistossa, nostettaessa kierrosrajoitinta 12000:sta 12800 kierrokseen minuutissa.

Varsinaisesti suurempi riski kierrätettäessä moottoria korkeammalle kuin nokkien valmistaja suosittelee, on venttiilin kiihtyvyyden muutos (venttiilin

noston kolmas derivaatta), josta käytetään myös nimitystä *jerk*. Tämä kiihtyvyyden muutos lisää riskiä nokkien enneaikaiseen kulumiseen. SuperFlow-mittaus jälkeen nokkien ja venttiilinpaininkuppien pinta tarkistettiin silmämääräisesti, eikä ylimääräistä kulumista havaittu. Näihin tietojen perusteella uskallettiin käyttää korkeampaa kierroslukua moottorissa.



Kuva 16. Venttiilien ajoituksen aiheuttama muutos moottorin teho- ja vääntöalueeseen.

Venttiilien ajoitusten muutosta tutkittiin aluksi AVL Boost -ohjelmalla (kuva 16). Siitä saatuja tuloksia pidettiin lupaavina, koska venttiilien ajoitusta muuttamalla oli mahdollista saada lisää vääntöä kautta kierrosalueen. Käytännössä SuperFlow-moottoridynamometri mittauksissa kuitenkin havaittiin, että nokka-akseleiden ajoitus oli parhaimmillaan vakioajoituksia käyttämällä. Tämä kertoi siitä, että imu- ja pakosarjan mitoituksessa oli onnistuttu hyvin, koska näiden komponenttien mitoitus on riippuvainen venttiilien ajoituksista.

Ajan puutteen vuoksi ei lähdetty kokeilemaan mahdollista väännön paranemista jos imu- ja pakosarjan mitoitusta olisi muutettu, nokka-akseleiden ajoituksen suhteen.

6 MOOTTORIN IMUPUOLI

6.1 Kuristin

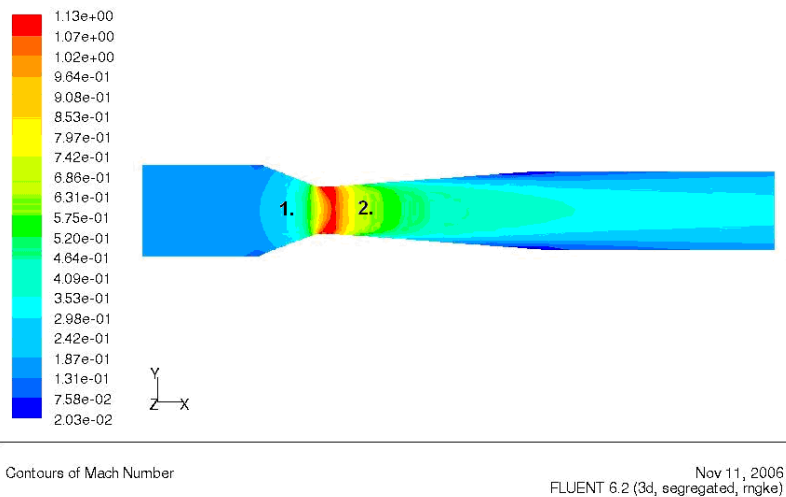
Formula Student -auton säännöissä määrätyn imuilman kuristimen suunnitteluun käytettiin HPF007:n moottorissa useita apuvälineitä. Suunnittelu aloitettiin Catia 3D-mallista, joka simuloitiin Fluent CFD -laskentaa käyttäen. Simuloidusta kuristimista tehtiin rapid prototyping mallit, joita testattiin käytössä virtauspenkissä ja edelleen SuperFlow-moottoridynamometriin kiinnitetyssä HPF007:n moottorissa.

6.1.1 Kuristimen CFD -malli

Catia 3D -mallin luomisen jälkeen kuristimen testaaminen aloitettiin käyttämällä CFD-laskentaa (CFD = computer generated fluid dynamics, tietokoneella luotu dynaaminen virtausmalli). /10/

CFD-laskennassa määritetään nesteelle tai kaasulle virtausdynamiikka matemaattisia malleja hyödyntäen. Metodi on erittäin hyödyllinen suunniteltaessa moottorin osia, kun halutaan simuloita ilman liikettä. Laskenta tapahtuu monimutkaisilla matemaattisilla kaavoilla, joiden laskemiseen käytetään tietokonetta. Tietokone joutuu käsittelemään miljoonia laskutoimituksia, jotta aineen virtausominaisuudet on mahdollista simuloida halutun pinnan suhteen. Laskelmat ovat yksinkertaisimmissakin virtausmalleissa niin monimutkaisia, että laskemiseen joudutaan käyttämään ns. supertietokoneita. /10/

CFD-laskenta tapahtuu kolmessa vaiheessa. Ensimmäisenä luodaan simuloitava malli CAD-mallin pohjalta. Kappaleen pinta mallinnetaan pintamallinnuksena, jolloin kappaleen muoto luodaan verkottamalla määrämuotoisten elementtien avulla. Elementit kytketään toisiinsa niin sanottujen solmujen avulla. Elementtien ja solmujen lukumäärä määrittää mallinnuksen tarkkuuden. Toisessa vaiheessa määritetään laskennassa vaaditut parametrit, kuten väliaineen tiheys, virtausnopeus, virtauksen suunta ja mitattavan kappaleen asento virtaukseen nähden. Lisäksi suoritetaan varsinainen laskenta, joka vaatii paljon aikaa ja prosessoritehoa. Kolmas vaihe on tulosten tarkastelu. /10/



Kuva 17. Fluent laskentaohjelmalla tehty HPF007:n moottorin kuristimen CFD-malli.

Virtauslaskenta perustuu yksinkertaisimmillaan kahteen periaatteeseen, massan ja liikemäärän säilyvyyteen /10/:

$$m_1 = m_2 = m \quad (19)$$

jossa m on kuristimen läpivirtaavan ilman massavirta pisteissä 1 ja 2. [kuva 17]. Yksinkertaisimmissa tietoteknisissä laskentaohjelmat laskenta perustuu kaavaan 20. /10/:

$$F = (p_2 - p_a)A_2 - (p_1 - p_a)A_1 + \rho_2 c_2^2 A_2 - \rho_1 c_1^2 A_1 \quad (20)$$

p = paine [Pa]

p_a = vallitsevan ilmakehän paine [Pa]

A = virtauksen poikkipinta-ala [m²]

ρ = ilman tiheys [kg/ m³]

c = virtausnopeus [m/s]

Tämäntyyppisiin laskutoimintoihin perustuvat ohjelmat eivät ota huomioon viskositeetin vaikutusta eli niillä ei ole kykyä simuloida kitkavastusta eikä virtauksen irtoamisesta aiheutuvaa vastusta tarkasti. Nämä yksinkertaisemmat ohjelmat ovat hyviä luodessa nopeita visualisointeja

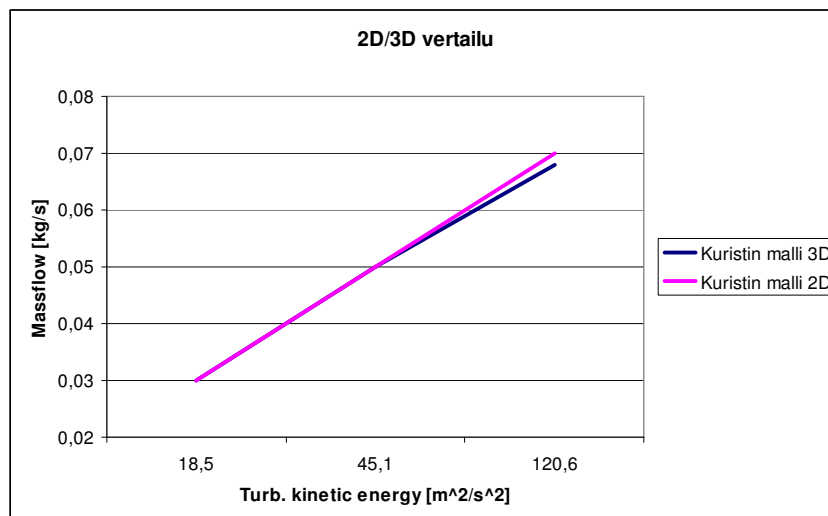
erilaisten mallien välillä varsinkin kun ei haeta absoluuttisen tarkkoja tuloksia. /10/

HPF007:n moottorin simuloiduissa kuristimen malleissa haluttiin kuitenkin käyttää tarkempia laskentametoodeja. Nämä tarkemmat laskentatavat perustuvat niin sanottuihin Navier-Stokes-yhtälöihin. Tarkemmin näiden sisältöön ei tässä työssä paneuduta. Lyhykäisydessään nämä RANS-simuloinnit ottavat huomioon viskositeetin vaikutuksen ja ne kykenevät ainakin teoriassa mallintamaan myös kappaleen pintakitkan ja virtauksen irtoamisen vaikutukset. /10/

Vaikka laskemiseen kului paljon aikaa, on niiden tekeminen yleensä kuitenkin huomattavasti nopeampaa, kuin fyysisen mallin rakentaminen. Erityisen hyödyllisenä ominaisuutena on mahdollisuus luoda visuaalinen malli virtauserojen muodostumisesta.

HPF007:n moottorin suunnittelussa käytettiin CFD-laskentaa kuristimen imupuolen muotoilun sekä kuristimen jättöpuolen pituuden mitoittamiseen ja mallintamiseen. Pääasiallisena virtausmallina käytettiin CFD-2D-mallia, koska sen laskeminen on huomattavasti nopeampaa kuin 3D-mallin.

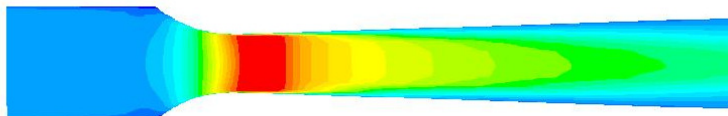
3D-virtausmalleja laskettiin kuitenkin vertailun vuoksi muutama, jotta tiedettäisiin kuinka paljon yhden ulottuvuuden mukaan tuominen vaikuttaisi simuloinnin tuloksiin. Havaittiin, että 3D- ja 2D-mallin välillä ei ollut tässä tapauksessa merkitsevän suurta eroa, joten 2D-mallin käyttämistä suunnittelussa pidettiin luotettavana (kuva 18).



Kuva 18. Kuristimen 3D / 2D-mallin massavirta turbulentsen kineettisen energian funktiona.

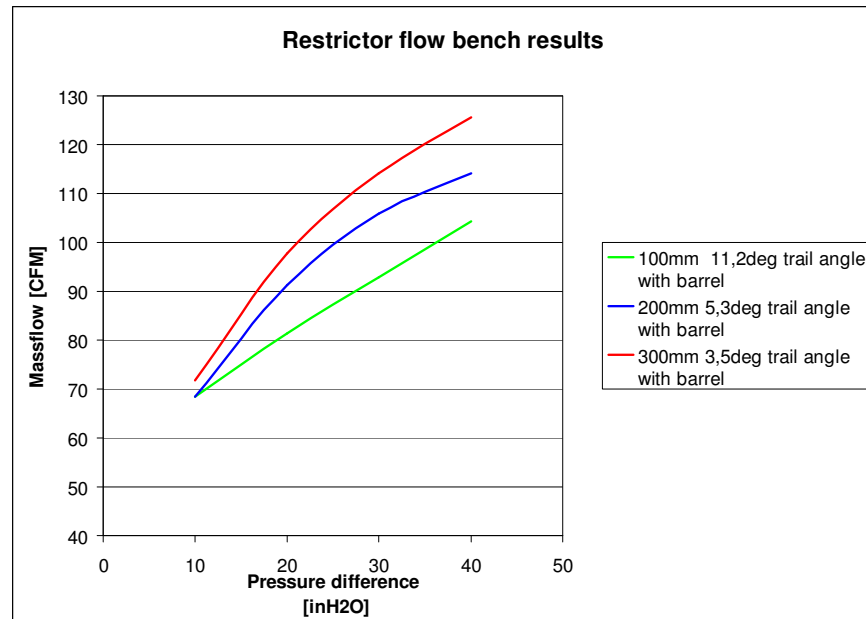
6.1.2 Kuristimien käytännön testaaminen

Kuristimet testattiin käytännössä myös virtauspenkkiä käyttäen. Testauksessa käytettiin virtauspenkin imutoimintoa ja imupaineen määrää muuttamalla haettiin vertailukelpoisia tuloksia verrattavaksi simuloituille kuristimille. Kuristimien sisääntulopuoli vaikuttaa huomattavasti virtausarvoihin. Imupuolella kokeiltiin useita erimallisia sisääntuloja. Näistä parhaimmaksi osoittautui ns. torvi mallinen sisääntulo (kuva 19).

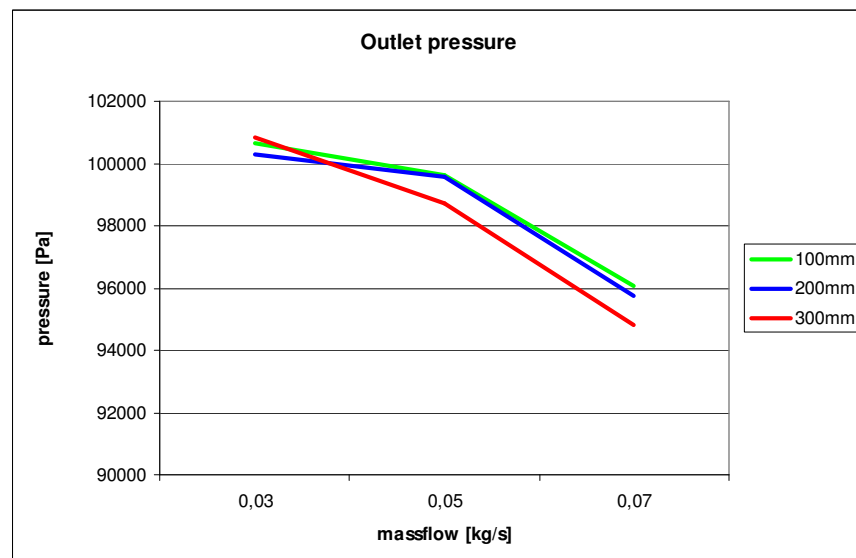


Kuva 19. Torvimallinen kuristimen sisääntulo.

Kuvassa 20 on virtauspenkillä mitatut arvot eri kuristimien välillä. Vertailtavat kuristimet olivat pituudeltaan 100 mm, 200 mm ja 300 mm. Imuaukon läpimitta oli sääntöjen mukaisesti 20 mm ja kuristimen jättöpuolen maksimihalkaisija 42 mm. Kuristimen pituus määrää tällöin kuristimen jälkeisen jättökulman suuruuden: mitä pidempi kuristin, sitä pienempi jättökulma. Tuloksista huomataan, että parhaimmat virtaustulokset saavutettiin pisimmällä kuristimella.



Kuva 20. Kuristimien massavirta paineen muutoksen funktiona

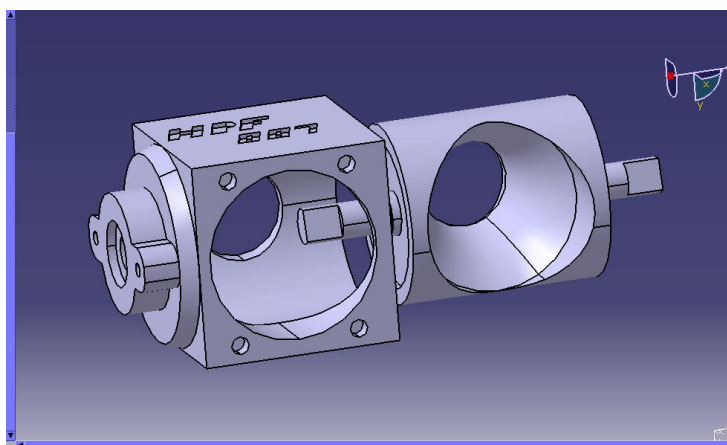


Kuva 21. Kuristimen Fluent CFD -laskennalla simuloitu paineenmuutos ilman massavirtauksen funktiona.

Kun mitattuja virtaustuloksia verrataan Fluentilla saatuihin tuloksiin, voidaan huomata, että niillä on selvä yhteys. Kuvassa 21 on ilmaistuna kuristimen virtaus ilmanpaineen ja massavirran funktiona. Mitä pienempi paine on kuristimen jälkeen massavirtaukseen suhteutettuna, sitä tehokkaammin kuristin toimii. Vertailu on tehty samanpituisilla kuristimilla ja vertailussa on käytetty samanmuotoista sisääntuloa.

6.2 Kaasuläppä

HPF006:n ongelmat kaasuläpän kanssa vaikuttivat HPF007:n kaasuläpän suunnitteluun. Perinteisen läppämallisen kaasuläpän käyttämistä ei pidetty järkevänä, koska jo aikaisemmin mainittu ilman annosteleminen koneelle oli sillä hankalaa. HPF007:n moottorin kaasuläppänä käytettiin barreli tyypistä kaasuläppää. Tämän tyyppisen kaasuläpän toiminta perustuu pyörähtävään kappaleeseen, jonka virtauspinta-ala kasvaa läpän asennon muuttuessa (kuva 22).



Kuva 22. HPF007:n moottorin barrelikaasuläpän rakenne

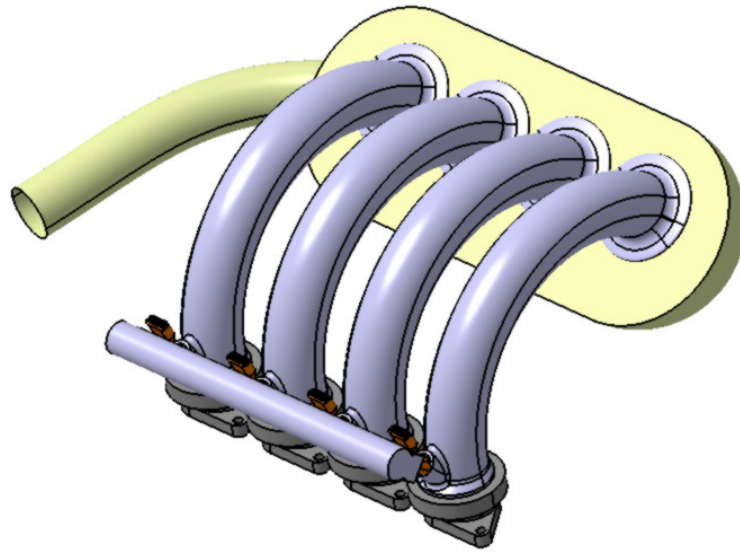
Valintaan vaikutti HPF006:lla tehdyt testiajot vastaavan tyylisellä barrelikaasuläppällä. Moottorin vastaavuus kaasuun oli lisääntynyt huomattavasti verrattuna perinteiseen kaasuläppään. Myös auton ajettavuus oli parantunut tämän muutoksen myötä.

Kaasuläpän ja kuristimen liitoskohtaa haluttiin yksinkertaistaa, joten kuristimen imupuolen muoto oli kaasuläpän barrelissa. Kaasuläpän sisääntulopuolen koko ei siis ollut enää niin kriittinen, koska virtauksen määrää kontrolloitiin suoraan kuristimen virtauspinta-alan kokoa muuttamalla

6.3 Imusarja

Imusarjan oikea mitoitus on tärkeä osa vapaasti hengittävän moottorin toimintaa. Oikein mitoitettu imusarja on avaintekijöitä moottorin suorituskyvyn maksimoimiseksi. Mitoittamalla imusarja oikein moottoria varten on huomioitava useita asioita. Imusarjaa ei tulisi huomioida yksittäisenä komponenttina, vaan osana moottorikonstruktioita.

Imusarjan mitoittamisessa on otettava huomioon myös moottorilta haluttua luonnetta, toisin sanoen, haetaanko moottorilta hyvää ala- vai ylävääntöä eli tehoa. Plenumin suunnittelussa on mitoitusvaiheessa huomioitava seuraavat asiat: sisääntuloputken merkitys, itse plenumin koko ja muotoilu, sekä imuputkien pituus ja halkaisija (kuva 22).

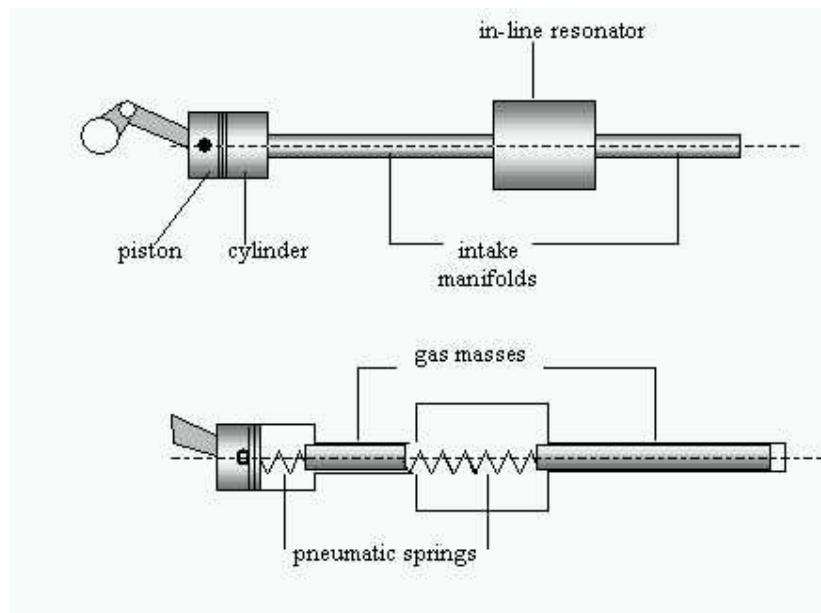


Kuva 22. Imusarjan 3D-malli

6.3.1 Paineaallot

Ilman liikettä imusarjassa ja imuputkien sisällä voi tarkastella ääniaaltojen akustisten ominaisuuksien kannalta. Ääniaallot liikkuvat jatkuvana edestakaisena pulssina imuputken sisällä. Näillä pulsseilla on taajuus ja kyky siirtää energiaa. /11/

Kun tämä pulssi saavuttaa jo sulkeutuneen imuventtiilin, paineaalto ei pysähdy, vaan kimpoaa takaisin ja vaihtaa suuntaansa. Samalla se menettää osan liike-energiastaan. Tälle takaisin liikkuva ilmassa omaa resonanssitaajuuden, amplitudin eli värähtelytaajuuden, ja siihen on liitettävissä paineen muutos. Paineen muutoksessa venttiilin suuntaan liikkuva ylipaine aalto muuttuu alipaine taajuudeksi heijastuessaan imuventtiilin pinnasta. Kun tämä takaisinheijastunut paineaalto saavuttaa plenumin, plenumi käyttäytyy kuin resonanssikammio (kuva 23). /11/



Kuva 23. Imusarjan resonanssimalli /11/

Resonanssikammio toimii kuten oskilloiva jousi (vrt. plenumia jousen toimintaan), johon on kiinnitetty kiinteä kappale (paineaalto imuputkistossa). Kun tämä kiinteä kappale puristaa jousen kasaan, jousi sitoo energiaa, ja

vapauttaa tämän energian laajentuessaan ja samalla siirtää liike-energiaa kiinteään kappaleeseen ja kääntäen kappaleen liikesuunnan eli ilmassaan joka liikkuu imuputkessa. Ilmassa liikkuu tämän lisäenergian seurauksena imukanavaa pitkin takaisin kohti imuventtiiliä. Tällöin ilmapulssin liiketaajuus ja paine on suurempi kuin ennen johtuen paineaaltojen nopeudesta (äänennopeus, nopeus ilmassa 342 m/s, 20 °C). Paineaallot vaihtavat suuntaa useasti ennen kuin imuventtiili jälleen aukeaa. Tällöin niiden taajuus ja paine kasvavat entisestään. Painepulssit kasaantuvat tämän ilmiön seurauksena peräkkäin imusarjassa. Tästä resonoivasta ilman liikkeestä puhuttaessa viitataan niiden kertalukuun eli siihen kuinka mones edestakainen pulssi on muodostunut imuputkiin. /11/

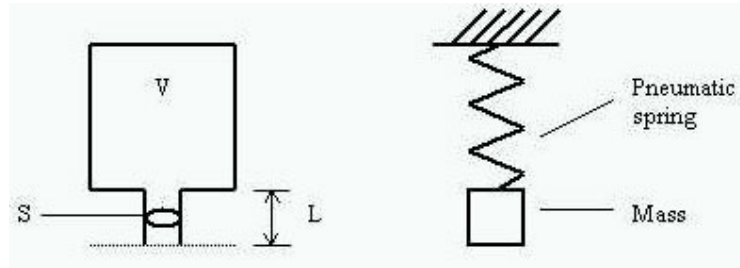
Tätä ilman liikkeen ominaisuutta voidaan käyttää hyödyksi mitoittaessa imusarjaa ja plenumia. Tavoitteena on saada imuputkistossa resonoiva paineaalto kohtaamaan imuventtiili, juuri venttiilin avautumiskohdassa. Pulssien ja venttiilin kohtaamisen ajankohtaa pystytään säätämään muuttamalla imuputkiston pituutta ja läpimittaa.

Jos imusarjan mitoituksessa on onnistuttu, resonointi saavuttaa sylinterin juuri imuventtiilin avautuessa ja ylitäyttää sylinteriä. Pulssien oikealla mitoituksella voidaankin kasvattaa moottorin volumetrinen hyötysuhde ja parantaa hyötysuhdetta yli 100 %:n lukuihin. Niinpä imusarjan resonoivalla vaikutuksella on mahdollista saada enemmän ilmaa sylinteriin kuin se normaalisti pystyisi imemään männän liikkeen aikaansaaman alipaineen vaikutuksesta.

On kuitenkin huomioitava, että painepulssin voimakkuus heikkenee aina kun sen liikesuunta muuttuu. Tämä tarkoittaa myös sitä, että paras tilanne olisi käyttää ensimmäisen kertaluvun resonanssia. Teoriassa tämä tarkoittaisi niin pitkiä imuputkia, ettei niiden toteuttaminen käytännössä olisi mahdollista.

6.3.2 Helmholtz-resonaattori

Helmholtz-resonaattori on akustisesti resonoiva kammio (kuva 21). Kuten jo edellä on viitattu, kammio uudelleen muokkaa ääniaallon akustista taajuutta. Resonanssikammiota voi verrata plenumiin ja Helmholtz-resonaattorin soveltaminen primääriputkien laskemisessa on mahdollista /11/.



Kuva 24. Helmholtz-resonaattori.

$$f = 642 * c * \sqrt{\frac{S}{L * V}} * \sqrt{\frac{CR - 1}{CR + 1}} \quad (21)$$

,jossa

f = halutun maksimiväännön kierrosluku (oskilloivan painepulssin sijainti kierrosalueella) [min^{-1}]

c = äänennopeus (= 340 m/sec.) ,

S = primääriputken sisähalkaisijan ala [m^2]

L = primääriputken pituus [m]

V = sylinterin tilavuus [m^3]

CR = staattinen puristussuhde

6.3.3 Imusarjan primääriputket

Imusarjan primääriputkien suuntaa antavaan mitoitukseen käytettiin samoja laskentakaavoja kuin ennenkin HPF-moottorien suunnittelussa.

HPF007:n moottorin huippuväännön sijoittumista kierrosalueelle haluttiin laskea vakiomoottoriin verrattaessa. Vakiomoottorissa huippuvääntö on 12000 kierroksella ja HPF007:n moottorin haluttu huippuväännön kierrosalue oli 8000 kierroksella. Niin sanotun ylävääntöisen moottorin rakentaminen ei ollut järkevää, koska nokka-akselit rajoittavat moottorin kierrosluvun noin 12500 kierrokseen. Lisäksi myös nokka-akselit oli suunniteltu parantamaan ala- ja keskirekisterin tehoa, joten hyödyn maksimoimiseksi myös primääriputkien mitoitus haluttiin tehdä tätä silmälläpitäen. Kaavasta 22 saadaan laskettua primääriputken pituus, jota käytettiin lähtöarvona simuloinnille ja käytännön mittauksille /12/.

$$l_p = \frac{\theta_i * a}{12N * k} - l_i \quad (22)$$

jossa

l_p = primääriputken pituus [m]

θ_i = kampiakselin asteet

l_i = kannen imukanavan pituus [m]

k = painepulssin kertaluku

N = moottorin kierros-luku [min^{-1}]

a = äänen nopeus imukanavassa [340 m/s]

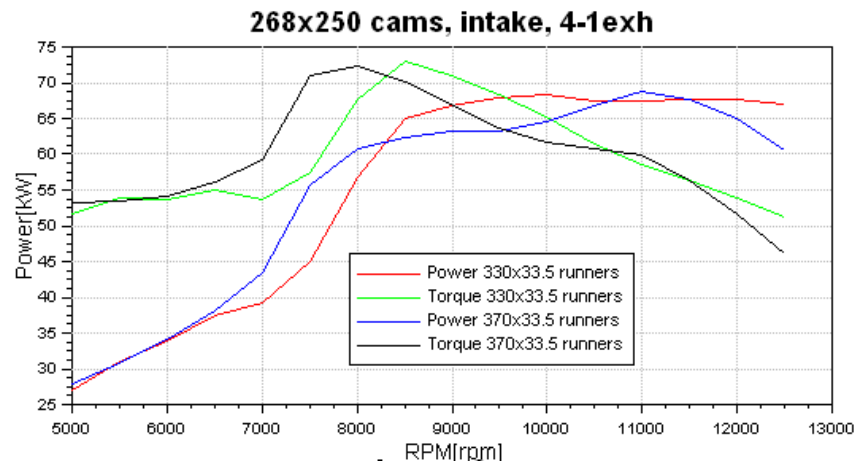
Kuten jo aikaisemmin on mainittu, ei ensimmäisen kertaluvun käyttäminen primääriputken mitoituksessa ole järkevää. Jos näin olisi toimittu, olisi primääriputkien pituus ollut liian pitkä toteutettavaksi käytännössä. Lisäksi 1. ja 2. kertalukujen väli on kierrosalueella niin pitkä, ettei kertaluvun 1. käyttäminen ollut järkevää myöskään tästä syystä. Kun kaavasta 22 lasketaan primääriputken pituus, saadaan 0,30 m. Arvoa pidettiin

hyväksyttävänä ja sitä käytettiin alkuarvona AVL Boost -simuloinneille. Taulukosta 1 on nähtävissä miten, muut paineaaltojen kertaluvut sijoittuvat moottorin kierrosalueelle.

Taulukko 1. Kierrosluvut, joille paineaaltojen eri kertaluvut sijoittuvat.

Kertaluku	Kierrokset
1	16000
2	8000
3	5340
4	4000
5	3200

Laskelmien oikeellisuutta haluttiin testata myös AVL Boost -ohjelmalla ja kuten tuloksista on huomattavissa (kuva 25), oli laskennallinen 300 millimetriä pitkä primääriputken pituus lähellä oikeaa arvoa (vertailussa myös pidempi 370 millimetriä pitkä primääriputki). Lopulliseksi arvoksi muodostui 330 mm koska, kuten on kuvasta 25 nähtävissä, on tehon tasaisuus parempi verrattaessa 370 millia pitkään primääriputkeen, jonka huippuvääntö osuu juuri halutulle 8000 kierrokselle. Jos pituutena olisi käytetty 300 millimetriä, olisi väännön huippu noussut edelleen kierrosalueella ylöspäin kaventaen käytettävää tehoaluetta.



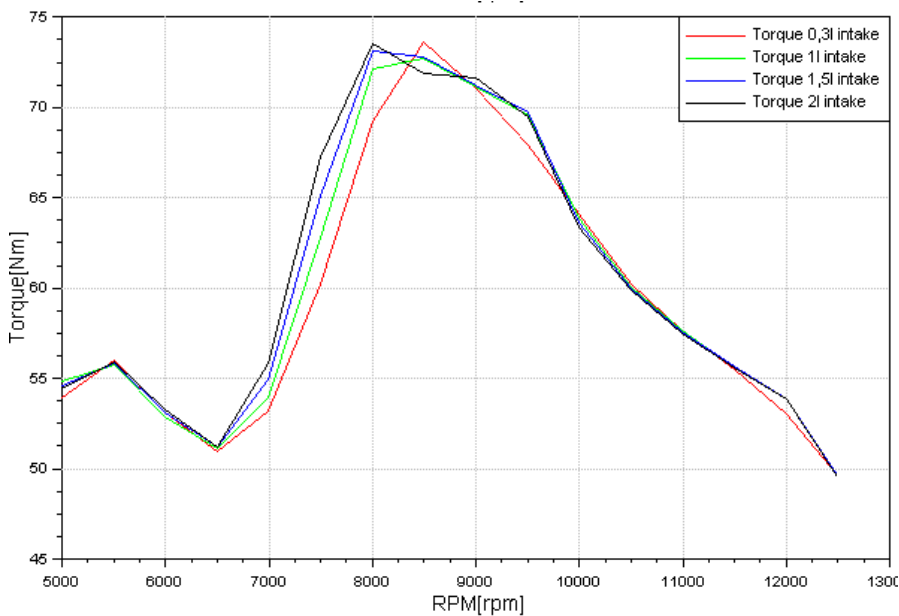
Kuva 25. Primääriputkien vertailukäyrät putkien pituuden muuttuessa.

6.3.4 Plenumi

Hyvin mitoitetun plenumin koko tulisi olla sellainen, ettei se rajoittaisi moottorin ilmansaantia. Plenumin suunnittelussa tulee myös ottaa huomioon, että sen tulisi edesauttaa moottorin sylinterien tasaista täyttöastetta. Jos sylinterien välillä on suuria eroja sisään menevän ilman määrässä, ei myöskään ilma-polttoaine suhde ole sama jokaisessa sylinterissä. Tällöin moottorista ei saada käytettyä sen täyttä potentiaalia ja myös sen lämpökuorma voi olla sylinterien välillä epätasainen.

Plenumin mitoitus laskemalla oli hankalampaa kuin itse primääriputkien mitoitus. Valmiita laskentakaavoja oli hankala löytää ja pelkkien nyrkkisääntöjen käyttämistä mitoitukseen ei pidetty järkevänä.

Koska käytössä oli AVL Boost -moottorisimulointiohjelma ja sen tuloksista oli entuudestaan hyviä kokemuksia, imusarjan mitoitukseen päätettiin käyttää iterointi menetelmää. Plenumin oikean tilavuuden määrittäminen aloitettiin simuloimalla ohjelmassa erikokoisia plenumia. Muihin moottoriparametreihin ei tehty muutoksia, joten ainoana muuttujana oli plenumin tilavuus. Tällä menetelmällä toivottiin saavan vertailukykyisiä tuloksia nopeasti, joita voitaisiin edelleen käyttää plenumin suunnittelun apuna.



Kuva 26. Plenumin tilavuuden vertailua AVL Boost -ohjelmalla.

Vertailu eri tilavuuksien osalta osoitti, että alun perin SuperFlow-moottoridynamometrissa testattu 0,3 litran plenumi oli aivan liian pieni tilavuudeltaan. Tätä oli epäilty jo aikaisemmin, koska moottoridynamometrissa oli havaittu vääntökäyrässä huomattava pudotus 8000 kierroksen jälkeen. Vääntökäyrää oli tulkittu, että väännön raju laskeminen johtuisi moottorin ilmansaannista.

Vääntökäyrää saatiin huomattavasti paremmaksi kuin imusarjan primääriputkia pidennettiin, mutta simulointien (kuva 26) perusteella toivottiin saatavan vielä parannettua moottorin volumetrasta hyötysuhdetta suurentamalla plenumin tilavuutta.

Huomattavaa on myös, että plenumin tilavuus vaikuttaa enemmän alakierroksilla volumetriseen hyötysuhteeseen. Yläkierroksilla taas ei ole juuri suurta eroa huomattavissa. Suurin hyöty, joka saavutettiin plenumin suurentamisella, oli tasaisempi ilman jakautuminen sylinterikohtaisesti. SuperFlow-moottoridynamometrissa tehdyssä lämpötilamittauksissa oli pakokaasujen lämpötilaerot sylinterien välillä kaventunut huomattavasti. 0,3 litran plenumilla pakokaasujen lämpötiloissa saattoi olla jopa 100 astetta eroa. Vastaavasti suuremmalla 2 litran plenumin tilavuudella lämpötilaerot putosivat noin 20 asteeseen.

6.3.5 Imusarjan valmistus

HPF006-autossa käytettiin kokonaan alumiinista valmistettua imusarjaa. Imusarjan materiaalina käytettiin putkenä, sekä 2 mm:n levyä 6061-T6 alumiinia. Imusarjan kokoonpano tapahtui hitsaamalla. Imusarjan kokonaispainoksi tuli n. 2600 g. Imusarja osoittautui luotettavaksi, eikä sen kestävyudessa ollut havaittavaa heikkenemistä kauden 2006 jälkeen.

HPF007:n moottorin imusarjan valmistuksessa haluttiin käyttää muita valmistusmenetelmiä, kuin HPF006:n imusarjan rakentamisessa. Tärkeänä kriteerinä oli imusarjan painon pienentäminen. Koska imusarjan ulkomitat olivat jotakuinkin samat, oli otettava huomioon muiden materiaalien käyttö imusarjan valmistuksessa. Yhtenä mahdollisuutena pidettiin alumiinin materiaalivahvuuden pienentämistä joko 1,5 tai 1,0 milliin, mutta tällöin olisi luultavasti imusarjan kestävyys ollut ongelmana. Kuten jo aikaisemminkin on

mainittu, imusarjan primääriputkien materiaaliksi valittiin Alumide. Edellytyksenä primääriputkien valmistamiselle oli täydellisen lopullisen 3D-mallin piirtäminen. Tämä siitä syystä, että materiaalin työstäminen on hankalaa sen jälkeen kun primääriputket on valmistettu.

Plenumin ensimmäinen versio valmistettiin hiilikuidusta käsin laminoimalla, käyttäen alipaine menetelmää. Hiilikuitu oli 2-2 twill- ristipunos mattoa ja sitä käytettiin kolme kerrosta. Pirmääriputket (kuva 27) liitettiin suoraan hiilikuituun ja putkien puolelle laminoitiin hiilikuitukerrosten väliin 1mm paksuista 6061-6T-alumiinilevyä. Alumiinilevyn tarkoituksena oli jäykentää plenumin tasaista puolta, koska ajotilanteessa imusarjaan muodostuu alipaine, joka vetää plenumin tasaista aluetta helposti kasaan. Käytäntö kuitenkin osoitti, että alipaineen aiheuttama voima oli niin suuri, että hiilikuituinen osa halkesi muutaman testin jälkeen. Osasyynä oli liian ohut rakenne ja epäiltiin, että epoksin määrä laminoinnissa oli riittämätön. Uuteen versioon harkittiin uuden hiilikuituisen plenumin rakentamista johon olisi laitettu enemmän hiilikuitu kerroksia. Ajatuksesta luovuttiin, koska epäiltiin, että painon säästö vastaavaan alumiiniseen ei olisi merkittävä. Lopullinen versio valmistettiin 2 mm:n alumiinista hitsaamalla, ja primääriputket liitettiin alumiiniseen plenumiin liimaamalla ja vetoniiteillä. Aikaan saatiin kevyt ja kestävä rakenne, joka toimi käytännössä huomattavasti paremmin kuin edeltävä hiilikuituinen versio.



Kuva 27. Imusarjan primääriputket ennen ilmakotelon rakentamista.

7 PAKOSARJA JA PAKOPUTKI

Pakojärjestelmän suunnittelussa on otettava huomioon kaikki sen osat alueet. Näitä ovat: pakosarja, pakoputkisto ja äänenvaimennin, sekä mahdollinen katalysaattori. Katalysaattorin käyttö ei kuitenkaan ole vaadittu säännöissä Formula Student -kilpa-autojen moottoreiden osana, joten sen mitoittamiseen ei tässä työssä keskitytä.

Nelitahtisen ottomoottorin pakosarjan mitoittamisessa on huomioitava muutama perussääntö: pakosarjan virtaus ominaisuudet on huomioitava, haettaessa mahdollisimman hyvin toimivaa pakosarjaa. Yhtenä tällaisena piirteenä on pieni vastapaine, koska pakokaasun virtauksen tulisi olla mahdollisimman esteetöntä. Tämä johtaa edelleen virtausominaisuuksiltaan hyvään pakoputkistoon ja äänenvaimentimeen. Toisena tärkeänä aspektina on pakokaasujen lämpöhukan minimointi. Tavoitteena on että mahdollisimman vähän pakokaasujen lämmöstä karkaa lämpösäteilynä pakosarjan pinnasta. Mitä vähemmän lämpöhukkaa ilmenee, sitä muuttumattomana pakokaasujen virtausnopeus pysyy. Suuret lämpötilaerot aiheuttavat paine-eroja pakojärjestelmässä. Paine-ero johtaa siihen, että pakojärjestelmässä on riski vastapaineeseen. Tätä voidaan ehkäistä mitoittamalla putkiston sisähalkaisija riittävän suureksi. Myös lämpösäteilyn vähentämisen eristäminen on yleisesti käytetty keino pakosarjan ja putkiston hyötysuhteen parantamiseksi. Myös ylimääräisten ja liian jyrkkien mutkien välttäminen auttaa säilyttämään pakokaasujen virtausnopeuden mahdollisimman vakiona.

7.1.1 Pakosarjan mitoittaminen

Kun mäntä lähestyy YKK:ta ja sytytystulppa sytyttää ilma-polttoaineseoksen, paine sylinterissä kasvaa. Kasvanut paine siirtää mäntää alaspäin sylinterissä ja edelleen pyörittää kampiakselia. Männän lähestyessä AKK:ta pakoventtiili aukeaa ja laajenevien pakokaasujen paine on edelleen suuri (4-6 bar:). Kun pakoventtiili jatkaa aukenemistaan, alkaa paineaalto liikkumaan pois sylinteristä. Pakokaasun virtausnopeus on noin 100 m/s, mutta paineaalto liikkuu äänennopeudella ja on riippuvainen pakokaasun lämpötilasta. Äänen nopeus on 331,3 m/s 0 °C kosteusprosentin ollessa 0 %. Pulssin nopeus on laskettavissa kaavalla 23.

$$C_{air} = 331,3 \sqrt{1 + \frac{v}{273,15}} m * s^{-1} \quad (23)$$

jossa

C_{air} = äänen nopeus

v = lämpötila [C°]

Laajenevat kaasut liikkuvat edelleen pakokanavaan ja kohti pakosarjan primääriputkea. Seuraavaksi pakokaasut saavuttavat kollektorin, jossa ne laajenevat nopeasti ja etenevät edelleen eteenpäin pakojärjestelmässä. Osa pulsseista heijastuu muihin primääriputkiin takaisin, kohti pakokanavia. Osa pulsseista jatkaa edelleen matkaa pitkin pakoputkea ja lopuksi ulos äänenvaimentimen kautta.

Edellisiin asioihin viitaten, voidaan pakosarjan toiminta yksinkertaistaa kahteen ilmiöön: kaasun virtaavuuteen ja pakopulssien ominaisuuksiin. Absoluuttinen paine-ero sylinterin ja ulkoilman välillä määrittää pakokaasun virtaus nopeuden pakojärjestelmässä. Pakokaasut menettävät osan liike-energiastaan pakojärjestelmän halkaisijan laajetessa. Pakopulssien liike on vastaavasti verrannollinen äänennopeuteen. Vaikka myös niiden nopeus laskee putken halkaisijan pienentyessä, niiden nopeus kasvaa jälleen kun pulssi heijastuu takaisin primääriputkiin. Pulssien nopeus on aina suurempi kuin itse pakokaasujen nopeus. Erikokoisten putkien liitokohdassa pulssien käytös on hyvin erilaista kuin pakokaasujen käytös. Kun kaksi tai useampi putkista kohtaa, lähtee pulssi jokaiseen muuhunkin putkeen, sekä eteen, että taaksepäin putkistoa. Pulssin voimakkuus on suhteessa tulevan ja heijastavien putkien läpimittoihin. Tätä "negatiivisen energian" pulssiteoriaa käytetään perusajatuksena pakosarjan mitoittamiseen. Pulssin liikkuessa putkistossa se jättää jälkeensä alipaineen, tämä imuefekti auttaa edelleen kaasun poistoa sylinteristä. Tämän pulssin aiheuttama imu tulisi ajoittaa venttiilien overlap jaksolle, jolloin myös pakokaasujen poisto sylinteristä tehostuu. Tyypillisesti tätä voidaan kontrolloimaan primääriputken pituudella. Mitoituksen kanssa on oltava tarkkana ja väärin laskettu pituus voi aiheuttaa tehon alenemista. Myös kaasun virtausnopeuden vaikutus on huomioitava pakosarjan mitoituksessa. Liian suuri kaasujen virtausnopeus kertoo liian ahtaasta pakojärjestelmästä, ja tällöin on nähtävissä huipputehon

alenemista. Vastaavasti liian hidas virtausnopeus heikentää ala- ja keskialueen tehoa. Suurempi putken virtauspinta-ala edesauttaa kuumien pakokaasujen laajenemista ja edelleen niiden jäähtymisen, jolloin myös niiden nopeus laskee.

Pakojärjestelmän suunnittelussa siis on tasapainotettava näiden ilmiöiden ehdoilla. Vaikka primääriputkien sisäpinta-aloissa ja pituuksissa olisi onnistuttu, voi järjestelmän tehokkuuden pilata huonosti mitoitettu kollektori. Valmiilla laskentakaavoilla on mahdollisuus saada suuntaa-antavia tuloksia, mutta varsinainen valinta erilaisten vaihtoehtojen välillä on tehtävä käyttämällä dynamometrilla ja käytännön ajossa saatuja tuloksia.

7.1.2 Pakosarjan testaaminen

Pakosarjan mitoittamiseen ei käytännössä käytetty valmiita laskentakaavoja, koska niiden oikeellisuudesta oli huonoja kokemuksia edellisten autojen kanssa [2, s. 40]. Kaavat on yleensä tehty toimimaan suurempien iskutilavuuksisten ja vähemmän kiertävien moottoreiden pakosarjojen mitoittamiseen. Kaavat (24 ja 25) ovat seuraavanlaiset (muutettu metriseen järjestelmään sopiviksi) [13, s.160]:

$$l = \frac{2159 * (180 + EVO)}{n} - 7,62 \quad (24)$$

jossa

l = primääriputken pituus [cm]

EVO = pakiventtiin avautumiskohta EAKK [°]

n = kierrosluku [min-1]

Kaavasta saatu pituus sijoitetaan kaavaan 25 ja saadaan halkaisija /12/.

$$d = \sqrt{\frac{v}{(l + 7,62) * 9,84}} * 5,33 \quad (25)$$

jossa

d = primääriputken sisähalkaisija [cm]

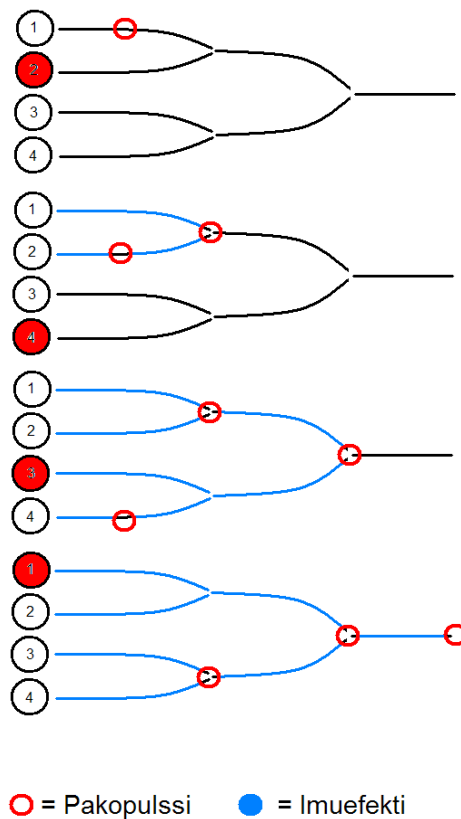
v = yhden sylinterin tilavuus

Lähtö arvona käytettiin 7000 1/min, joka asettuu hieman tavoitellun käyttöalueen keskiosan alapuolelle. Tällä tavoin mitoittamalla, toivottiin käytettävän kierrosalueen olevan laajempi. Pakoventtiili avautuu 66 ° EAKK ja yhden sylinterin tilavuus on 149,8 cm³. Näillä lähtöarvoilla kaava 24 antaa primääriputken pituudeksi 68,25 cm, joka tuntuu hyväksyttävältä arvolta. Kun tämä sijoitetaan kaavaan 25, saadaan putken sisähalkaisijaksi 23,5 mm, tätä tulosta ei voida teoriassa pitää oikeellisena, koska minimiarvona pidetään pakoventtiilien alaa vastaavaa putken halkaisijaa, joka olisi 33 millimetriä. Oheisella kaavalla on mahdollista laskea 4-1-mitoitus, lisäksi 4-2-1-mitoittamiseen voisi käyttää erillistä taulukkoa /12, s.160/, josta saadaan ensimmäisen kollektorin jälkeisen putken pituus, mutta talukon arvolla olisi saatu negatiivinen putken pituus, joten sitä ei pidetty luotettavana mitoituskeinona.

Suuntaa antavaan mitoitukseen käytettiin vakiopakosarjan mittoja käyttämällä. Epäiltiin kuitenkin, että niiden läpimitta olisi liian suuri, johtuen HPF007:n alemmaksi suunnitellusta huippuväännön kierrosalueesta. Mitoittamiseen käytettiinkin AVL Boost -ohjelmaa, koska sen tuloksia pidettiin luotettavampina kuin kaavojen perusteella lasketut mitat. Lisäksi pakosarjat testattiin käytännössä SuperFlow-moottoridynamometrillä. Oikeiden mittojen määrittämiseen käytettiin iterointimenetelmää.

Pakosarjan malliksi harkittiin kahta erityyppistä pakosarja mallia. Toinen näistä on vakiomoottorissakin käytetty 4-2-1-pakosarja. Toisena vaihtoehtona oli 4-1-mallinen pakosarja. 4-2-1-mallisen toiminta on seuraavanlainen:

Sylinteriltä lähtevä painepulssi etenee pitkin primääriputkea kohti ensimmäistä putkien yhtymiskohtaa. Putkien yhtymiskohtaa käsitellään ensimmäisenä kollektorina. Ensimmäiset primääriputket mitoitetaan niin, että edellä mainitut pakokaasujen imupulssit saadaan ajoitettua oikein. Koska HPF007:n moottorin sytytysjärjestys on 1-2-4-3, yhdistetään 4-2-1-pakosarjan primääriputket niin, että 1. ja 2. sylintereiden pakokaasut ja vastaavasti 3. ja 4. sylintereiden pakokaasut yhdistyvät ensimmäisissä kollektoreissa. Tämän jälkeen pakokaasut jatkavat matkaa edelleen toiseen kollektoriin jossa kaikkien neljän sylinterin pakokaasut yhtyvät. Tämä mahdollistaa sen, että toiseen kollektoriin yhtyvien putkien pituuden muutoksella voidaan vaikuttaa pulssien imuefektin uudelleenkäytön muille sylintereille (kuva 28). Tätä teoriaa haluttiin testata käytännössä ja primääriputkien järjestystä muutettiin toisenlaiseksi, huomattiin, ettei suurta eroa ollut, vaikka suositeltu järjestys oli koko vääntöalueen hieman parempi.



Kuva 28. 4-2-1-pakosarjan toimintaperiaate.

Kuvassa 29 on testatut 4-2-1-malliset pakosarjat, vasemmalta oikealle: pakosarja ”käännetyllä” järjestyksellä, seuraavana normaalisti aseteltu ja viimeisenä vakiopakosarja.



Kuva 29. 4-2-1-pakosarjat

4-1-pakosarjan toiminta on yksinkertaisempi, siinä kaikki primääriputket yhtyvät yhteen kollektoriin ja määritettäväksi jää pelkästään primääriputkien pituus sekä niiden halkaisija.

Lopulliseksi pakosarjaksi valittiin 4-1-mallinen pakosarja 4-2-1-pakosarjan sijaan, koska kuten liitteessä olevista SuperFlow-mittauksista huomataan (liite 4), ei 4-1-pakosarjan ja 4-2-1-mallisen pakosarjan tuloksissa ollut juurikaan eroa, mutta 4-1-mallisesta oli mahdollisuus tehdä hieman kevyempi (painonsäästöä noin 10 %), kuin 4-2-1-mallisesta pakosarjasta. Lopulliset mitat pakosarjalle olivat 500 millimetriä pitkät primääriputket ja sisähalkaisijaksi muodostui 29 millimetriä. Sisähalkaisija määritettiin aloittamalla primääriputken sisähalkaisijan arvosta 33 millimetriä (pakoventtiilien alaa vastaava putken halkaisija). Tästä pienennettiin, kunnes huomattiin, että putken läpimitta vaikuttaa pakokaasujen virtauksiin heikentävästi. Määritys tehtiin AVL Boost -ohjelmalla, sekä käytännössä SuperFlow-moottoridynamometrissä. Verrattaessa liitteessä 4 näkyviä eroja huomataan, ettei pakosarjan sisämitan pienentäminen vaikuta saatuun vääntöön tai huipputehoon negatiivisesti. Sisämittaa pienentämällä oli mahdollista valmistaa pakosarjasta entistä kevyempi.

7.2 Käytetyt testausohjelmat

7.2.1 SuperFlow-moottoridynamometri

HPF007:n moottorin käytännön testaaminen aloitettiin käyttämällä SuperFlow SF-901 -moottoridynamometriä. Dynamometrin toiminta perustuu vesijarruun ja vääntömomenttia mittaavan voima-anturin toimintaan. Koska voima-anturi mittaa vastusarvon muutosta, on dynamoterissä kompensointi joka vähentää lämpötilan muutoksen aiheuttamaa mittavirhettä.

Dynamometri oli sijoitettu Helsingin ammattikorkeakoulun, autotekniikan oppitiloissa sijaitsevaan kylmälaboratorioon. Tämä mahdollisti moottorin ulkopuolisten olosuhteiden pitämisen mahdollisimman vakiona. Tärkeänä oli pitää lämpötila ja ilmanpaine mahdollisimman vakiona, jotteivät ne vaikuttaisi mittaustulosten tarkastelemiseen. Mittaushuoneen lämpötilana pyrittiin pitämään n. 15 asteessa ja ilman paineena 100 kPa:ta. Näiden olosuhteiden katsottiin olevan lähellä niitä olosuhteita, missä autolla useimmiten ajettaisiin.

Moottorin toimintaa pystytään mittaamaan useilla eri antureilla yhtä aikaa. Näitä ovat esimerkiksi: vääntömomentti, kierrosluku, öljynpaine, jäähdytysveden lämpötila ja 8-kanavainen pakokaasun lämpötilamittari. Kaikkia antureista saatavia tietoja voidaan nauhoittaa yhtä aikaisesti dynamometrin muistiin ja käyttää myös tulosten jatkoanalysointiin.

Viimeksi mainittu on erityisen hyödyllinen, koska pakokaasujen lämpötilaa voi mitata kaikista sylintereistä erikseen. Lämpötiloista voi esimerkiksi päätellä kunkin sylinterin seoksen muodostumista. Huomattavat erot lämpötiloissa kertovat epätasaisesta ilma-polttoainesuhteesta, ja näitä tuloksia käytettiin edelleen imusarjojen testaamiseen.

7.2.2 MAHA-alustadynamometri

MAHA-alustadynamometriä (kuva 30) käytettiin viimeisenä moottorin säätöjen tekemiseen, ennen käytännön testaamisen aloittamista. Tämä oli erityisen hyödyllistä, kun moottorin osakaasualueita säädettiin. Tämä tarkoitti käytännössä kaasunasentoja välillä 0-25 %.

Osakaasualueiden säätäminen polttoaine- ja sytytyskartoille on erittäin vaikeaa käytettäessä SuperFlow-moottoridynamometriä. Käytännössä tämä tarkoittaisi voimansiirron osien kiihtyvyyksien ja hitausmomenttien tarkkaa

simulointia. Lisäksi pitäisi tietää moottorin kierrosluvun nousunopeus suhteessa autoon kohdistuviin voimiin. Kun otetaan vielä huomioon se, että autoon kohdistuu jatkuvasti muuttuvat dynaamiset ajo-olosuhteet, tiedettiin että järkevämpää olisi säätää polttoaine- ja sytytyskartat vasta MAHA-alustadynamometrissä.



Kuva 30. Auton moottorin säätämistä MAHA-dynamometrissä.

7.2.3 Tatech-tiedonkeruu

HPF007:n moottorin moottoriohjausjärjestelmänä käytetyssä Tatech 5 Prossa on sisäänrakennettu tiedonkeruu. Tiedonkeruun näytteenoton maksimitiheys on 15 ms, ja kaikkia moottoriin liitettyjä antureita tallennetaan yhtä aikaa. Käyttäjä valitsee näytettävät parametrit ja tallennetut anturitiedot voidaan lukea helposti graafisesta kuvaajasta.

Tiedonkeruun käyttö oli erityisen hyödyllistä haettaessa oikeaa lambda arvoa moottorille. Tatechin sisäänrakennetun laajakaista lambda arvo oli helposti luettavissa dataloggausohjelman graafisesta kuvaajasta. Tällöin oli helppo vertailla lambda muutosta esimerkiksi moottorin kierroslukuun, jonka perusteella oli moottorin ruiskutuksen ja sytytysennakon säätäminen huomattavasti helpompaa.

7.3 Erilaisilla polttoaineilla testaaminen

HPF007:n moottorin testaamisessa käytetyt bensiinit olivat Neste 98E, Neste 95E ja Shell V-Power (99+ oktaaninen). Sunocon 100 oktaanista ei otettu testattavien joukkoon, koska jo tässä vaiheessa päätettiin olla käyttämättä sitä kilpailussa huonojen edellisvuoden kokemusten perusteella. Toivomuksena oli, että eri bensiinejä käytettäessä saataisiin selvyttä, kuinka moottorin säätöparametreja joutuisi muuttamaan (polttoainekartat ja sytytysennakon määrä).

Seossuhteen muutoksen mittaamiseen käytettiin laajakaista ETAS-lambdamittaria, joka oli kalibroitu näyttämään oikeita arvoja bensiinillä. On tärkeää, että käytetään oikein kalibroitua mittaria, koska muuten mittausarvoissa saattaa olla heittoa.

Mittari sijoitettiin pakosarjassa heti kollektorin jälkeen, koska tässä kohtaa pakoputkistoa mittaustuloksia voidaan pitää luotettavina. Liian lähelle pakokanavaa sijoitettu anturi voi ylikuumentua (yli 800 astetta) ja rikkoutua. Toisaalta liian kauas pakoputkistossa sijoitettu anturi voi antaa virheellisiä tuloksia johtuen liian alhaisesta lämpötilasta.

Lambdamittari mittaa pakokaasujen palamattoman jäännöshapen määrää (laiha seos), tai palamattomien hiilivetyjen määrää (rikas seos) pakokaasuista. Lambda (λ) -arvo mittaa, kuinka kaukana seossuhde on stoikiometrisestä seossuhteesta. Lambda 1,0 on stoikiometrinen seossuhde, rikas seos on alle 1,0 ja laiha seos yli 1,0.

Ilma-polttoaineseoksesta puhuttaessa viitataan myös AFR-arvoon (Air Fuel Ratio, suom. ilma-polttoainesuhde). AFR- ja lambda-arvo ovat suorassa yhteydessä toisiinsa ja kun tiedetään AFR arvo, voidaan lambda laskea. /14/

$$\lambda = \frac{AFR}{AFR_{stoich}} \quad (26)$$

jossa

λ = lambda-arvo

AFR = mitattu lambda-arvo

AFR_{stoich} = käytetyn polttoaineen stoikiometrinen seosarvo.

Verrattaessa Nesteen valmistavia 95- ja 98-oktaanisia polttoaineita ei havaittu merkittäviä eroja tehon tai väännön suhteen. Myöskään ei havaittu, että moottorin nakutusherkeyttä olisi lisääntynyt käytettäessä matalamman oktaaniluvun omaavaa bensiiniä.

Kolmantena testatun Shell V-Powerin ero Nesteen bensiineihin oli mitattavissa. SuperFlow-testausjakson aikana havaittiin, että V-Power antoi saman tehon ja väännön pienemmällä sytytysennakolla (-5 astetta) ja hieman laihemmalla ilma-polttoaineseoksella (Neste: lambda 0,90; V-Power 0,93). Tuloksista pääteltiin, että V-Powerin palamistehokkuus olisi parempi kuin Nesteen bensiineillä. Lisäksi oletettiin, että ilma-polttoaineseoksen optimaalinen seossuhde olisi laihempi, koska sytytysennakkoa tai polttoainetta ei tarvittu niin paljon parhaan suorituskyvyn saavuttamiseksi. Tämä antoi aiheita epäillä, että bensiinien kemiallisissa koostumuksissa olisi eroja (liite 5).

Kun tutkitaan näiden polttoaineiden eroja, on huomattavaa, että oktaaniluvun lisäksi polttoaineiden etanolipitoisuuksissa on eroja, Neste 98 sisältää n. 5 % etanolia, kun taas V-Power-bensiini sisältää etanolia alle 0,1 %.

Lambda-arvon muutos selittyy etanolin määrän erosta bensiinien välillä. Kun etanolia ja bensiiniä sekoitetaan, muuttuu seoksen stoikiometrinen seos, etanolin stoikiometrinen arvo on 9:1 (AFR-luku, ilma-polttoaineseoksen suhdeluku), kun taas bensiinin stoikiometrinen arvo on 14,7:1. Kun näitä aineita yhdistetään, syntyy seos jonka stoikiometrinen arvo on näiden väliltä.

Stoikiometrin arvo ilmoittaa täydellistä palamista. Yleensä paras teho saavutetaan kuitenkin hieman rikkaammalla seoksella. HPF007:n moottori saavutti parhaan tehon lambda arvon ollessa 0,9-0,94 (vastaa bensiinin AFR-arvoa 13,2-13,8).

Koska moottorin paras teho saavutettiin hieman laihemmalla seoksella käytettäessä V-Poweria verrattuna Neste 98E:hen , todettiin tämän johtuvan etanolista, jota 98E sisälsi. Myös erot sytytysennakoissa selittyisi etanolin hitaammalla palamisnopeudella, mutta määrän ollessa näin pientä ei uskottu sen olevan pelkästään siitä johtuvaa. Muutos voi johtua myös bensiinien muista kemiallisista ominaisuuksista, mutta tarkkaa syytä ei saatu selvitettyä.

8 YHTEENVETO

Tässä insinööriyössä tutkittiin Helsingin ammattikorkeakoulun Formula Student -kilpa-auton moottorin kehitystä, toteutusta ja käytännön testaamista. Lisäksi keskityttiin vertailemaan vuoden 2006 HPF006-autossa käytettyä turboahdettua moottoria HPF007:n vapaasti hengittävään moottoriin.

Tärkein suunnittelun tavoite oli selvittää vapaastihengittävän moottorin käyttämistä Formula Student -kilpa-autossa. HPF007:n moottorin kehitystyössä onnistuttiin kohtuullisesti, huomioonottaen, että kyseessä oli ensimmäinen vapaasti hengittävä moottori, jota käytetään tiimin historiassa. Vaikka kaudella 2007 FSAE-kisassa jouduttiin keskeyttämään endurance kilpailuosiossa, oli auton nopeus radalla erittäin kilpailukykyinen. Jos käytännön testaamiseen olisi käytetty enemmän aikaa, olisi myös auton käyttövarmuus todennäköisesti myös lisääntynyt.

Tavoiteltuna moottorin ominaisuutena oli laaja vääntöalue. Moottorin lopullinen suorituskyky on luettavavissa liitteestä 4. Huippuvääntö 60 Nm saavutettiin 8000 kierroksella, ja huipputeho asettui 12000 kierrokseen. Huomattavaa oli, että 90 % väännöstä oli käytettävissä kierrosalueella 7000-12000 kierrosta minuutissa.

Imusarjan suunnitteluun ja käytännön testaamiseen käytettiin huomattavasti aikaa. Ennen lopullisen version rakentamista materiaalina käytettiin alumiinia, joka oli huomattavasti kustannustehokkaampaa kuin pikamallitettujen osien käyttäminen. Käytännön testaaminen osoitti, että myös imusarjan mekaaniset rasitukset on otettava huomioon sen suunnittelussa. Lopullisen imusarjan paino oli huomattavasti pienempi kuin vuoden 2006 autossa.

Pakosarjojen testaamiseen käytettiin myös paljon simuloiteja ja laskelmia, ennen varsinaisia käytännön testejä. Koska pakosarjat pystyttiin valmistamaan itsenäisesti, oli erilaisten kombinaatioiden kokeileminen helppoa ja nopeaa.

Kuristimen suunnittelu ja mallintaminen oli perusteellisempaa kuin HPF006-autossa. Simulointi ja virtausohjelmat osoittivat, että kuristimen suunnittelu

voidaan hoitaa miltei kokonaan virtuaalisesti, eikä käytännön testejä välttämättä edes tarvitse.

Alusta alkaen tavoitteena oli rakentaa moottori, joka soveltuisi paremmin kilpasarjan radoille soveltuvaksi. Erityisesti onnistuneena parannuksena pidettiin huomattavasti parempaa kaasun vastaamista verrattuna HPF006-autoon. HPF007:n moottorin kehitystyöllä osoitettiin, että auton suorituskyky ei ole vain riippuvainen tehon ja vääntömomentin määrästä, vaan tärkeämpänä asiana auton suorituskykyyn on näiden käytettävyys.



Kuva 30. HPF007 auton Catia 3D -malli.

VIITELUETTELO

- /1/ Society of Automotive Engineers, *2007 Formula Sae Rules*. [verkkodokumentti] 2007. [viitattu 22.11.2007]. Saatavissa: <http://www.sae.org/students/fsaerules.pdf>.
- /2/ Törrönen Marko, Insinööriyö *Formula Student -kilpa-auton moottorin suunnittelu*. Helsingin AMK, Tekniikka ja liikenne: Helsinki. 2004.
- /3/ Cooper G., *Rapid Prototyping Technology, Selection and Application*, Marcel Dekker, Inc, New York 2001.
- /4/ Tuomi J., *Pikavalmistuksen sovellukset ja niiden käyttöönoton vaikutukset yritysten tuotekehitysprosesseissa*, Licensiaatintyö, Espoo 2003.
- /5/ Kaikonen H., *Pikavalmistus - Prototyypivalmistuksen teknologiavalinta*, MET-julkaisuja 5/99, Helsinki. 1999.
- /6/ TEKESin teknologiakatsaus 52/97, *Rapid prototyping - mallien, prototyyppien ja työkalujen pikavalmistus*, Helsinki. 1997.
- /7/ *Engine Knocking*. [verkkodokumentti]. 2008 [viitattu 13.4.2008] Saatavissa:http://en.wikipedia.org/wiki/Engine_knocking
- /8/ *Cam Timing vs. Compression Analysis*, [verkkodokumentti]. 2008 [viitattu 10.04.2008]. Saatavissa: <http://victorylibrary.com/mopar/cam-tech-c.htm>
- /9/ *Diarc, koneenosapinnoitteet*, [verkkodokumentti]. 2008 [viitattu 21.04.2008]. Saatavissa: <http://www.diarc.fi/fi/machine.html>
- /10/ Nyholm Juha, Diplomityö, *Raskaan kaluston aerodynamiikan kehittäminen*, TKK , Konetekniikka Espoo. 2006.
- /11/ *Intake Manifold Tech: Runner Size Calculations*, [verkkodokumentti]. 2008 [viitattu 11.04.2008]. Saatavissa: <http://www.teamintegra.net/sections/articles/showarticle.asp?ArticleID=466>
- /12/ Winterbone Desmond – Pearson Richard, *Design Techniques for Engine Manifolds*. Professional Engineering Publishing: London. 1999. 364 s.
- /13/ Bell A. Graham, *Four-Stroke Performance Tuning*. Haynes Publishing: Yeovil. 2002.
- /14/ *"Technology for Tuners" Newsletter #6*, [verkkodokumentti]. 2008 [viitattu 09.04.2008]. Saatavissa: <http://www.innovatemotorsports.com/resources/news6.php>

LIITELUETTELO

LIITE 1: Formula SAE 2007 fuels

LIITE 2: Alphaform materials

LIITE 3: HPF007 Restrictor air massflow

LIITE 4: HPF007 Engine development

LIITE 5: Bensiinien tuotetiedot

Liite 1:

FORMULA SAE 2007 FUELS

Sunoco is again supporting the Formula SAE events in the USA by supplying the fuels for both the Formula SAE (Michigan) and Formula SAE West (California) events.

The fuels will come from the same batches and will have the following specifications;

“94 Octane”

- The (R+M)/2 will be 93.
- The Research Octane Number (ROM) will be 97-98.
- This fuel will be commercially available Sunoco Ultra 93 from a Philadelphia area refinery.
- It will be reformulated gasoline (RFG).
- It will contain 9-10% ethanol by volume.
- It will be similar in characteristics to the “94 Octane” fuel provided for the 2006 events.

“100 Octane”

- The (R+M)/2 will be 100.
- The RON will be 105
- It will be Sunoco 260 GT unleaded race fuel.
- This fuel will be supplied from Sunoco’s Pennsylvania pilot plant.
- It will be reformulated gasoline (RFG).
- It will contain 9-10% ethanol by volume.
- It will be similar in characteristics to the “100 Octane” fuel provided for the 2006 events.
- More information can be found at:
<http://www.sunocoinc.com/Site/Consumer/RaceFuels/UnleadedFuels/Sunoco260GT.htm>

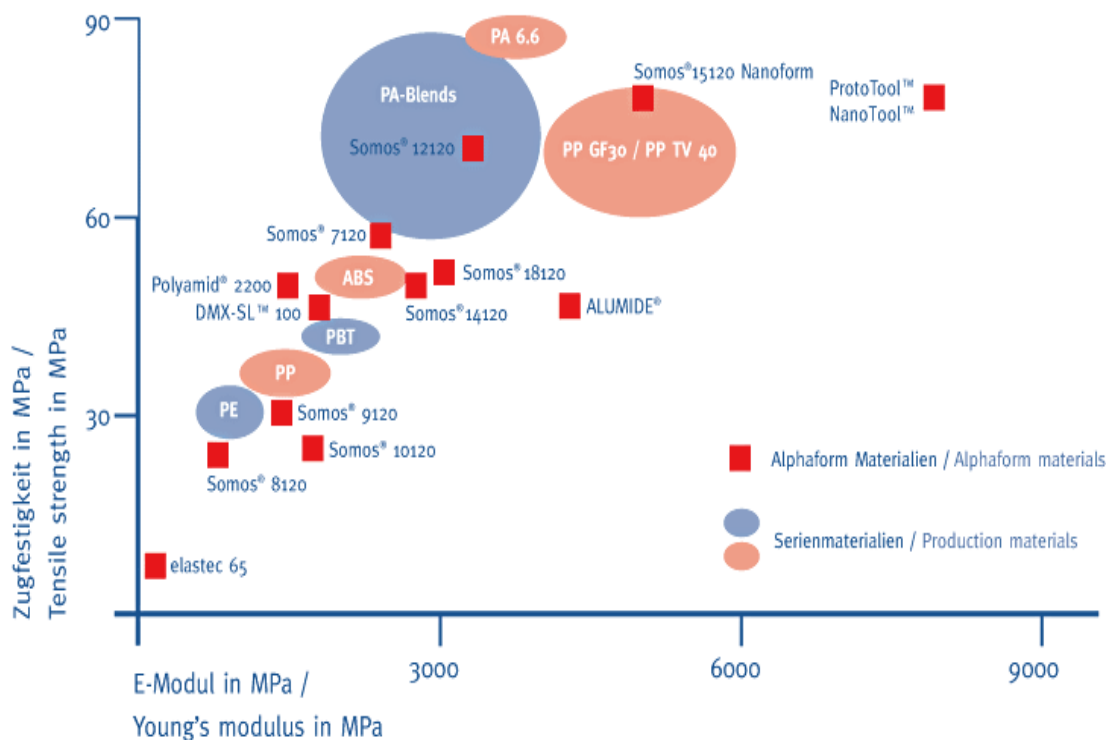
E85

- It will contain 80-82% ethanol by volume.
- This fuel will be supplied from Sunoco’s Pennsylvania pilot plant.
- The denatured ethanol is mixed with CFR40-86 “Indolene” emissions certification gasoline to make the E85.

Michael Royce,
Chairman,
FSAE Rules Committee.

13th February 2007.

Liite 2: Alphaform materials

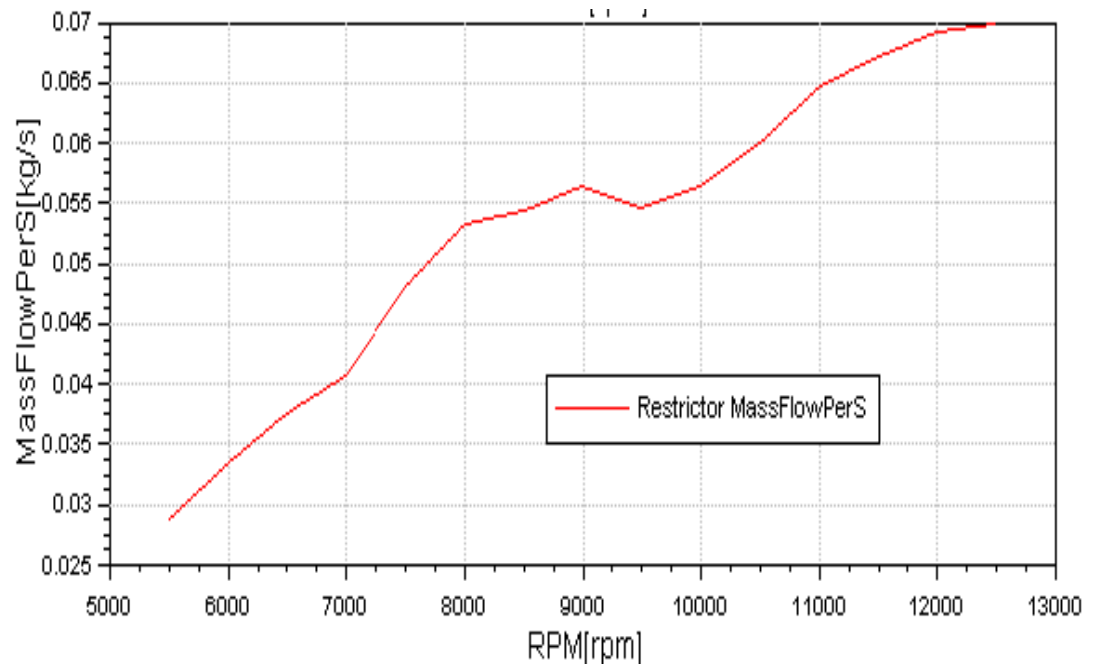


material datasheet selektive laser sintering

	Polyamid® 2200	Polyamid® 3200	ALUMIDE®	Windform XT®
material	PA 12	PA 12 glas-ball-filled	PA 12 aluminium-filled	PA 12 carbon-ball-filled
density laser sintering *	0.9-0.95 g/cm³	1.2-1.3 g/cm³	1.36 g/cm³	1.101 g/cm³
tensile modulus (DIN 53457)*	1.500 N/mm²	3.500 N/mm²	3.800 N/mm²	7.320 N/mm²
tensile strength*	50 N/mm²	47 N/mm²	46 N/mm²	78 N/mm²
elongation at break *	15 %	4 %	3,5 %	-
shore hardness *	D 80	-	D 76	-
temperature resistance *	140 °C	140 °C	177 °C	175 °C
tolerance	+/- 0.25mm; +/- 0.15%	+/- 0.25mm; +/- 0.15%	+/- 0.25mm; +/- 0.15%	+/- 0.25mm; +/- 0.15%
comment	very good surface by rework finish and lacquer finish possible.	very good surface by rework finish and lacquer finish possible.	excellent size-accuracy, high rigidity and metallic look, good surface by rework finish and lacquer finish possible.	excellent surface finish, high rigidity very high detail construction

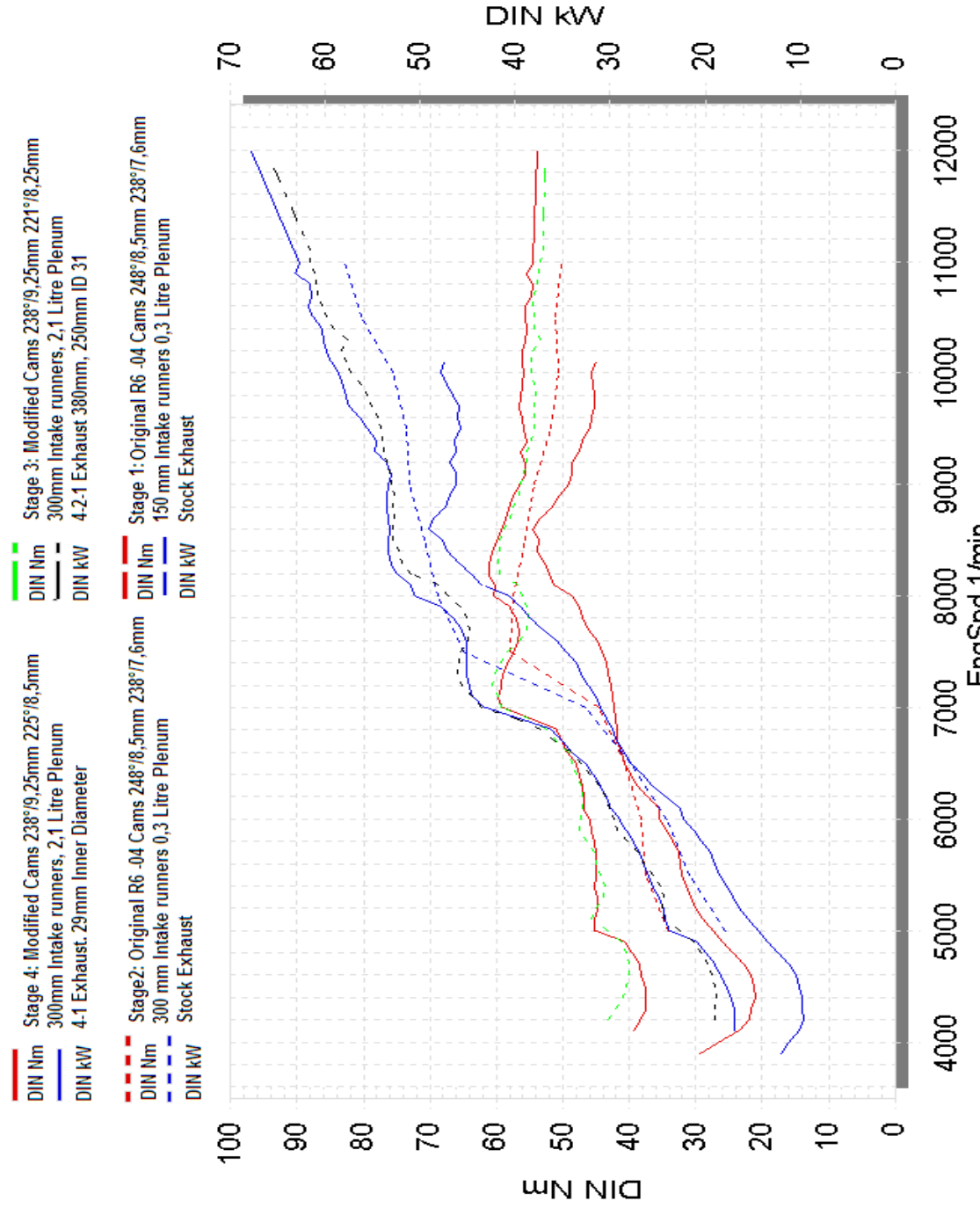
* manufacturer information
updated 9/2006

Liite 3: HPF007 Restrictor air massflow



Liite 4:

HPF007 Engine Development



Liite 5: Bensiinien tuotetiedot

FUTURA 98	Yksikkö Enhet Unit	Laturaja Kvalitetskrav Specification		Tyypillinen arvo Typvärde Typical analysis	Määritysmenetelmä Testmetod Test method
		min.	max.		
Olefiinipitoisuus Olefinhalt Olefin content	til-% vol.-% % v/v		18,0	8	EN 14517 ISO 3837 D 6293
Bentseeni Bensenhalt Benzene content	til-% vol.-% % v/v		1,00	0,6	EN 14517 EN 238 D 6293
Happipitoisuus Syre Oxygen	p-% mass-% % m/m	2,0	2,7	2,3	EN 14517 EN 1601 D 6293 NM 118, NM 40
Etanoli Etanolhalt Ethanol content	til-% vol.-% % v/v		5,0		EN 14517 EN 1601 D 6293 NM 118, NM 40
Eetterit väh. 5 hiiliatomia Eter min. 5 kolatomer Ethers min. 5 carbon atoms	til-% vol.-% % v/v		15,0	13	EN 14517 EN 1601 D 6293 NM 118, NM 40
Väri ja ulkonäkö Färg och utseende Appearance		Kirkas, ei kiinteitä epäpuhtauksia Klar, en synbara föroreningar Clear and bright			ASTM D 4176-1

TUOTETIETO PRODUKTDATA PRODUCT DATA SHEET



Shell V-Power-bensiini Shell V-Power-bensin Shell V-Power-gasoline

		Menetelmä Metod Method	Laturaja Kvalitetskrav Specification	Tyypillinen arvo Typvärde Typical analysis
Aromaattipitoisuus Aromathalt Aromatic content	til-% vol-% % v/v	ASTM D 1319	≤ 35	< 34
Olefiinipitoisuus Olefinhalt Olefin content	til-% vol-% % v/v	ASTM D 1319	≤ 18	< 10
Rikki Svavelhalt Sulphur content	mg/kg	ASTM D 5453	≤ 10	6
Happipitoisuus Syrehalt Oxygen content	m-% mass-% % m/m	EN 1601	2,0 – 2,7	< 2,6
Etanoli Etanolhalt Ethanol content	til-% vol-% % v/v	EN 1601	≤ 0,5	< 0,1
Eetterit väh. 5 hiiliatomia Eter min. 5 kolatomer Ethers min. 5 carbon atoms	til-% vol-% % v/v	EN 1601	≤ 15	14