



TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN TOIMIALA

Auto- ja kuljetustekniikka

Tuotetekniikka

INSINÖÖRITYÖ

**FORMULA STUDENT
-KILPA-AUTON MOOTTORIN KITKATUTKIMUS**

**Työn tekijä: Mikko Ahola
Työn ohjaaja: Heikki Parviainen**

Työ hyväksytty: __. __. 2008

**Heikki Parviainen
Lehtori**

ALKULAUSE

Tämä on kuudes Formula Student -kilpa-auton moottoria käsittelevä insinööri työ, mutta ensimmäinen, joka keskittyy ainoastaan moottorissa esiintyvien kitkavoimien aiheuttamien häviöiden tutkimiseen. Koska työ keskittyy melko kapeaan alueeseen Formula Student -kilpa-auton moottorissa, on suositeltavaa tutustua myös aikaisempiin, Mikko Ojasen, Mikko Yrjösen, Marko Törrösen, Erno Mäen sekä Ville Ahosen tekemiin insinööritöihin.

Insinööri työn tavoitteena oli tutkia Helsingin ammattikorkeakoulun, nykyisen Metropolia Ammattikorkeakoulun seitsemännen Formula Student -kilpa-auton Yamaha R6 -moottorin kitkahäviöitä. Mittavälineiden puuttumisesta ja huonosta saatavuudesta johtuen tutkimus päätettiin toteuttaa mahdollisimman edullisilla ja varastosta löytyvillä sekä omavalmisteisilla välineillä. Tästä johtuen tavoitteeksi otettiin myös mitata pelkän venttiilikoneiston häviöitä. Tutkimusta varten päätettiin rakentaa omavalmisteinen testipenkki venttiilikoneistolle. Myös kitkahäviöiden pienentämistä kitkaa vähentävällä pinnoitteella päätettiin tutkia.

Haluan kiittää työn valvojaa ja ohjaajaa Heikki Parviaista, Formula Student -projektin johtajaa Matti Parpolaa sekä kaikkia Helsinki Polytechnic Formula Engineering Teamin jäseniä, jotka ovat mahdollistaneet projektin.

E erityisen kiitoksen ansaitsevat Audi Finland, Mobil 1 sekä Henry Fordin Säätiö, jotka rahallisilla panostuksillaan ovat mahdollistaneet Formula Student -projektin jatkumisen sekä tämän insinööri työn tutkimuksen. Erityiskiitos myös DiArc Technologies -yritykselle, joka toimitti testattavat pinnoitteet tutkimukseen.

Helsingissä 28. marraskuuta 2008

Mikko Ahola

TEKNIKAN JA LIIKENTEEN TOIMIALA

INSINÖÖRITYÖN TIIVISTELMÄ

Tekijä: Mikko Ahola	
Työn nimi: Formula Student -kilpa-auton moottorin kitkatutkimus	
Päivämäärä: 28.11.2008	Sivumäärä: 38 s. + 18 liitettä
Koulutusohjelma: Auto- ja kuljetustekniikka	Suuntautumisvaihtoehto: Tuotetekniikka
Työn ohjaaja: DI Heikki Parviainen	
<p>Tämän insinööriyön tarkoituksena oli tutkia Helsingin ammattikorkeakoulun, nykyisen Metropolia Ammattikorkeakoulun uuden Formula Student -luokan kilpa-auton HPF008:n moottorin kitkahäviöitä sekä pienentää niitä. Tavoitteena oli kartoittaa moottorissa esiintyvät häviöt ja mitata niiden suuruudet. Myös kitkaa vähentävän DiArc-timanttipinnoitteen mahdollisia hyötyjä tutkittiin.</p> <p>Tutkimuksen toteuttaminen aloitettiin jo vuoden 2007 kilpa-autoon, jonka moottoriin pinnoitettiin testierä osia timanttipinnoitteella. Lisäksi kitkahäviöiden merkitystä tutkittiin laskemalla ja moottorin simulointiohjelman avulla. Moottorissa esiintyvät häviöt alkoivat kiinnostaa enemmän juuri kaudella 2007, kun siirryttiin turboahdetusta moottorista vapaasti hengittävään. Tällöin moottorin mekaaninen hyötysuhde on erityisen tärkeää saada mahdollisimman pieneksi, jotta moottorista saadaan riittävästi tehoa.</p> <p>Polttomoottorin häviöistä ei ole tehty aikaisempia, erillistä insinööritöitä, eikä niitä ole kovin syvästi käsitelty muissakaan, yleisesti moottoria käsittelevissä töissä. Erilaisten häviöiden tunnistaminen ja mittaaminen on tärkeää, jotta tiedetään mihin osa-alueeseen parannustyöt kannattaa keskittää. Myös moottorin simulointiin tarvitaan lähtöarvoiksi tietoa moottorin mekaanisista ominaisuuksista.</p> <p>Tutkimuksen tuloksena tutkitun moottorin venttiilikoneiston tehohäviöt saatiin kartoitettua melko tarkasti ja eri osien vaikutus saatiin arvioitua. Myös kokonaisen, toimivan moottorin mittaamiseen saatiin selkeyttä ja hyviä neuvoja tulevaisuutta ajatellen, vaikka mitään varsinaisia tuloksia ei onnistuttu mittaamaan. Timanttipinnoitteita testattaessa saavutettiin lähes 10 prosenttia pienemmät häviöt venttiilikoneistossa vakio-osien verrattuna.</p> <p>Tämän insinööriyön käsittelemän tutkimuksen suurin puute on sylinterin painemittauksen puuttuminen. Mittausta ei pystytty toteuttamaan, koska tarvittavat välineet puuttuivat, eikä niitä saatu korkeasta hankintahinnasta johtuen hankittua.</p>	
Avainsanat: Formula Student, moottori, kitka, timanttipinnoite, Morse-testi	

HELSINKI POLYTECHNIC / TECHNOLOGY

ABSTRACT

Author: Mikko Ahola	
Title: Engine Friction Research for Formula Student Race car	
Date: 28 st November 2008	Number of Pages: 38 + 18 appendices
Department: Automotive Engineering	Study Programme: Automotive Design Engineering
Instructor: Heikki Parviainen, M.Sc.	
<p>The objective of this Bachelor's thesis was to research and minimize the frictional losses of the new engine of the Formula Student race car made by the Helsinki Polytechnic Engineering Team. The goal was to find where the losses come in the engine and measure their magnitude. Also friction lowering DiArc diamond coating was researched</p> <p>The design was already started for the year 2007 car in the form of durability test of the diamond coatings. The frictional losses were also analysed by calculating and by means of engine simulations. The mechanical efficiency of an engine was realized to be a very important matter after switching from turbocharged engine to a naturally aspirated one in 2007 season.</p> <p>There are no previous studies of losses in combustion engine and the matter has not been studied deeply enough in other thesis works that deal with combustion engines. Locating and measuring the losses is very important before starting to plan actions to lowering the losses. Measured data acts also as a starting line for engine simulations</p> <p>The research for this thesis provides quite accurate information about the power lost in operating the moving valvetrain parts of the Yamaha R6 engine. Also good guidelines for measuring complete internal combustion engine were provided for future testing. When testing the diamond coating it was found to provide up to almost 10 percent smaller losses at valvetrain.</p> <p>The research described in this thesis lacks one main aspect of the internal analysis of an engine. That is the in-cylinder pressure measurement. It couldn't be carried out because of the lack of equipment needed and because of their high price.</p>	
Key Words: Formula Student, engine, friction, diamond coating, Morse-test	

SISÄLLYS

ALKULAUSE

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

SISÄLLYS

1 JOHDANTO	1
2 LÄHTÖKOHDAT	3
2.1 Tavoitteet	3
2.2 Tutkimukseen käytettävät menetelmä	3
2.2.1 Käyvälle moottorille suoritettavat mittaukset	3
2.2.2 Irtonaisille osille suoritettavat mittaukset	4
2.3 Aikaisemmat havainnot	5
3 SUUNNITELMA TUTKIMUKSEN TOTEUTTAMISEKSI	7
4 KITKAHÄVIÖT TEORIASSA	8
4.1 Kitkan perusteet	8
4.2 Tehohäviöt polttomoottorissa	9
4.3 Häviöiden määrittäminen	9
5 MITTAUSMENETELMÄT	12
5.1 Komponenttitestit	12
5.1.1 Omavalmisteinen testipenkki	12
5.1.2 Yleisimmät testausmenetelmät	13
5.2 Käyvän moottorin testaus	18
5.2.1 Tehonmittaus	18
5.2.2 Morse-testi	19
5.2.3 Sylinterinpainemittaus	20

6 MOOTTORIN SISÄISET MUUTOKSET	23
6.1 Venttiilikoneisto	23
6.2 Kampikoneisto	23
6.3 Vaihteisto	24
7 KITKAA VÄHENTÄVÄT PINNOITTEET	28
7.1 Erilaiset pinnoitteet	28
7.2 DiArc-timanttipinnoite	29
8 TULOKSET	31
8.1 Morse-testi	31
8.2 Venttiilikoneiston testaus	31
8.2.1 Nokan vaikutus	32
8.2.2 Öljynpaineen vaikutus	33
8.2.3 Pinnoitteen vaikutus	33
9 YHTEENVETO	36
VIITELUETTELO	38
LIITTEET	
Liitteet 1 -18	Mittauspöytäkirjat
Liite 19	Teknisiä tietoja moottorista

1 JOHDANTO

Tässä insinööriyössä käsitellään HPF008-kilpa-auton moottorin rakentamisen yhteydessä suoritettua kitkatutkimusta ja menetelmiä, joilla moottorin sisäistä kitkaa on pienennetty. HPF008 on seitsemäs Helsingin ammattikorkeakoulussa rakennettava Formula Student -luokan kilpa-auto. Aikaisemmista, turboahdetuista autoista HPF002, HPF002/2, HPF004, HPF005 ja HPF006 sekä vapaasti hengittävästä HPF007 –kilpa-autosta on kaikista tehty insinööriyöt /1; 2; 3; 4/. Tämä työ käsittelee muista töistä poiketen vain kapeaa osa-aluetta moottorista. Vapaasti hengittävän moottorin peruskonseptia käsitellään Ville Ahosen /5/ tekemässä insinööriyössä.

Formula Student- ja Formula SAE ovat korkeakouluille ja yliopistoille suunnattuja kansainvälisiä kilpaluokkia, joissa opiskelijat suunnittelevat, rakentavat ja kilpailevat itse tehdyillä autoilla. Vuodessa käydään useita kilpailuja ympäri maailmaa. Helsingin ammattikorkeakoulun, nykyisen Metropolia Ammattikorkeakoulun tiimin kilpailukalenteriin kuuluvat maailman pääkilpailu USA:ssa, Euroopan kilpailut Englannissa ja Saksassa, sekä pohjoismaiden kilpailu, jonka järjestäjää vaihtelee. Kilpailuissa arvostellaan paitsi nopeus radalla, myös autossa käytetyt tekniset ratkaisut ja auton valmistettavuus /6/.

Aikaisempina vuosina oppilaitoksemme on saavuttanut hyviä sijoja. Paras sijoitus on tähän mennessä saavutettu Saksan kilpailussa, Hockenheimin radalla vuonna 2006, jolloin tiimi saavutti kunnioitettavan toisen sijan. Saksassa tiimi ylsi myös kilpailun design-osuuden voittoon, joka kertoo auton suunnittelun onnistuneen myös erittäin hyvin. Yksi arvostetuimmista saavutuksista on myös vuodelta 2006 USA:n kisasta, jossa loppusijoitus oli viides sivuten parhaan eurooppalaisen tiimin saavuttamaa sijoitusta kautta kilpailun historian.

Aikaisemmat moottorit ovat olleet turboahdettuina eräitä sarjan tehokkaimpia. Erittäin tehokkaan moottorin haittapuolina ovat suuri polttoaineenkulutus, huono ajettavuus ja sarjan mutkaisille radoille jopa liian suuri teho. Tähän haettiin ratkaisua vuoden 2006 lopulla, jolloin aloitettiin ensimmäisen vapaasti hengittävällä moottorilla varustetun auton suunnittelu. Myös turboahdtimeen ja sen vaatimien komponenttien poistamisesta johtuva painon pieneminen oli yksi syy ahtamisesta luopumiseen.

HPF008-kilpa-auton (kuva 1) moottori pohjautuu peruskonseptiltaan HPF007-kilpa-autossa käytettyyn moottoriin, joka ensimmäisenä vapaasti hengittävänä moottorina oli vain pintaraapaisu siitä, mihin uudella moottorikonseptilla pystytään. Vaikka moottorin tuottama suurin vääntömomentti putosi lähes puoleen vuotta aiemmasta, radalla päästiin silti ennätysvauhtia. Auton ajettavuus ja erityisesti moottorin tehon hallittavuus parani huomattavasti edeltäjiinsä verrattuna. Tästä kertoo osaltaan Ruotsissa järjestetyn Baltic Open -kilpailun ylivoimainen voitto.



Kuva 1. HPF008-kilpa-auto

2 LÄHTÖKOHDAT

2.1 Tavoitteet

Insinööriyön tavoitteena oli tutkia, missä Formula Student -kilpa-auton voimalaitteena käytetyn Yamaha R6 -moottoripyörän moottorin kitkahäviöt syntyvät ja mitata niiden suuruus. Timanttipinnoitteita valmistavan DiArc Technologies -yrityksen kanssa solmitun yhteistyösopimuksen myötä tavoitteeksi asetettiin myös venttiili- ja kampikoneiston kitkahäviöiden pienentäminen osien pinnoituksen avulla. Esiselvitysvaiheessa ilmenneen mittavälineiden saatavuusongelman myötä päätettiin myös rakentaa venttiilikoneistolle oma testipenkki, joka mahdollistaa pelkän venttiilikoneiston tutkimisen laboratorio-olosuhteissa. Myöhemmässä vaiheessa tutkimusta kahdeksi päätavoitteeksi asetettiin selvittää moottorin kokonaiskitkahäviöiden suuntaa antava arvo sekä selvittää venttiilikoneiston ja sen osien aiheuttamat häviöt. Tavoitteiden täytyminen arvioidaan pääasiassa omavalmisteisella testipenkillä saavutettujen tuloksien avulla.

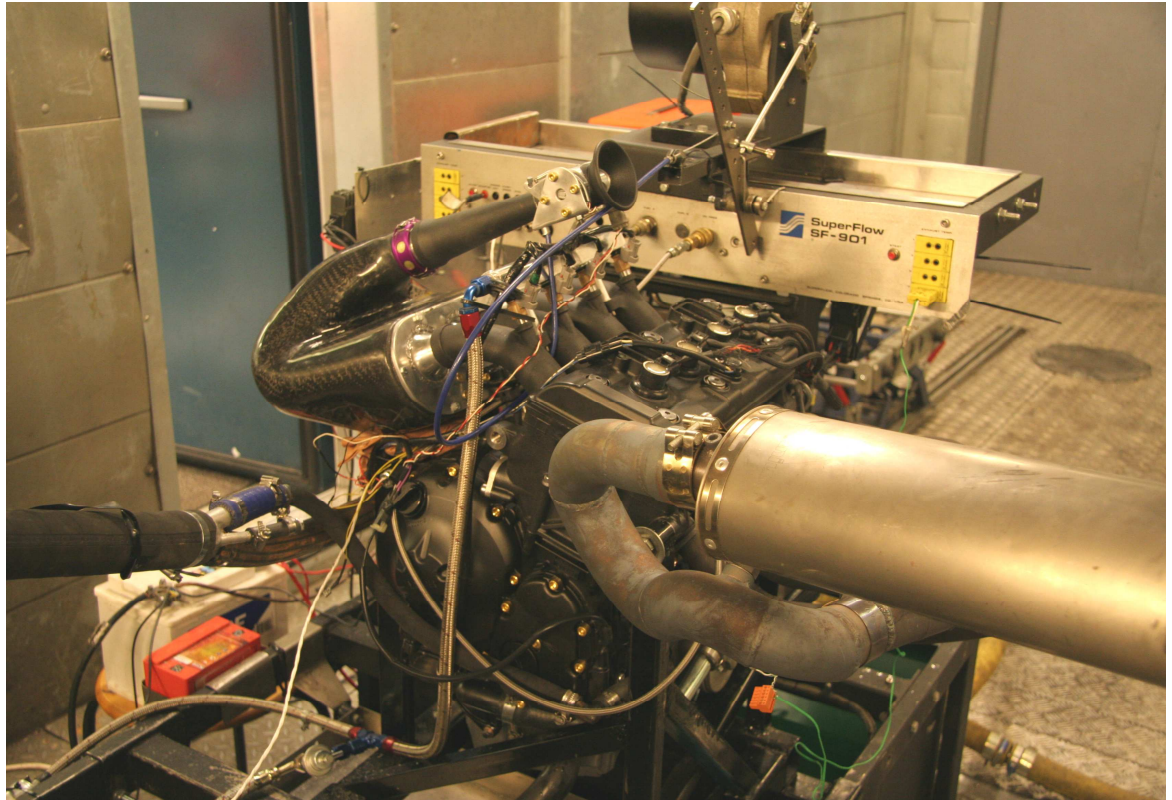
2.2 Tutkimukseen käytettävät menetelmät

Erillisten osien ja materiaalien välisen kitkan tutkimiseen on olemassa lukematon määrä erilaisia menetelmiä. Tämän insinööriyön tarkoitus on toimia tietolähteenä tuleville Helsinki Polytechnic Formula Engineering Teamin jäsenille siitä, millaisia mittauksia oppilaitokselta löytyvillä välineillä on mahdollisuus tehdä. Tästä johtuen tutkimuksessa keskityttiin melko kapeaan alaan kitkan tutkimisessa. Tutkimuksissa käytetyt menetelmät voidaan jakaa kahteen ryhmään, jotka ovat käyvälle moottorille suoritettavat mittaukset ja irtonaisille osille suoritettavat mittaukset.

2.2.1 Käyvälle moottorille suoritettavat mittaukset

Käyvää moottoria mitattaessa käytetään mittausmenetelmästä yleensä nimitystä "fired engine method". Tällöin tutkimuksen edellytyksenä on siis käyntikuntoinen, täydellinen moottori. Yleensä tällaiset mittaukset perustuvat joko painemittaukseen tai väännön ja tehon mittaukseen. Näissä testeissä ongelmia tuottavat yleensä herkille antureille sopimattomat käyttöympäristöt sekä olosuhteiden nopea muuttuminen, mikäli tilat ja laitteet eivät ole ajan tasalla.

Tutkimuksessa kokonaiselle moottorille tehdyissä mittauksissa käytettiin apuna SuperFlow SF-901 -moottoridynamometriä (kuva 2). Dynamometrissä suoritettiin moottorin säätämisen ja testaamisen lisäksi tehonmittauksia sekä Morse-testillä toteutettu kitka- ja pumppaushäviöiden mittausta.



Kuva 2. Yamaha R6 -moottori kytkettynä SuperFlow SF-901 -moottoridynamometriin

2.2.2 Irtonaisille osille suoritettavat mittaukset

Irtonaisille osille suoritettavat mittaukset tehdään yleensä laboratorio-olosuhteissa, jolloin voidaan eliminoida ympäristön vaikutus tuloksista. Useimmiten testattavat osat eivät kuitenkaan ole varsinaisia käytettäviä komponentteja, vaan esimerkiksi testipaloja. Tällöin voidaan helposti mitata esimerkiksi eri materiaalien välistä kitkaa ja vertailla tuloksia luotettavasti, mutta tulokset eivät välttämättä kerro, kuinka materiaalin vaihto varsinaisen osan oikeassa toimintaympäristössä vaikuttaa. Lähes kaikilla häviöitä tutkivilla tahoilla on omat menetelmänsä testata osiaan tai materiaalejaan, jolloin he saavat juuri heitä kiinnostavia tuloksia. Nämä testit ovat yleensä hyvin kapea-alaisia, eivätkä vastaa ympäristöltään läheskään esimerkiksi polttomoottorin sisällä vallitsevia olosuhteita.

Tässä tutkimuksessa ei varsinaisesti käytetä yksittäisiä osia vaan täydellisestä moottorista pienempiä osakokonaisuuksia. Tämä johtuu pääasiassa siitä, että pinnoitettaviksi valitut osat eli venttiilinnostinkupit eivät sovi mihinkään olemassa olevaan testilaitteeseen. Pinnoitteiden testaaminen testipaloissa hylättiin myös, koska pinnoitettavan moottorin osan materiaalista ja sen käsittelyistä ei ollut riittävästi tietoa saatavilla. Lisäksi yksi pinnoitteen valmistajan kiinnostuksen kohteista oli testata osia niiden omissa ympäristöissään, jolloin esimerkiksi värinöistä johtuvat pinnoitteen vaurioitumiset voitaisiin havaita ennen pinnoitettujen osien käyttöönottoa.

2.3 Aikaisemmat havainnot

Formula Student -autot ovat todella pieniä, joten moottorin tulee olla myös pieni ja ennen kaikkea kevyt. Kilpailuratojen mutkaisuudesta johtuen moottorin pitää olla käytökseltään helposti hallittava, eli vääntökäyrän tulee olla mahdollisimman tasainen ja laaja. Moottorin tulee myös vastata kaasuun herkästi ja nopeasti. Kilpailussa annetaan pisteitä ja myös sakkoja polttoaineen kulutuksesta, joten pieni kulutus on myös tärkeää. Tästä johtuen moottoria ei esimerkiksi kannata jäähdyttää ylikkaalla seoksella. Vaikka kyseessä on kilpamoottori, on luotettavuus tärkeä tekijä koska testiaikaa on vähän ja budjetti pieni, ei niitä kumpaakaan ole varaa tuhjata moottoriremontteihin.

HPF007-kilpa-autossa käytettiin samaa, vuoden 2004 mallin Yamaha R6 -moottoria kuin HPF006-kilpa-autossa. Koko kilpakauden 2007 ajan moottorissa käytettiin DiArc-timanttipinnoitettuja venttiilinnostimia. Kauden aikana tutkittiin, kuinka hyvin pinnoite kestää suurilla kierrosnopeuksilla käyvän moottorin aiheuttamat rasitukset. Moottoridynamometrissä havaittiin jonkinlainen mekaanisten äänien pieneminen pinnoitettujen osien asennuksen jälkeen, mutta mitään mittauksia ei suoritettu, koska osien asennuksen tarkoituksena oli vain testata pinnoitteen soveltuvuutta kyseisen materiaalin pinnoitukseen. Myöhemmin kauden aikana moottoria purettaessa havaittiin, että lähes kaikista 16 nostajasta pinnoite oli alkanut lohkeilla ja muutamasta kupista pinnoite oli kadonnut koko laelta (kuva 3). Pinnoitteen irtoamiselle löydettiin useita mahdollisia syitä. Ensinnäkin pinnoitus suoritettiin käytettyihin nostajiin, jolloin pintaan on voinut jäädä epäpuhtauksia. Pinnoite ei myöskään kestä hyvin joustavalla alustalla, koska tällöin pinnoitettu pinta ja pinnoite pääsevät liikkumaan toisiinsa nähden ja koko pinnoite voi irrota. Venttiilinnostajan yläpinta on todella ohut ja se joustaa varmasti jonkin verran moottorin käydessä suurilla kierrosnopeuksilla.



Kuva 3. HPF007-autossa testatut, pinnoitetut venttiilinnostimet, joissa pinnoite on vaurioitunut käytössä

Myös kampikoneiston puolella ilmeni ongelmia. Englannin kisassa moottorissa ilmeni voiteluhäiriö, joka johti kolmannen ja neljännen sylinterin kiertokangen alapään laakeroinnin tuhoutumiseen (kuva 4). Syyksi todettiin liian alhainen öljyntaso sekä huono öljyn loiskumisen estävien levyjen toiminta öljypohjassa. Tähän ongelmaan ei voitu puuttua tutkimuksen puitteissa, koska laakereiden rakenteen vuoksi niiden kiinnileikkautumista ei voida estää erillisellä pinnoitteella.



Kuva 4. 2007 Englannin kisassa sattuneesta voiteluhäiriöstä johtuvat vauriot. Kolmannen sylinterin kiertokanki ja kampiakselin laakeripinta selvästi tummuneet

3 SUUNNITELMA TUTKIMUKSEN TOTEUTTAMISEEN

Tutkimus oli jo kestotestin muodossa aloitettu kauden 2007 kilpa-autolla, joten päätettiin, että jatkotutkimukset tehdään myös oikeilla moottorin osilla. Kaudelle 2008 moottoriksi valittiin uusi 2008, vuosimallin Yamaha R6 -moottori ja varamoottorina toimii vuoden 2007 vastaava. Uusien moottorien saatavuusongelman takia uuden moottorin kannen käyttäminen ei kuitenkaan ollut mahdollista. Tästä syystä kitkatutkimus päätettiin tehdä vuosimallin 2001 moottorin kannella, koska kyseinen kansi löytyi varastosta. Kansi on perusrakenteeltaan samanlainen kuin uudemmat. Pinnoitetut venttiilikupit sopivat myös vanhaan kanteen. Ainoat erot löytyvät venttiilin koosta, materiaalista sekä nokka-akselin laakeroinnista. Erojen arvioitiin kuitenkin olevan merkityksettömän pieniä mitattaviin voimiin verrattuna.

Tutkimuksessa käytetty testipenkki päätettiin valmistaa itse ja se toteutettiin pääsääntöisesti kesän 2008 aikana. Rajoitetun budjetin takia kaikki testipenkkiin käytettävät materiaalit valittiin jo varastosta löytyvistä tuotteista. Tarvittavat koneistukset päätettiin teettää oppilaitoksen koneosastolla kulujen rajoittamiseksi. Testipenkissä käytetyt sähkömoottorit olivat käytöstä poistettuja, pois heitettäviä laitteita. Tutkimuksessa käytettävät pinnoitteet puolestaan tarjosi niitä valmistava DiArc Technologies -niminen yritys. Pinnoitteita piti ensin testata vain kahta erilaista, mutta tutkimuksen edetessä myös DiArcin tuotekehitys eteni ja tutkimuksen loppuvaiheille saatiin vielä kaksi erilaista pinnoitetta testattavaksi.

Kokonaiselle moottorille tehtävät mittaukset päätettiin tehdä moottorin säätö- ja kehitystyön yhteydessä vuoden 2007 lopulla, jolloin moottori olisi kiinni moottoridynamometrissä. Tavoitteena oli testata Morse-testiä käytännössä sekä kokeilla, saadaanko kitkaa vähentävällä pinnoitteella tuloksia tehonmittauksen avulla.

4 KITKAHÄVIÖT TEORIASSA

Tässä luvussa käsitellään kitkavoiman syntymistä ja esiintymistä sekä tarkastellaan erilaisia polttomoottorissa esiintyviä häviöitä sekä niiden määrittämistä. Koko polttomoottoria ja erilaisia häviöitä käsitellään kuitenkin hyvin pintapuolisesti, koska tämän tutkimuksen puitteissa oli mahdollista perehtyä syvällisemmin vain venttiilikoneiston osuuteen moottorin häviöistä.

4.1 Kitkan perusteet

Kitkalle on määritetty kokeellisesti kaksi peruslakia. Ensimmäinen laki on, että kitkavoima on suoraan verrannollinen kitkapintaan kohtisuoraan vaikuttavaan voimaan. Toinen laki on, että kitkapintojen pinta-ala ei vaikuta kitkavoimaan. Kun kitka vaikuttaa, muuttuu teho liukuvien pintojen välissä lämmöksi.

Edellä esitetyt perusasiat totesi tiettävästi ensimmäisen kerran Leonardo da Vinci jo 1400- ja 1500-lukujen vaihteessa. Kitkaa vähentävän pinnan, kuten öljyn, lisäämistä tutki ensimmäisen kerran menestyksekkäästi Sir William Hardy. Hänen tutkimuksiensa tuloksia pidetäänkin kitkavoimien nykyisen käsittelytavan aloittajina. Nykyisin pelkkää kitkaa tutkitaan hyvin harvoin. Yleensä tutkitaan kokonaisuutta, joka käsittää kitkan lisäksi myös kulumisen ja muut siihen liittyvät ilmiöt. Tätä kokonaisuutta kutsutaan tribologiaksi. /7, s. 1–5./

Tribologia on tieteenala, joka tutkii kosketuksessa olevien materiaalien kitkaan, kulumiseen ja voiteluun liittyviä ilmiöitä. Tutkimuksista saatua tietoa hyödynnetään materiaalien, voiteluaineiden sekä koneen osien suunnittelussa, kun tavoitellaan parempaa kulutuskestävyyttä, luotettavuutta sekä pienempää energian kulutusta. Tribologisia ilmiöitä, kuten kitkaporin, väliaineen ja ympäristön vaikutuksia toisiinsa on mahdotonta laskea tai simuloida. Tässä työssä paneudutaan tribologian osalta vain kitkaan ja voiteluun, koska osien kulumisen ei tässä tapauksessa ole varsinainen ongelma eikä osia suunnitella uudelleen vaan parannellaan jo olemassa olevia konstruktioita. /8, s. 369–373./

Kitkaa voidaan helposti vähentää tasoittamalla kosketuspintoja. Pinnankarheus onkin yksi eniten kitkaan vaikuttavista asioista. Myös materiaalien valinnalla voidaan vaikuttaa kitkan suuruuteen. Moottoreissa esimerkiksi laakeriliuskat on valmistettu pehmeästä aineesta, joka siirtyy mahdollisiin liukupinnan epätasaisuuksiin, kun laakeri on uusi. Tällöin liukupinnasta tulee tasaisempi ja kitka pienenee. Tämän takia täysin uusilla osilla koottu moottori pyörii yleensä vaikeammin, kuin käytetty.

4.2 Tehohäviöt polttomoottorissa

Moottorissa esiintyy useita erilaisia kitkailmiöitä. Eri kitkatyypit jaotellaan kosketustavan sekä pintojen välisen liikkeen mukaan. Näissä ryhmissä puolestaan on lukuisia eri alalajeja kitkalle. Kosketustavan mukaan päälajeja on kolme. Ne ovat kaasu, neste ja kuivakitka. Pintojen välisen liikkeen mukaan lajitellut kitkatyypit ovat puolestaan lepo- ja liukukitka. Yleensä kuitenkin puhtaasti johonkin lajiin kuuluvaa tilannetta ei ole, vaan kitkatilanne on aina yhdistelmä kaikista.

Korkeavirtteisessä polttomoottorissa myös massavoimien hitaudet pyritään minimoimaan, koska ne vaikuttavat suoraan kiihtyvyyteen. Suuret massat kiihtyvät hitaasti, mutta kun ne on saatu vauhtiin aiheuttavat massanhitaudet ilmiön, jossa moottori kykenee säilyttämään kierrosnopeutensa hyvin. Puhekielessä moottoria kuvataan tällöin hyvin vääntäväksi. Tämän takia normaaliin tieliikenteeseen tarkoitetuissa autoissa käytetään suhteellisen painavia vauhtipyöriä. Suuret massat myös helpottavat liikkeellelähtöä, koska suurien, liikkuvien massojen energia voidaan käyttää ajoneuvon massan liikuttamiseen.

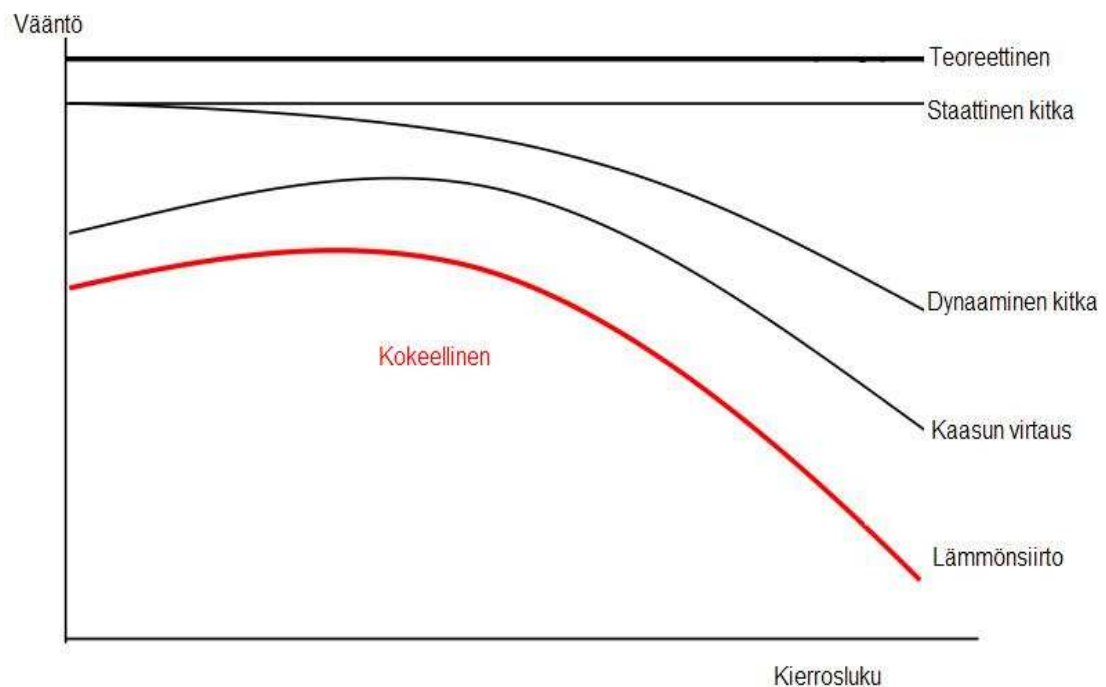
Tämän lisäksi häviöitä aiheuttavat muun muassa venttiilinjouset sekä öljy- ja vesipumput ja muut apulaitteet. Yleensä moottorin kitkaominaisuuksia tutkittaessa kaikki mahdolliset apulaitteet poistetaan, jotta voidaan luotettavasti erotella mistä mikäkin häviö aiheutuu.

4.3 Häviöiden määrittäminen

Erilaisten häviöiden määrittämiseksi on olemassa lukematon määrä erilaisia menetelmiä. Häviöiden mittaamista suunniteltaessa kannattaa aina miettiä minkä suuruusluokan voimista on kyse. Esimerkiksi vesipumpun viemä teho voi olla kaksi hevosvoimaa, kun taas koko moottorista mitatut tehohäviöt voivat olla 20 hevosvoimaa. Tällöin mittalaitteille asetetaan jo aivan erilaisia vaatimuksia esimerkiksi rakenteen ja

tarkkuuden osalta. Mittauksien kannalta tärkeää on, että eliminoidaan mahdollisimman paljon häiritseviä tekijöitä pois mittauksesta. Esimerkiksi moottoridynamometrissä toimittaessa korvataan usein moottorin omia apulaitteita ulkoisilla vastaavilla. Tällöin häviöiden määrä pienenee ja mitattavan suureen eli vääntömomentin osuus kasvaa.

Moottorin häviöitä voi myös yrittää määrittää laskemalla, mutta yleensä tulokset ovat hyvin epätarkkoja ja vain suuntaa antavia. Tämä johtuu siitä, että laskemalla on hyvin vaikeaa määrittää esimerkiksi lämmönjohtumisesta ja muodonmuutoksista aiheutuvia vaihteluja käyvässä moottorissa. Häviöiden määrittämistapaa valittaessa kannattaakin miettiä, mihin tuloksia käytetään.



Kuva 5. Esimerkkikäyrät moottorin teoreettisista vääntökäyristä

Kuvassa 5 esitetään nelitahtimoottorin teoreettisia vääntökäyriä. Ensimmäinen, teoreettinen käyrä, syntyy, kun moottorille lasketaan teoreettinen vääntömomentti moottorin iskutilavuuden mukaan. Tällöin oletetaan kaikkien hyötysuhteiden olevan 100 prosenttia läpi koko kierrosalueen. Tämä ei kuitenkaan todellisuudessa pidä paikkansa, vaan erilaiset häviöt pienentävät moottorista ulos saatavaa vääntömomenttia. Käyrissä alaspäin lähdettyä seuraavana on käyrä, jossa teoreettisen vääntömomentin arvoista on vähennetty moottorissa esiintyvä staattinen kitka. Se koostuu erilaisista laakeri- ja liukukitkoista sekä apulaitteista. Staattinen kitka voidaan mitata helposti esimerkiksi pyörittämällä moottoria toisella moottorilla niin, että puristusta ei tapahdu eli esimerkiksi

ilman sytytystulppia. Staattinen kitka pysyy lähes samana riippumatta moottorin kierrosluvusta.

Käyriä alaspäin mentäessä seuraavana lisätään prosessiin palotapahtuma. Kun männän päälle lisätään painetta aiheuttaa se lisää kuormaa laakereille. Tällöin myös kitkahäviöt suurenevat. Mitä useampi puristus mahtuu samaan ajanjaksoon eli mitä suurempi on moottorin kierrosluku, sitä enemmän dynaamisia kitkahäviöitä syntyy. Seuraavaksi kuvassa esitetään käyrä, jossa häviöihin lisätään kaasun virtauksen aiheuttamat häviöt. Tässä tapauksessa moottori on optimoitu vain yhdelle kierrosluvulle kaasun virtauksien kannalta. Tähän kierroslukuun vaikuttaa muun muassa venttiilien aukeamis- ja sulkeutumisajankohta sekä imu- ja pakosarjojen pituus. Alimpana on käyrä, jossa kaikkien edellisten häviöiden lisäksi otetaan huomioon lämmönsiirtyminen. Nelitahtisen bensiinimoottorin polttoaineesta saamasta energiasta vain noin 25 % voidaan hyödyntää ajoneuvon liikuttamiseen. /9/

5 MITTAUSMENETELMÄT

Tässä luvussa käsitellään erilaisia moottorien kitkahäviöiden tutkimiseen käytettyjä menetelmiä ja esitellään niitä. Menetelmät on jaettu kahteen eri pääryhmään: komponenttitestit, sekä kokonaiselle, käyvälle moottorille suoritettavat testit. Esitellyt menetelmät ovat vain muutamia poimintoja alalta. Menetelmiä on olemassa todella paljon ja hyvin erilaisiin tarkoituksiin. Tämä johtuu siitä, että lähes jokainen osa- tai pinnoitevalmistaja haluaa tehdä omat testausmenetelmät juuri heidän sovelluksiinsa ajatellen.

5.1 Komponenttitestit

Komponenteilla tarkoitetaan tässä yhteydessä yksittäisiä osia tai pienempiä osakokonaisuuksia, joiden testaaminen erikseen on yleensä helpompaa ja halvempaa kuin kokonaisen moottorin testaaminen. Myös kokonaisessa moottorissa osien ja osakokonaisuuksien määrä on niin suuri, että yksittäisen muutoksen havaitseminen kaikkien häviöitä aiheuttavien komponenttien joukosta on vaikeaa tai lähes mahdotonta. Tämän takia erilaiset komponenttitestit on otettu käyttöön ja ne ovat myös hyvin suosittuja osavalmistajien keskuudessa.

5.1.1 Yleisimmät testausmenetelmät

Yleisimpiä yksittäisten komponenttien testaamiseen käytettäviä menetelmiä ovat erilaiset pintojen välistä kitkaa tutkivat menetelmät, kuten pyöritys- ja vetokokeet. Yksi yleisimmistä kokeista on englanninkieliseltä nimeltään Pin On Disc -testi, jossa testattava kappale on tappi, jota painetaan pyörivää levyä vasten. Erilaisia variaatioita testeistä on yhtä paljon, kuin testaajiakin.

Yleensä yksittäisiä osia testattaessa tutkitaan eri materiaalien tai materiaaliparien kitkaominaisuuksia, pinnankarkeutta tai esimerkiksi öljyn vaikutusta. Muuttujina näissä testeissä käytetään kappaleiden liikuttelunopeutta, pintoihin kohdistettavaa painetta tai puhtaasti aikaa, joka kuluu siihen, että vaurio ilmenee.

5.1.2 Omavalmisteinen testipenkki

Käyvän moottorin mittauksien vaikeuden, sekä välineiden puuttumisen vuoksi päätettiin venttiilikoneistolle rakentaa tarkoitukseen sopiva testipenkki. Kaupallisten, hyvin kalliiden välineiden sijaan testipenkki päätettiin tehdä olemassa olevista osista ja mahdollisimman pitkälle tee se itse -hengessä. Testipenkin tarkoituksena oli mahdollistaa venttiilikoneistossa esiintyvien, häviöitä aiheuttavien voimien mittaaminen ja erotteleminen. Häviöitä aiheuttavia komponentteja ovat esimerkiksi venttiilijouset ja laakerikitka. Yhdeksi testattavaksi komponentiksi otettiin myös kitkaa vähentävällä pinnoitteella pinnoitetut venttiilinnostajat. Pinnoitteen testaaminen oli suurin haaste testipenkin kehittämisessä, koska esimerkiksi venttiilinjousien aiheuttamaan voimaan verrattuna kitkavoiman arvioitiin olevan paljon pienempi, jolloin muutoksen havaitseminen on hankalampaa. Muita mahdollisia testattavia ominaisuuksia ovat öljynpaineen, käyttölämpötilan sekä öljyn laadun vaikutus.



Kuva 6. Kannentestauspenkki oheislaitteineen

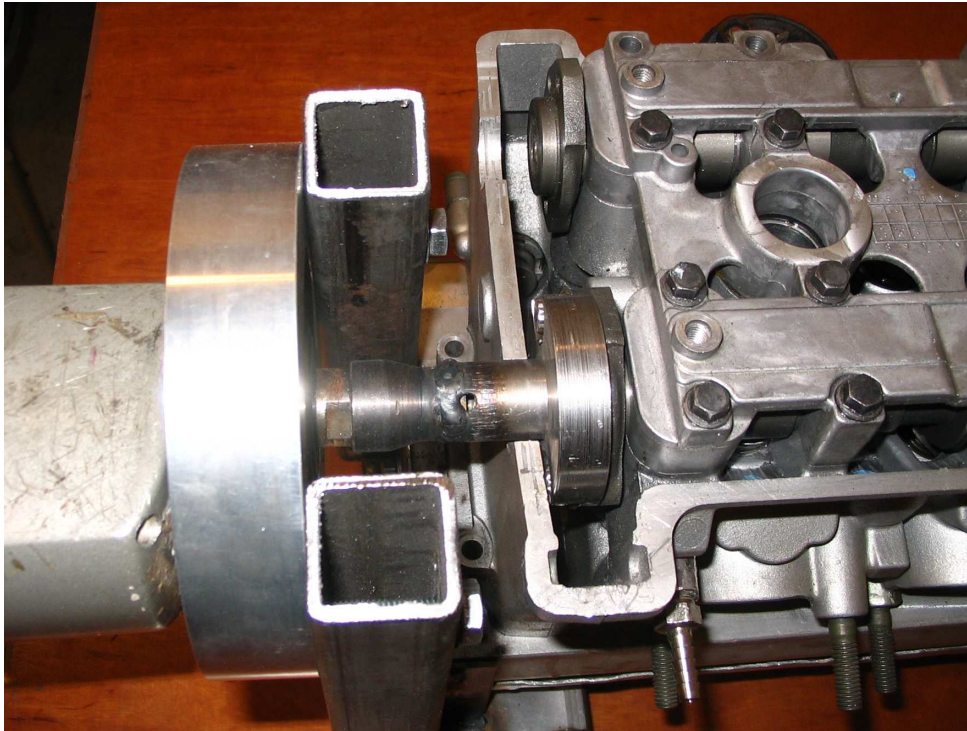
Omavalmisteinen testipenkki (kuva 6) koostuu NC-koneistetusta kiinnityslevystä, joka kiinnitetään tukirungon avulla öljynkiertoon ja sähkömoottoriin. Kiinnityslevy on tehty kannentiivisteiden mukaan niin, että sekä öljyn- että vedenkierto on mahdollista kytkeä kanteen. Kiinnityslevy on nostettu erillisillä jaloilla ylemmäs, jotta öljysäiliö mahtuu koko

laitteen alle. Tällöin kannesta pois valuvaa öljyä ei tarvitse erikseen siirtää mihinkään, vaan se valuu suoraan takaisin säiliöön kahta poistokanavaa pitkin.

Testipenkki saa käyttövoimansa sähkömoottorista. Sillä pyöritetään pakoventtiilejä käyttävää nokka-akselia. Moottori on laakeroitu tukirunkoon. Kun laakerit ovat riittävän herkäät, ei niiden liikuttaminen vaadi lainkaan voimaa. Tällöin, kun moottori tuetaan yhteen pisteeseen, saadaan tarvittava tukivoima mitattua helposti. Tarvittava tukivoima on sama, kuin pyörittämiseen vaadittava voima. Pyöritettäväksi valittiin vain yksi nokka-akseli, koska kahta nokka-akselia pyöritettäessä olisi jouduttu rakentamaan monimutkainen, lyhennetty nokkaketjun järjestelmä. Monimutkaisuuden lisäksi yksi ketjujärjestelmän rakentamisen hylkäysperusteista oli sen aiheuttamat lisähäviöt, joiden suuruuden määrittelemisen olisi ollut hankalaa.

Testipenkin moottorina testattiin ensin Yamaha R6 -moottorin omaa starttimoottoria. Se on Mitsuban valmistama 12 voltin järjestelmässä toimiva sähkömoottori. Moottorin tyyppi on S-14. Moottori oli tuettu testipenkin runkoon molemmista päistä yhdellä urakuulalaakerilla. Laakeroinnin ongelmaksi muodostui usean erilaisen sovitteen aiheuttama epäkeskeisyys, joka johti nykivään liikkumiseen. Käytännön testeissä starttimoottorin tuottama vääntö todettiin kuitenkin riittämättömäksi pyörittämään nokkaa ja siihen liittyviä komponentteja. Starttimoottorin on mahdollista pyörittää koko moottoria, koska sen välitys kampiakselille on hyvin tiheä ja pyörimisnopeus on suuri, jolloin tarvittava vääntömomentti on pieni ja virtaa kuluu vähemmän.

Uudeksi moottoriksi valittiin Black&Decker-merkkisen porakoneen moottori runkoineen. Porakone toimii 240 voltin verkkovirralla ja sen moottorin teho on 900 wattia. Lisäksi siinä on kaksivaihteinen mekaaninen vaihteisto, jossa hitaampi vaihde on alennusvaihde eli vääntöä saadaan vielä enemmän. Porakoneen istukka kiinnitetään ulostuloakseliin MF12-hienokierteellä, joten nokan päähän tehtävän sovitteen toteutus on huomattavasti helpompi (kuva 7), kuin starttimoottorissa, jossa ulostuloakselin päässä on kiinteä ratas. Muita tarvittavia muutoksia ovat vain uuden tukilaakeroinnin ja sen tuennan rakentaminen. Uuden moottorin tuenta päätettiin rakentaa vain yhtä laakeria käyttäen, jolloin edellisen moottorin tuennassa ilmenneeltä keskitysongelmalta vältyttäisiin. Laakerointipisteeksi valittiin porakoneen käsituen paikkana toimiva tasainen osuus istukan ja vaihteiston välissä. Laakerina käytettiin kilpa-auton vanhaa pyöränlaakeria, joka ensin puhdistettiin ja voideltiin uudelleen. Laakerin valmistaja on INA, ja sen tyyppi on.



Kuva 7. Nokka-akselin ja sähkömoottorin välinen soviteakseli

Öljynkierto penkissä on toteutettu ulkoisella Bilteman 12 voltin järjestelmässä toimivalla sähköisellä öljypumpulla. Pumppu saa öljyn testipenkin alle alumiinilevystä rakennetusta öljysäiliöstä, jonka tilavuus on noin puoli litraa. Pumpulta on vedetty letku testipenkin alumiinilevyyn koneistettuun öljykanavaan, josta se kulkee kannen öljynsyöttökanavaan. Tästä öljy nousee ensimmäisiin nokkapukkeihin, josta se pääsee nokka-akseleiden sisään. Nokka-akselit on tulpattu päistä, jolloin niiden sisään muodostuu öljynpaine. Nokka-akseleiden sisältä johdetaan paineella nokka-akseleiden laakereille, josta se valuu venttiilikoneistoon ja siitä edelleen öljyn paluukanavia pitkin takaisin öljysäiliöön. Öljynpaine rajoitetaan ensimmäisten nokkapukkien öljykanavasta lähtevällä letkulla, johon on kytketty öljynpainemittari, sekä paineensäätöventtiili.

Pyörittämisen vaatima voima on siis sama, kuin moottorin vaatima tukivoima, jos moottori on laakeroitu riittävän hyvin. Tukivoiman mittaamiseen käytetään teollisuusvaakaa, jonka yhteen neljästä voima-anturista rakennettiin sovite, jotta tukipiste ei pääse liikkumaan. Tukipiste sijaitsee 250 millimetrin päässä nokka-akselin keskilinjalta. Tällöin tukivoima ja edelleen käytettävä vääntömomentti saadaan kaavoista 1 ja 2.

$$F = mg$$

(1)

jossa F = tukivoima, m = vaa'an näyttämä massa ja g = gravitaatiovakio $\left[9,82 \frac{m}{s^2} \right]$

$$M = Fr \quad (2)$$

jossa M = momentti, F = tukivoima ja r = etäisyys pyöritysakselista

Tällöin, jos vaaka näyttäisi esimerkiksi 1000 gramman lukemaa, olisi pyörittämiseen tarvittava momentti silloin 2,455 newtonmetriä.

Kaikista testeistä laadittiin mittauspöytäkirja, jotta tuloksia olisi helppo arvioida ja jatkokäsitellä. Mittauspöytäkirjasta käyvät ilmi kaikki mittaukseen vaikuttavat muuttujat, jolloin esimerkiksi olosuhteiden muuttuminen on helppo havaita. Tulosten todenmukaisuuden varmistamiseksi vähintään joka kolmas mittaus pyrittiin tekemään aikaisemmin mitatulla kokoonpanolla, jotta mahdolliset olosuhteiden muutokset ja osien hioutumisesta aiheutuva staattisen vastuksen muutos saadaan selville.

Ensimmäisillä mittauskerroilla arvioitiin mittauksen toistettavuutta sekä saatujen arvojen tarkkuutta. Myös sähkömoottorin ja öljypumpun toimintaan kiinnitettiin erityistä huomiota. Ensimmäisten testien perusteella mittauksien tiheyttä ja pituutta rajoittaa ylikuumeneva öljypumpun moottori. Minkäänlaisia ongelmia, kuten paineen katoamista ei kuitenkaan havaittu. Myöskään öljyn ei havaittu merkittävästi lämpenevän mittauksien aikana, joten sen lämpötilan tarkkailemista ei jatkettu.

Öljynpaineen vaikutusta venttiilikoneiston vaatimaan käyttövoimaan testattiin vakioventtiilijousilla sekä kaikki venttiilit käytössä. Myös nokkapukit olivat kiristettynä tehtaan ohjearvoihin. Kilpa-auton tiedonkeruusta saadun tiedon mukaan öljynpaine venttiilikoneistossa on ajon aikana 0,5 ja 2,5 baarin välillä. Testissä lähtöpaineeksi valittiin 2 baaria. Tämän jälkeen painetta nostettiin yhden baarin välein aina viiteen baariin asti. Lopuksi testattiin vielä yhden sekä puolen baarin paineita.

Referenssi- sekä öljynpainemittauksien jälkeen päätettiin mittaus-sykliä muuttaa, koska nostetun pyörintänopeuden takia nokan laakeroinnin todettiin asettuvan vasta muutaman mittauspyörityksen jälkeen. Ensimmäisissä mittauksissa pyörityskertoja oli kolme, joiden jokaisen pituus oli 15 sekuntia. Pyöritysten välillä pidettiin noin viiden sekunnin tauko. Kokeilemalla todettiin, että uudella pyöritysnopeudella mittaustulokset asettuivat kolmen syklin jälkeen, jonka jälkeen haluttiin vähintään kolme tulosta. Tämän

perusteella päädyttiin kuuden pyöryksen sykliin, jossa viimeisestä kolmesta tuloksesta otettiin keskiarvo. Myöhemmin pyörityskerran pituutta laskettiin vielä viidellä sekunnilla eli pituudeksi tuli 10 sekuntia.

Venttiilinjousien vaikutusta tutkittiin testaamalla erilaisella jousivakiolla olevia venttiilijousia. Jouset saatiin eri vuosimallin moottoreista. Joidenkin vuosimallien moottoreissa käytetään tuplaventtiilinjousia eli kahta sisäkkäin sijoitettua joustia. Tällöin kun käytetään vain esimerkiksi sisempää joustia, saadaan testattavaksi erittäin löysä jousi, jota ei normaalissa moottorin käytössä olisi mahdollista käyttää.

Aiempien mittausten perusteella päätettiin käyttää vain neljää venttiiliä, jolloin sykemäisyyttä saatiin vähennettyä ja mittaus hiljenee sekä tasoittuu huomattavasti. Myös pyörintänopeus päätettiin nostaa vaihtamalla pyöritysmoottorin vaihteisto asentoon 2. Tämä tehtiin myös tasaisemman mittauksen toivossa, koska vaaka näyttää vain keskiarvoa tukivoiman vaihtelusta hitaasta reagointinopeudesta johtuen. Tällöin, kun pyörimisnopeus suurenee, lisääntyy voiman pulssien määrä aikayksikköä kohden ja keksiarvosta saadaan tarkempi. Suuremmalla pyörintänopeudella vaadittava pyöritysvoima ei oleellisesti muuttunut eli nokkien aiheuttama tehohäviö on lineaarinen ja nousee kierrosluvun nousun mukaan. Tästä voidaan päätellä myös, että jo pienemmällä pyörintänopeudella pulssit tulevat riittävän tiheästi, jotta vaakaman voimanturi pystyy ne mittaamaan.

Pinnoitteen vaikutusta tutkittiin testipenkissä pinnoitettujen venttiilinnostajien avulla (kuva 10). Pinnoitteena kaikissa pinnoitetuissa kupeissa käytettiin erilaisia versioita DiArc-timanttipinnoitteesta. Pinnoitteen vaikutusta tutkittiin monella eri venttiilinjousien sekä laakereiden kiristysmomenttien yhdistelmillä, jotta vaikutuksesta voitaisiin olla varmoja. Myös pinnoitetta mitattaessa käytettiin vain neljää venttiiliä. Pinnoitemittauksien referenssinä käytettiin sen hetkisen kokoonpanon aloitusmittausta. Lisäksi huomioitiin myös mahdollinen kokeellisesti määritetty korjauskerroin.

5.2 Käyvän moottorin testaus

Käyvän moottorin testaaminen on paljon käytetty menetelmä, koska siinä eri komponentit toimivat omassa ympäristössään. Osa menetelmistä ei lisäksi vaadi muita välineitä kuin normaalissa moottorin kehitys- ja säätämistyössä vaadittavia välineitä, eli testaus on edullista.

5.2.1 Tehonmittaus

Tehonmittauksen tavoitteena on nimensä mukaisesti mitata moottorista saatava teho. Teho määritetään moottorista saatavan väännön ja kierrosluvun perusteella kaavalla 3. Moottorin tuottama vääntömomentti mitataan dynamometrillä. Dynamometrillä jarrutetaan moottorin ulostuloakselia. Jarruttava voima saadaan aikaiseksi esimerkiksi pumppaamalla nestettä eli hydraulisella jarrulla tai magneettikentän avulla eli sähköisellä jarrulla. Kun jarruttavaa voimaa tuottava laite tuetaan dynamometrin runkoon yhdestä pisteestä, voidaan tarvittava tukivoima mitata helposti. Tukivoima voidaan olettaa samaksi kuin moottorin tuottama vääntö, kun moottori ja jarru ovat tuettu hyvin. Yleensä tukivoima mitataan voimasensorilla.

$$P = M * \omega \quad (3)$$

jossa P = teho, M = momentti ja ω = kulmanopeus

Mikäli tehonmittausta käytetään yksinään moottorin häviöiden tutkimiseen, on ainoa vaihtoehto tutkia tehon muuttumista, kun muutetaan moottorin osia. Tällöin voidaan esimerkiksi poistaa apulaitteita, muuttaa öljynlaatua tai korvata osia erilaisilla. Yleensä ongelmaksi tässä tapauksessa muodostuvat dynamometriä tarkkuus sekä olosuhteiden vaikutus tuloksiin. Esimerkiksi moottorista saatava vääntö on voimakkaasti riippuvainen vallitsevasta ilmanpaineesta eli jos sää ehtii muuttua mittauksien välillä, voi saatava tulos muuttua hyvinkin voimakkaasti. Sään vaikutusta tehoon voidaan arvioida seuraavalla kaavalla 4.

$$cf = 1,180 * \left[\left(\frac{990}{P_d} \right) * \left(\frac{T_c + 273}{298} \right)^{0,5} \right] - 0,18 \quad (4)$$

jossa

cf = korjauskerroin

P_d = Ilmanpaine yksikössä hPa

T_c = Ilman lämpötila yksikössä $^{\circ}C$

Kaavasta voidaankin todeta, että kun ilman lämpötila muuttuu 10 astetta, muuttuu ilman tiheys 1,8 %

5.2.2 Morse-testi

Morse-testi suoritetaan moottoridynamometrissä. Testillä pyritään määrittämään moottorin pyörittämiseen tarvittava voima, joka sisältää kilta- ja pumppaushäviöitä sekä yleensä myös apulaitteiden aiheuttamia häviöitä. Morse-testi soveltuu vain moottoreille, joissa on kaksi tai useampi sylinteri. Testin tavoitteena on mitata moottorin tekemä työ yhtä työkiertoa kohden. Seuraavaksi käsitellään Morse-testiä esimerkin muodossa.

Esimerkkinä nelisyylinterinen moottori.

$$BMEP = IMEP - FMEP \quad (5)$$

eli

$$W = W_i - W_f \quad (6)$$

Ensin mitataan moottorin kokonaisteho eli W . Annetaan kokonaisteholle arvo $W = 50kW$

Tämän jälkeen mitataan moottorin teho kytkemällä jokainen sylinteri vuorotellen pois käytöstä. Tässä vaiheessa tulee tarkkailla, että moottorin kierrosluku pysyy samana kuin kaikkia sylintereitä käytettäessä. Myös kaasun asento tulisi pitää samana eli kierrosluku tulisi säätää dynamometrin asetusta muuttamalla. /10, s. 164./

Annetaan esimerkkiarvot ilman jokaista sylinteriä tehdyille testeille.

$$W_{-1} = 35kW$$

$$W_{-2} = 33kW$$

$$W_{-3} = 36kW$$

$$W_{-4} = 34kW$$

Kun näistä arvoista vähennetään ensin mitattu kokonaisteho, saadaan jokaiselle sylinterille oma indikoitu teho, W_i .

$$W_i^1 = W - W_{-1} = 50kW - 35kW = 15kW$$

$$W_i^2 = 50kW - 33kW = 17kW$$

$$W_i^3 = 50kW - 36kW = 14kW$$

$$W_i^4 = 50kW - 34kW = 16kW$$

Kun nämä arvot lasketaan yhteen, saadaan koko moottorin indikoitu teho.

$$W_i = 15kW + 17kW + 14kW + 16kW = 62kW$$

Kun saadusta arvosta vähennetään moottorin mitattu kokonaisteho, saadaan moottorin kokonaishäviöt eli W_f . On kuitenkin hyvä huomata, että näihin häviöihin sisältyy sylinterissä esiintyvien kitkahäviöiden lisäksi myös esimerkiksi pumppaushäviöt. Ja koska sylinterissä ei mittauksen aikana tapahdu syttymistä, myös lämpökuorma on erilainen.

$$W_f = W_i - W = 62kW - 50kW = 12kW$$

Saaduilla arvoilla voidaan laskea myös moottorin mekaaninen hyötysuhde eli η_{mek}

$$\eta_{mek} = \frac{W}{W_i} \quad (7)$$

Kun sijoitetaan yhtälöön 5 tunnetut W ja W_i saadaan mekaaniseksi hyötysuhteeksi tällöin 0,807 eli 80,7 %.

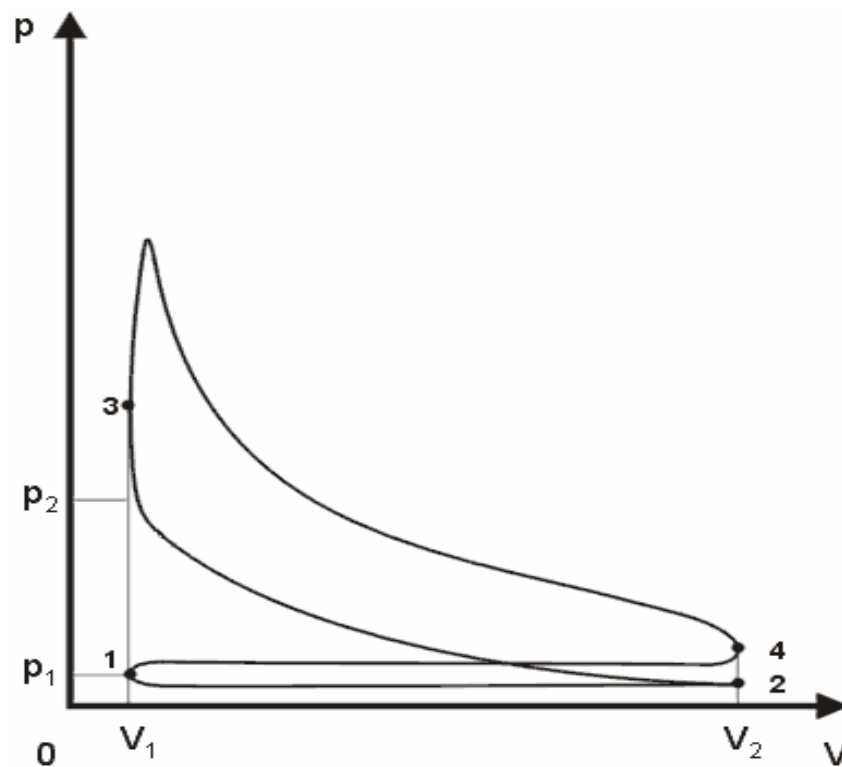
5.2.3 Sylinterinpainemittaus

Sylinterinpainemittaus on ylivoimaisesti tarkin mittauskeino moottorin sisäisten voimien määrittämiseen. Tosin välineet mittauksen suorittamiseen ovat kalliita ja ilman oikeanlaista osaamista tulokset voivat olla käyttökelvottomia. Tästä syystä sylinterinpainemittauksia suorittavatkin yleensä vain suuret, moottorien kehitykseen keskittyneet yritykset tai osastot, joilla on erittäin hyvät laboratoriot ja osaajat kyseiseen suoritteeseen.

Sylinterinpainemittaukseen tarvitaan siis käyntikuntoinen moottori, sekä moottoridynamometri. Itse mittalaitteisto koostuu vähintään kahdesta anturista,

anturivahvistimesta, tiedonkeruulaitteesta sekä tarvittavista kytkentäjohdoista. Antureita tarvitaan vähintään kaksi, koska moottorista täytyy itse sylinterinpaineen lisäksi mitata myös kampiakselin asento. Toinen antureista on siis kampiakselin päähän kiinnitettävä asentoanturi, joka mittaa kampiakselin asennon 0,1 asteen tarkkuudella. Laitteistosta ja moottorista riippuen voidaan käyttää yhtä tai useampaa paineanturia samanaikaisesti. Paineanturi on yleensä integroitu erikoisrakenteiseen sytytystulppaan, jolloin asentaminen on yhtä helppoa kuin normaali sytytystulpan vaihto. Anturia asentaessa kannattaa kuitenkin olla erityisen varovainen, sillä pienikokoinen anturi on erittäin herkkä vaurioitumaan.

Kun tarvittavat laitteet on kytketty ja kalibroitu ja niitä käytetään oikein, syntyy tuloksena moottorin tälle sylinterille ja mitatulle kierrosluvulle sekä kuormitukselle ominainen paine-tilavuus- eli pV-kuvaaja, josta esimerkki on esitetty kuvassa 8.



Kuva 8. Esimerkki bensiinimoottorin paine-tilavuuskuvaajasta

Kuvaajassa ylempi muoto on työtä tekevä osa ja alempi, vaakasuora muoto on kaasun vaihdon osa. Pisteessä 1 mäntä on ylimmässä asennossa eli yläkuolokohdassa (YKK). Tällöin imuventtiili avataan ja paine tasaantuu vapaasti hengittävässä lähelle ulkoilmanpainetta ja ahdetuissa lähelle ahtopainetta. Pisteessä 2 mäntä on alimmassa asennossa eli alakuolokohdassa (AKK) ja imuventtiili suljetaan. Pisteestä 2 käyrä alkaa

nousta eli sylinterin paine kasvaa. Tämän vaiheen nimi on puristustahti. Käyrän nousu jyrkkenee rajusti kohdassa 3, koska tällöin polttoaine-ilmaseos sytytetään kipinällä ja paine nousee nopeasti. Sytytyshetki vaikuttaa voimakkaasti painepiikin maksimikorkeuteen. Tämän jälkeen paine työntää mäntää alaspäin aina pisteeseen 4 asti, jolloin pakoventtiili avataan ja kaasut poistuvat sylinteristä männän noustessa jälleen ylöspäin.

Kuvassa ylemmän muodon sisään jäävä tilavuus on moottorin tekemä työ. Tämän takia se halutaan mahdollisimman suureksi. Tilavuuteen vaikuttavat esimerkiksi puristussuhde, sytytyshetki sekä venttiilien aukeamis- ja sulkemishetki. Yleensä kuitenkin yhden suureen muuttaminen vaikuttaa kaikkiin osiin kuvaajassa, joten muutoksen vaikutusta on vaikea ennakoida. Lisäksi kuvaaja kertoo moottorin ominaisuuksista vain yhdellä kierrosluvulla ja yhdellä kuormitusasteella. Jos kuvaajista haluttaisiin esimerkiksi laatia moottorille ominainen vääntökäyrä, täytyisi niitä olla mitattuna jokaisen 500 kierrosluvun välein. /9/

6 MOOTTORIN SISÄISET MUUTOKSET

Tässä osiossa käsitellään moottoriin tehtyjä sisäisiä muutoksia. Moottori on jaettu kolmeen eri kokonaisuuteen. Venttiilikoneistoa käsitellään omana osanaan, koska suurin osa tutkimuksesta kohdistui siihen. Kampikoneisto käsitellään jäljelle jäävänä moottorin osana yleisesti ja vaihteisto luetaan tässä tapauksessa moottoriin, koska Yamaha R6 -moottoripyörässä vaihteisto on integroitu moottorin lohkojen valuuun.

6.1 Venttiilikoneisto

Venttiilikoneisto on yksi moottorin suurimmista häviöiden aiheuttajista. Kyse ei kuitenkaan ole pelkästään kitkahäviöistä, vaan suuri osa kampiakselilta otetusta voimasta menee venttiilinjousien jousivoiman voittamiseen, jotta venttiilit saadaan avautumaan ja kaasun vaihto on mahdollista. Venttiilikoneisto valittiin kokonaisuudessaan tarkempiin tutkimuksiin. Suurin syy tähän oli sen helppo eroteltavuus muusta moottorista. Myös erilaisten komponenttien ja voiteluaineiden testaus on helppoa.

Testipenkissä testattuja muutoksia venttiilikoneistoon olivat erilaisella jousivakiolla olevien venttiilijousien sekä laakeroinnista johtuvien vastuksien selvitys. Lisäksi testattiin erilaisia öljynpaineita sekä kahta erilaista timanttipinnoitetta venttiilinnostajissa. Erilaisia kokoonpanoja testattiin yhteensä noin 20. Venttiilijousia testattiin kahdella eri jousivakiolla. Nämä olivat vakio pakojouset eli 3,8 kg/mm jousivakiolla olevat sekä sisemmät imuventtiilijouset eli 1,8 kg/mm jousivakiolliset. Laakeroinnin vaikutusta tutkittiin erilaisella nokkapukkien kiristysmomentilla. Ohjekirjan mukaisen 10 newtonmetrin kiristysmomentin lisäksi testattiin seitsemän newtonmetrin kiristysmomenttia. Venttiilinvälykset säilytettiin kokoajan ohjekirjan antamassa 0,15 millimetrin arvossa.

6.2 Kampikoneisto

Kampikoneistoon lukeutuvat kampiakseli, kiertokanget ja männät sekä niiden kiinnittämiseen tarvittavat osat, kuten männäntapit ja laakeriliuskat. Kampiakselin laakerit ovat moottorin eniten rasitettu osa varsinkin suurilla nopeuksilla pyörivissä moottoreissa. Yleensä moottorien laakerivauriot sattuvatkin juuri kampiakselilla. Tämä johtuu siitä, että kampiakselin laakerointi sekä siihen laakeroidut kiertokanget joutuvat

kestämään suuria toispuolisia kuormia, koska männän kiertokankeen aiheuttama voima tulee vain yhdestä suunnasta, lähes kohtisuoraan kampiakselia kohti.

Kampikoneistossa testattujen ja pinnoitettujen osien lukumäärä jäi alhaiseksi, koska pehmeitä laakeriliuskoja ei voi pinnoittaa timanttipinnoitteen ominaisuuksien takia. Pinnoitetta kokeiltiin männäntappeihin sekä männänhelmoihin, mutta mitään mittauksia osille ei suoritettu. Kysymyksessä oli siis ainoastaan kestotesti.

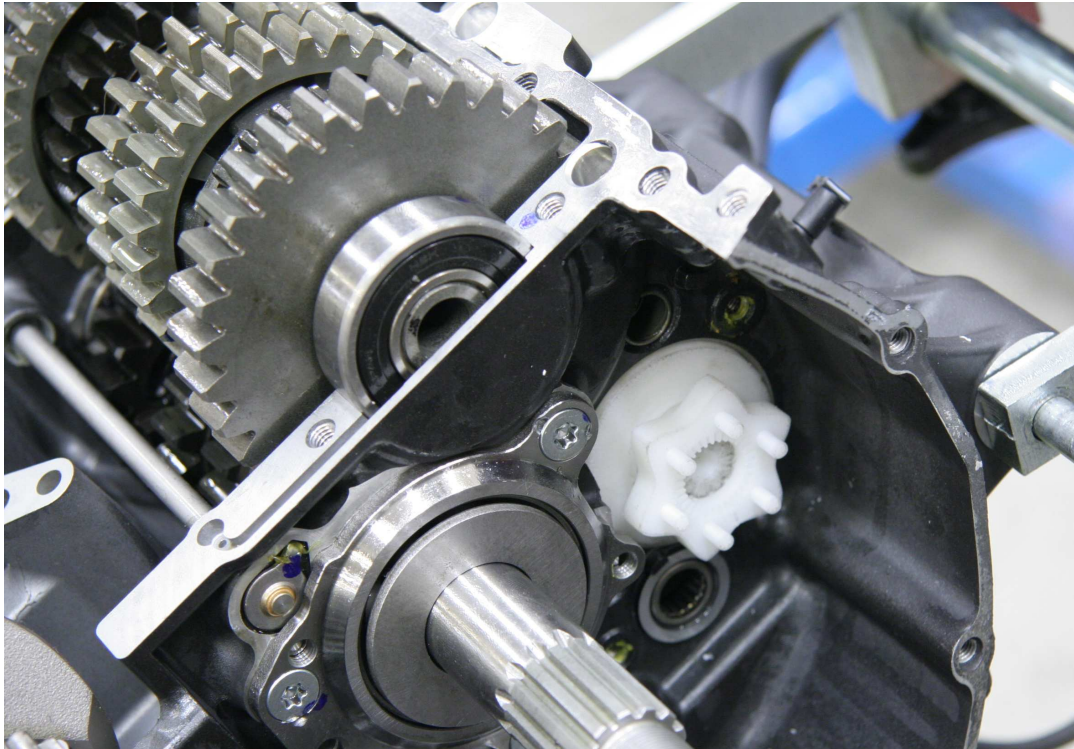
6.3 Vaihteisto

Vaihteistoon lukeutuvat kaikki jäljelle jääneet lohkon sisällä olevat pyörivät osat kampiakselilta eturattaaseen. Normaaleissa henkilöautoissa vaihteisto on erillinen irrotettava osa, jota ei tarvitse moottoria testatessa huomioida lainkaan. Moottoripyörän moottoreissa vaihteisto on kuitenkin valettu perusmoottorin kanssa saman kuoren sisään, joten kaikki kokonaisesta moottorista mitattavat voimat mitataan vaihteiston läpi.

Vaihteiston hyötysuhdetta pyrittiin parantamaan poistamalla ylimääräinen paino vaihteistosta ja erityisesti liikkuvista osista. Vaihdevälityksiä ja kilpa-auton moottorin käyttökelpoista kierrosaluetta tutkittaessa todettiin, että kuuden vaihteen sijaan ajossa tarvitaan vain neljää vaihdetta. Aiemmissa kilpa-autoissa, kuten HPF005-mallissa perävälitys on valittu niin, että toinen vaihde on ollut pienin tarvittava vaihde. Joissakin vaihdelaatikotyypeissä vaihdevälityksiä poistamalla ei välttämättä päästä kovinkaan suuriin hyötysuhteen parannuksiin, koska nykyaikaisen hammasratassuunnittelun tuloksena rataskosketuksen tehohäviö on hyvin pieni ja useimmiten rattaista pyörivät vain ne, jotka välittävät tehoa. Yamahan vaihteistossa mukana pyörivät kuitenkin kaikki rattaat, ja koska moottorin pyörivät massat ovat kokonaisuudessaan melko pienet, pystytään helposti eliminoimaan suuriakin massanhitauksien aiheuttamia tehohäviöitä.

Moottoriin vaihdettiin uusi, kevyempi luistokytkin, joka myös helpottaa vaihteiden alaspäin vaihtamista. Lisäksi vaihteistosta poistettiin viides ja kuudes vaihde, koska kisojen maksiminopeus on niin alhainen, että laajasti vääntävällä moottorilla tarvittavien välitysten määrä on pienempi. Vaihteita päätettiin poistaa kaksi, koska tällöin päästiin eroon kokonaan kolmannesta vaihteensiirtohaarukasta sekä kahdesta ensiöakselilla olevasta rattaasta. Myös toisioakselilla olevista rattaista hiottiin käyttämättömät hampaat pois, mutta koko rattaita ei ollut mahdollista poistaa, koska ne toimivat samalla kytkentäelinä pienemmille vaihteille. Myös vaihtorumpu päätettiin tehdä uudelleen, koska moottoripyörissä vapaa on ensimmäisen ja toisen vaihteen välissä, eli kaavio on

tyyppiä 1-N-2-3-4-5-6. Tämä järjestys oli kuitenkin hankala toteuttaa kaudelle 2008 käyttöön tulleella paineilmalla toimivalla vaihteenvaihdolla. Rumpu (kuva 9) tehtiin uudelleen niin, että kaavio oli tyyppiä N-1-2-3-4.



Kuva 9. Vaihteiston vaihtorummun prototyyppi ensitestissä

Vaihteistosta onnistuttiinkin keventämään pyöriviä massoja taulukon 1 mukaisesti. Taulukossa kokonaan poistetut osat on merkitty Uusi paino -sarakeeseen nollassa.

Taulukko 1. Moottorin osien massat ennen ja jälkeen kevennyksen

Osa	Paino	Lkm	Yht.	Uusi paino	Erotus	%
Lohko, alempi	4768	1	4768	4499	-269	-5,64
Lohko, ylempi	7758	1	7758	7506	-252	-3,25
Kansi	7580	1	7580	7580	0	0,00
Kampiakseli	7998	1	7998	7998	0	0,00
Kiertokanki	249	4	996	996	0	0,00
Mäntä	133	4	532	532	0	0,00
Männäntappi	36	4	144	144	0	0,00
Nokka-akseli, imu	835	1	835	835	0	0,00
Nokka-akseli, pako	845	1	845	845	0	0,00
Öljypumppu	508	1	508	508	0	0,00
Vesipumppu	371	1	371	371	0	0,00
Jakoketju	267	1	267	267	0	0,00
Nokkapukki, iso	81	4	324	324	0	0,00
Nokkapukki, pieni	55	2	110	110	0	0,00
Venttiilikoppa	622	1	622	622	0	0,00

Kannentiiviste	98	1	98	98	0	0,00
Kytkin	2608	1	2608	2000	-608	-23,31
Kytkin, kehto	1945	1	1945	1945	0	0,00
Kytkinkoppa	571	1	571	571	0	0,00
Laturinkoppa	818	1	818	818	0	0,00
Laturi	470	1	470	470	0	0,00
Starttimoottori	1000	1	1000	1000	0	0,00
Öljynjäähdytin	1501	1	1501	1501	0	0,00
Vaihteistohaarukan akseli	86	1	86	86	0	0,00
Vaihteistohaarukka	105	2	210	210	0	0,00
Vaihteistohaarukan akseli 56	97	1	97	0	-97	-100,00
Vaihteistohaarukka 56	88	1	88	0	-88	-100,00
Vaihepolkimen akseli	315	1	315	315	0	0,00
Vaihteisto, pääakseli	1918	1	1918	1465	-453	-23,62
Vaihteisto, sivuakseli	3258	1	3258	2974	-284	-8,72
Öljypohja	889	1	889	600	-289	-32,51
Öljynsuodatin	160	1	160	160	0	0,00
Venttiilinnostimet	202	1	202	202	0	0,00
Imusarjanlaipat	299	1	299	299	0	0,00
Termostaatti	140	1	140	140	0	0,00
Koppien pultit	349	1	349	118	-231	-66,19
Vaihteistorumpu	530	1	530	341	-189	-35,66
Venttiilikopan pultit	82	1	82	82	0	0,00
Trigger+home-anturit	73	1	73	73	0	0,00
Venttiilin säätöpalat	11	1	11	11	0	0,00
Ylimääräiset osat	590	1	590	0	-590	-100,00
Lohkon pultit	630	1	630	630	0	0,00
YHTEENSÄ			52596	49246	-3350	-6,37

Pienentynyt massa on kilpa-autossa aina toivottu asia. Moottorin ja vaihteiston muodostavaa pakettia saatiinkin kevennettyä kokonaisuudessaan hieman yli kolme kiloa, joka tarkoittaa yli kuutta prosenttia alkuperäisen paketin painosta. Samalla päästiin alle 50 kilogramman kokonaispainoon, joka on nelisylinteriselle nelitahtimoottorille vaihteiston kanssa todella vähän. Paikallaan olevien osien kevennyksen lisäksi taulukossa on myös liikkuvia osia. Moottorin mukana pyörivien osien eli liikkuvien massojen pienentäminen onkin helppo tapa parantaa moottorin herkkyyttä. Jokaisella kiihdytettävällä massalla on myös oma hitautensa, jonka kiihdyttäminen vaatii tehoa. Tämä teho on suoraan pois moottorin ulostuloakselilta ulos saatavasta tehosta. Kevennettyjen ja poistettujen osien vaikutusta moottoritehoon arvioidaan seuraavissa kappaleissa.

Ensin tutkitaan osien pyörintänopeuksia. Kaikki samaa nopeutta pyörivät osat tulee laskea omana ryhmänään yhteen. Tässä tapauksessa kaikki kevennetyt osat pyörivät samaa nopeutta vaihteiston ensiöakselin kanssa, johon myös kytkin kytkeytyy. Tehohäviö halutaan tietää kampiakselille redusoituna, koska kaikki teho tulee sieltä.

Tällöin väliin jää vain yksi vaikuttava välitys, ensiövälitys, joka on 1 : 2,02. Laskennat perustuvat yhtälöön 8. Koska massat tiedetään, täytyy seuraavaksi selvittää kiihtyvyys.

$$F = ma \quad (8)$$

F = voima, m = massa, a = kiihtyvyys

Auton kiihdytyksessä ilmenevä kierroksien maksiminousunopeus selvitettiin konkreettisesti tiedonkeruun tallenteista. Kierrosten suurimmaksi nousunopeudeksi todettiin 2500 kierrosta per sekunti. Kevennettyjen massojen inertiat laskettiin kahdessa osassa. Ensimmäinen osa sisälsi kytkimen keventyneen painon. Kappaleiden inertiaa laskettaessa oletetaan niiden keventyneen tasaisesti koko kappaleen alueelta. Kytkimen halkaisijaksi mitattiin 16 senttimetriä, ja sen massa pieneni 500 grammaa. Tällöin inertian muutos voidaan laskea kaavalla 9.

$$p = 0,5 * m * r^2 \quad (9)$$

jossa p = inertia, m = massa, r = pyöreän kappaleen säde

Kun sijoitetaan aiemmin esitetyt tiedot kaavaan 7, saadaan kytkimen kevennetyn massan inertiaksi $0,001482 \frac{kg}{m^2}$. Vastaavasti poistettujen vaihderattaiden keskihalkaisijaksi mitattiin 10 senttimetriä ja massaksi 980 grammaa. Tällöin vaihderattaiden inertiaksi saadaan $0,0016 \frac{kg}{m^2}$. Seuraavaksi lasketaan saadut inertiat eli massanhitaudet yhteen ja kerrotaan saatu tulos aiemmin selvitettyllä kampiakselin maksimikihtyvyydellä, joka ensin redusoidaan ensiöakselille ensiövälityksen läpi, saadaan osien kevennyksellä saavutettavaksi vääntömomentin nousuksi noin 0,4 newtonmetriä. Tämä tarkoittaa esimerkiksi 11000 kierrosta minuutissa käyntinopeudella noin 0,84 hevosvoimaa.

7 KITKAA VÄHENTÄVÄT PINNOITTEET

Erilaisia pinnoitusmenetelmiä ja pinnoitteita on käytetty metallien pinnoittamiseen läpi ihmiskunnan historian. Tietävästi ensimmäiset toiminnalliset pinnoitteet tehtiin miekkojen teräosiin. Miekat lämmitettiin punahehkuseksi ja upotettiin ureaan. Ureassa oleva hiili siirtyi teräksen pintaan, jolloin saatiin hiilirikas, kova pinta, joka kesti hyvin kulutusta.

Yleensä pinnoitteilla pyritään vaikuttamaan metallin kovuuteen, jolloin saadaan kestävämpiä osia. Kitkaa pienennettäessä halutaan pinnasta yleensä sileämpi, jolloin käytetään hiontaa tai kiillotusta. Mikään metallin pintaan lisättävä pinnoite ei kuitenkaan tuo hyötyä, mikäli pinta on liian karkea tai materiaali on käyttötarkoitukseen liian heikko, jolloin se murtuu kovan pinnan alta.

7.1 Erilaiset pinnoitteet

Erilaisia pinnoitteita on olemassa niin paljon, että tämän insinööriyön puitteissa ei ole mahdollista listata niitä. Yleisimpiä pinnoitteita ovat erilaiset nitiidipinnoitteet. Niistä varmasti parhaiten tunnettu on työkalujen pinnassa käytettävä, väriltään keltainen titaaninitriidipinnoite. Suurin osa pinnoitteista muodostaa kovan pinnan pinnoitettavan kappaleen pinnalle, jonka avulla pidennetään kappaleen elinikää.

Ylivoimaisesti yleisin hiiltä hyväksikäyttävä metallin pintakäsittelymenetelmä on karkaisu. Siinä metalli, yleensä rauta, kuumennetaan punahehkuseksi ja jäähdytetään nopeasti johonkin toiseen aineeseen upottamalla. Hiiletyskarkaisussa saadaan kappaleeseen kova pinta, joka kestää hyvin kulutusta. Erityistä kitkaa vähentävää ominaisuutta ei tällä menetelmällä kuitenkaan saavuteta. Nykyaikaisempi hiiltä hyväksikäyttävä pinnoite on niin kutsuttu timanttipinnoite eli timanttisidoksin yhdistynyt hiilipinnoite, joka on tunnetuimmalta nimeltään DLC eli Diamond-Like-Carbon.

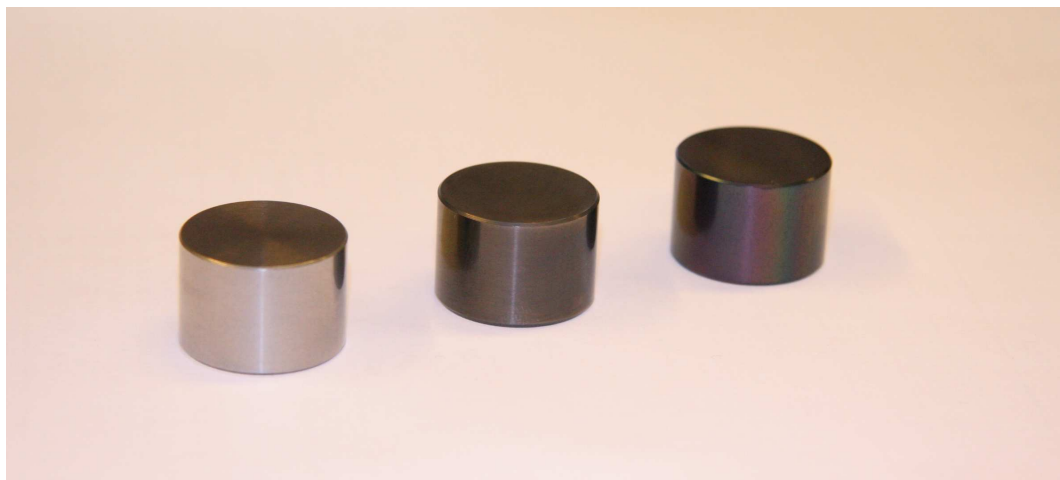
DLC-pinnoitteiden tuottamiseen on käytetty monenlaisia menetelmiä. Yleisimpiä menetelmiä ovat Ion Beam Deposition (IBD) eli ionisäteen avulla pinnoitetta kerrostava menetelmä, Physical Vapour Deposition (PVD) eli höyrystyneen materiaalin fyysinen kerrostaminen, sekä Plasma Assisted Chemical Vapour Deposition (PACVD) eli plasma-avusteinen höyrystyneen materiaalin kemiallinen kerrostaminen. Yleensä

kuitenkin jokaisen valmistajan menetelmä on itse kehitetty ja jonkinlainen yhdistelmä edellisistä. /11/

7.2 DiArc-timanttipinoite

Tutkimuksissa käytetty pinnoite on suomalaisen DiArc Technologies -yrityksen valmistama timanttipinnoite. Tämä pelkästään hiiltä sisältävä pinnoite lisätään kappaleen pintaan tyhjiöpinnoitusmenetelmällä. Prosessissa pinnoitettavaa kappaletta pommitetaan hiiliatomeilla. Kiinteästä grafiitista muodostetaan hiiliplasma, jonka hiukkaset kiihdytetään sähkökentässä. Tyhjiötä tarvitaan, jotta kiihdytetyt yksittäiset hiili-ionit pääsevät esteettä jatkamaan lentoaan, kunnes törmäävät pinnoitettavaan kappaleeseen. Tyhjiö auttaa myös pitämään epäpuhtaudet loitolla pinnoitusprosessista. Ionien osuessa kappaleen pintaan syntyy paikallisesti hyvin suuri paine, jolloin hiiliatomit muodostavat keskenään timanttisidoksia.

Syntyvän amorfisen eli kiteettömän pinnoitteen rakenteesta noin 60 prosenttia on timanttisidoksia ja loput heikompia grafiittisidoksia. Pinnoite on vain muutaman mikrometrin paksuinen, eli sitä ei yleensä tarvitse ottaa kappaleen mitoituksessa lainkaan huomioon. Kovuus on luokkaa 5 000 HV. Valmis timanttipinnoite ei ole vain yksi timanttikerros kappaleen pinnalla, vaan sovelluksen mukaan räätälöity amorfinen monikerrosrakenne. Tästä erilaisesta kerrostumisesta johtuen eri pinnoite-erän väri voi vaihdella toiseen verrattuna, kuten kuvassa 10 näkyvät kaksi eri pinnoiteversiota venttiilinnostimissa. Yleisimpään DLC-pinnoitteeseen verrattuna DiArc-pinnoite ei sisällä lainkaan vetyä, joten sen lämmönkesto on parempi. Myös pinnoituslämpötila on huomattavasti alhaisempi, noin 80 astetta, joka mahdollistaa myös esimerkiksi muovien pinnoittamisen. /12/



Kuva 10. Vasemmalla alkuperäinen venttiilinnostaja, keskellä ensimmäinen pinnoiteversio ja oikealla toinen versio

Pinnoitteen yleisimpiä käyttökohteita ovat esimerkiksi työkalut ja erilaiset muotit. Pinnoite vähentää kiinnileikkautumista ja työstettävän materiaalin tarttumista työkaluun, jolloin esimerkiksi muotin kestoikä moninkertaistuu. Myös erilaisia korkean hygieniatason tuotteita pinnoitetaan, koska bakteeritkaan eivät tartu pinnoitteeseen.

Moottorinosien pinnoituksessa tulee huomioida, että kaksi pinnoitettua pintaa eivät voi olla kosketuksissa toisiinsa. Tällöin pinnoite kuluu erityisen nopeasti. Myös pinnoitettavan materiaalin tulee olla riittävän vahvaa kantaakseen vaikuttavat kuormat. Mikäli pinnoitettu osa joustaa, syntyy pinnoitteen ja kappaleen väliin ontelo, joka supistelee materiaalin jouston mukaan. Tästä ontelosta kohdasta alkaa niin kutsuttu kavitaatiokorroosio, joka yleensä johtaa koko pinnoitteen irtoamiseen. Todennäköisesti juuri kavitaatio oli syynä ensimmäisissä pinnoitetuissa venttiilikupeissa ilmenneeseen pinnoitteen irtoamiseen, joita testattiin HPF007-autossa (kuva 3). Venttiilikupin yläosa on niin ohut, että se joustaa melko paljon moottorin käydessä suurilla kierroksilla. Nostajat olivat myös käytettyjä, kun ne pinnoitettiin, mikä omalta osaltaan saattoi vaikuttaa pinnoitteen irtoamiseen. Pinnoitus tulisikin aina tehdä uudelle kappaleelle, jotta välttyttäisiin epäpuhtauksista johtuvista pinnoitevaurioista. Myös pinnan tulisi olla riittävän tasainen, jotta pinnoitteesta saadaan kaikki hyöty irti.

8 TULOKSET

8.1 Morse-testi

Morse-testiä kokeiltiin moottorin kehittämisen yhteydessä moottoridynamometrissä. Ensimmäisellä testikerralla moottoria ajettiin kierrosluvulla 6000 kierrosta minuutissa täyskaasulla. Tällöin hieman pielessä olevan sytytyksen ja epävakaan dynamometrin säädön takia minkäänlaisia luotettavia tuloksia ei saatu.

Toisella testikerralla moottorin kierrosnopeus oli 4000 kierrosta minuutissa ja edelleen täyskaasu. Nyt moottorin kierrosluku pysyi hieman tasaisempana. Moottori alkoi kuitenkin kesken mittauksen huohottaa voimakkaasti, joten mittaus keskeytettiin ilman tuloksia. Myöhemmin syyksi paljastui liian suuri sytytysennakko, joka aiheutti nakutusta eli polttoaine-ilmaseoksen ennen aikaista syttymistä ja tästä johtuvaa kasvanutta painetta sylinterissä, mikä ilmenee nakuttavana äänenä. Nakutus rasittaa moottoria moninkertaisesti verrattuna tavalliseen käyttöön, joten heti ongelman ilmettyä mittaus keskeytettiin välittömästi.

Muita testissä havaittuja ongelmia olivat suuttimien johtoihin asennettujen katkaisijoiden ja pitkien johtojen aiheuttama vastuksen kasvaminen, jolloin polttoaineen syöttömäärää jouduttiin korjaamaan ennen testiä. Mikäli seokset jättää korjaamatta, voi pahimmassa tapauksessa seurauksena olla moottorin rikkoutuminen.

8.2 Venttiilikoneiston testaus

Venttiilikoneiston testaamiseen käytettiin omavalmisteista testipenkkiä, jossa Yamaha R6 -moottorin kansi on kiinnitetty erilliseen telineeseen, joka mahdollistaa öljynpaineen kytkemisen kanteen sekä pakonokan pyörittämisen erillisellä sähkömoottorilla. Penkin tarkempi kuvaus löytyy luvusta 5.1.2.

Ensimmäisessä mittauksessa arvioitiin siis vain penkin toimintaa. Mittauksen tulokset löytyvät liitteenä olevasta ensimmäisestä mittauspöytäkirjasta. Mittausyhteensä kuusi, joista kolmen jälkeen öljypumppua täytyi jäähdyttää paineilmalla, koska pumppua pyörittävän sähkömoottorin päädyn lämpötila kohosi yli 150 celsiusasteeseen. Mittauksessa vaa'an näyttämän voiman keskiarvoksi saatiin 1156 grammaa joten tällöin pyörittämiseen tarvittava vääntö on keskiarvoltaan 2,84 newtonmetriä.

Suurin virhe mittauksessa oli 60 gramma, joka tarkoittaa vääntönä noin 0,15 newtonmetriä. Mittauksessa havaittiin myös, että pyöritysmoottorissa oleva vaihteisto pitää kovaa, hakkaavaa ääntä. Tämän todettiin johtuvat nokkaprofiilin aiheuttamasta sykemäisestä vastuksesta.

Kasvaneen pyörintänopeuden takia nokka-akselin laakerit ja muut liukupinnat hioutuvat nopeammin. Tästä johtuen mitattava voima pienenee, kun mittauksia tehdään enemmän. Näistä mittauksista määritetään korjauskerroin jokaiseen mittaukseen. Mittaukset 6 ja 9 suoritettiin samalla kokoonpanolla. Mittauspöytäkirjat löytyvät vastaavilla numeroilla. Näiden mittauksien perusteella kolmen suoritettujen mittauksen aikana mitattava massa pieneni noin 70 grammaa eli 23,33 grammaa per mittaus. Tämän perusteella mittauksien korjauskerroin on 0,965.

Seuraavaksi esitettyjen mittausten lisäksi testipenkissä testattiin nokka-akselin laakeripukkien kireyden vaikutusta pyörittämiseen tarvittavaan vääntömomenttiin. Mittaukset löytyvät mittauspöytäkirjoista 9 - 12. Tehtaan asettama nokkalaakereiden kiristysmomentti on 10 newtonmetriä. Ensimmäisessä mittauksessa laakeripukkien kireyttä pienennettiin vakiosta arvoon kahdeksan newtonmetriä. Tällöin vääntömomentin tarve pieneni 0,1 newtonmetriä eli noin kuusi prosenttia. Myös nokkapukkien lämpötila pieneni 10 astetta. Toisessa mittauksessa kiristysmomenttia pienennettiin vakiosta kolme Newton-metriä. Tuloksena vääntömomentin tarve pieneni 0,06 newtonmetriä eli noin viisi prosenttia. Tuloksista voidaan todeta, että laakereiden kiristysmomentin pienentämisellä tätä enemmän ei saavuteta enää mitään vaikutusta.

8.2.1 Öljynpaineen vaikutus

Mittauspöytäkirjoista 2 - 4 käy ilmi, että öljynpainetta muutettaessa pyörittämiseen tarvittava vääntö ei muuttunut lainkaan. Viimeisenä mitattu 0,5 baarin paine näytti hiukan pienempiä lukemia, mutta syynä tähän on ainoastaan laakereiden hioutuminen ja sopeutuminen toisiinsa. Vertailun perusteella öljynpaineeksi seuraaviin mittauksiin valittiin melko alhainen arvo, jotta pumppu ei rasittuisi turhaan. Arvoksi asetettiin yksi bar. Mittauksien perusteella syklien määrä päätettiin myös laskea kuudesta kolmeen, koska tulos ei näyttänyt muuttuvan mittausten edetessä lainkaan.

Mitattaessa kahden baarin öljynpaineella eli alkutilanteessa saatiin tulokseksi 1165 grammaa. Kolmella baarilla vastaava lukema oli puolestaan 1135 grammaa. Viidellä baarilla vaaka näytti 1123 grammaa ja viimeisessä mittauksessa puolen baarin paineella

tulos oli 1101 grammaa. Tulosten pienenemisen todettiin johtuvan uusien osien hioutumisesta. Korjauskerrointa ei kuitenkaan tässä mittauksessa voitu käyttää, koska pyörintänopeus oli väärä. Pienemmästä pyörintänopeudesta johtuen myös voiman pieneneminen on pienempää.

8.2.2 Venttiilijousien vaikutus

Venttiilijousien vaikutusta tutkittiin ensimmäisen kerran mittauksissa 9 - 11, mutta tällöin jousien vaihdon ja referenssimittauksen välissä muutettiin myös laakeripukkien kiristysmomenttia. Myös osien hioutuminen oli vielä tässä vaiheessa kesken, joten ensimmäisen mittauksen tuloksien käsittely vaatii korjauskertoimen käyttöä. Ennen jousien vaihtoa mitattu momentin tarve oli 1,45 newtonmetriä. Jousien vaihdon jälkeen vaaka näytti lukemaa 490 grammaa, joka korjauskertoimen jälkeen on 513,3 grammaa. Momenttina tämä tarkoittaa noin 1,26 newtonmetriä. Löysemmät jouset pienensivät siis tarvittavaa vääntömomenttia 0,19 newtonmetriä eli 13 prosenttia.

Toisessa jousivertailussa osien hioutuminen oli jo niin pientä, että korjauskerrointa ei tarvinnut käyttää. Tällä kertaa ensin mitattiin löysemmät jouset. Mittauksessa käytettiin vakionostajia sekä pienennettyä laakeripukkien kiristysmomenttia. Lähtöarvoksi saatiin 500,7 grammaa eli 1,23 newtonmetriä. Jousien vaihdon jälkeen vastaavat lukemat olivat 644 grammaa ja 1,58 newtonmetriä. Nyt löysemmät jouset pienensivät vääntömomenttia 0,35 newtonmetriä eli noin 22 prosenttia.

8.2.3 Pinnoitteen vaikutus

Timanttipinnoitteita testattiin ensin kahta erilaista. Ensimmäiset mittaukset tehtiin vakioventtiilijousilla, laakereiden kiristysmomentilla sekä suuremmalla pyöritysnopeudella. Nämä mittaukset löytyvät mittauspöytäkirjoista 6 - 9. Seuraava vertailu tehtiin löysemmillä venttiilijousilla sekä pienennetyllä kiristysmomentilla. Näiden mittauksien pöytäkirjat ovat puolestaan 11 - 13.

Ensimmäisten mittauksien tuloksena saatiin pinnoitteelle 1 mittauksien keskiarvoksi 690 grammaa, joka korjauskertoimen huomioon ottaen tarkoittaa noin 15 grammaa enemmän, kuin vakionostajilla. Tämä tarkoittaa väännössä noin 0,04 newtonmetriä. Pinnoitteen 2 keskiarvo puolestaan oli 670 grammaa, joka korjauksen jälkeen on 18 grammaa enemmän kuin vakioilla. Vääntömomentiksi muutettuna lukema on noin 0,045 newtonmetriä. Suurempi lukema johtuu todennäköisesti siitä, että myös

timanttipinnoitteen täytyy hioutua ympäristöönsä. Vaikka kyseessä on kova pinnoite, myös se kiillottuu. Pinnoitteen 2 kylkiin oli lisäksi jäänyt selkeästi materiaalia nostajan pesästä. Lisäksi molemmissa testierissä pinnoite irtosi nostajan laelta. Vaurioituneet nostajat ovat esitettynä kuvassa 11.



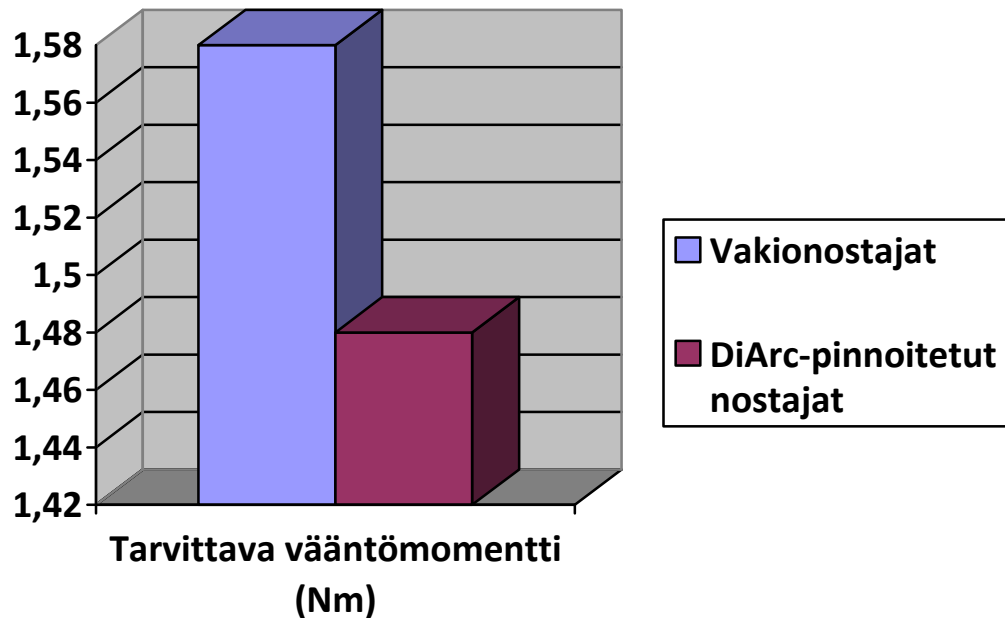
Kuva 11. Mittauksissa vaurioituneet timanttipinnoitetut venttiilinnostajat

Timanttipinnoitteiden mittaamista jatkettiin venttiilijousien mittaamisen jälkeen uudelleen, koska saatujen tuloksien perusteella voimien muuttuminen oli vähentynyt huomattavasti eli osat olivat hioutuneet toisiinsa paremmin. Vaurioituneet timanttipinnoitetut nostajat korvattiin uusilla. Tällä kertaa mittaus suoritettiin pienennetyllä laakeripukkien kiristysmomentilla sekä löysemmillä jousilla, jotta nostajien ja nokan välinen pintapaine saataisiin pienemmäksi ja pinnoite saataisiin säilymään ehjänä koko mittauksen ajan. Suoritetut mittaukset löytyvät mittauspöytäkirjoista 14 - 17. Toinen pinnoiteversio hylättiin näistä mittauksissa, koska se tuntui jo käsin käytettynä karhealta eikä koko kantta haluttu vaurioittaa alumiinia kuluttavalla pinnoitteella.

Ensimmäinen mittaus suoritettiin 1,8 kg/mm jousivakion jousilla, seitsemän newtonmetrin laakeripukkien kireydellä sekä neljää venttiiliä käyttäen. Pyöritysnopeus oli edelleen asetettuna suuremmaksi. Pyörityksen kolmen viimeisen syklin keskiarvoksi saatiin 480,7 grammaa eli noin 1,18 newtonmetriä. Pinnoitettujen nostajien tilalle vaihdettiin vakionostajat ja mittaus toistettiin. Tällä kertaa tulos oli 500,7 grammaa eli 1,22 newtonmetriä. Tulos haluttiin vielä varmistaa toisella kokoonpanolla, joten venttiilijouset vaihdettiin vakioihin, 3,8 kg/mm jousivakiolla oleviin jousiin. Vakionostajilla

tulokseksi saatiin 644 grammaa eli 1,58 newtonmetriä ja vastaavasti timanttipinnoitetuilla nostajilla 604,3 grammaa eli 1,48 newtonmetriä.

Timanttipinnoitetut venttiilinostajat pienensivät pyörittämiseen tarvittavaa momenttia pienemmällä jousivakiolla varustetuilla jousilla 0,04 newtonmetriä, joka tarkoittaa noin kolmea prosenttia mitatusta kokonaisvoimasta. Jäykemmällä jousilla vastaavat lukemat olivat puolestaan 0,1 newtonmetriä ja kuusi prosenttia. Vaikutus suurenee jäykemmällä jousilla, koska jäykemmät jouset aiheuttavat suuremman normaalivoiman pintoihin, jolloin kitkavoima suurenee. Samalla kitkan voittamiseen kuluvan momentin osuus suurenee verrattuna muihin esiintyviin häviöihin eli kitkan pieneneminen näkyy selvemmin. Pyörittämiseen tarvittavan vääntömomentin ero on esitetty graafisesti kuvassa 12.



Kuva 12. Timanttipinnoitteella saavutettava hyöty graafisesti esitettynä

9 YHTEENVETO

Tämän insinööriyön tavoitteiksi asetettiin venttiilikoneiston tehohäviöiden alkuperän selvittäminen sekä häviöiden pienentämismahdollisuuksien tutkiminen ja testaaminen. Lisäksi tehtävänä oli myös perehtyä koko moottorin mittaamisen vaatimuksiin ja menetelmiin.

Kokonaisen moottorin testaamiseen tarkoitettuihin päämenetelmiin tutustuttiin yleisesti sekä Morse-testiä kokeiltiin myös käytännössä. Moottoridynamometrissä käytetyn ajan rajallisuuden takia testistä ei kuitenkaan saatu mitään julkaisukelpoisia tuloksia, mutta periaate on esitetty työssä hyvin selkeästi, joten tulevaisuuden testejä varten tutkimuksesta saatu tieto on arvokasta.

Venttiilikoneiston testaamiseksi rakennettu testipenkki osoittautui ajateltua hankalammaksi toteuttaa, mutta lopulta se saatiin toimimaan tyydyttävällä tarkkuudella. Testipenkin ansiosta oli mahdollista kartoittaa moottorin venttiilikoneistossa syntyviä tehohäviöitä sekä määrittää eri komponenttien vaikutus häviöiden suuruuteen. Mittauksia haittasi uusista osista johtuva nopea kuluminen, joka sisäänajovaiheessa on kuitenkin täysin normaalia. Tästä kulumisesta johtuen mitattava voima muuttui ajoittain melko voimakkaastikin mittaussykliden lisääntyessä. Mittauksessa kannattaisikin käyttää mahdollisuuksien mukaan käytettyjä osia, jolloin laakerit ja muut liikkuvat osat ovat jo hioutuneet toisiinsa.

Timanttipinnoitteiden testaaminen onnistui myös ennako-odotuksia paremmin. Ennen mittauksien aloittamista pelkona oli, että testipenkin tarkkuus ei riitä timanttipinnoitteen vaikutuksen mittaamiseen. Tuloksista voidaan kuitenkin todeta, että timanttipinnoitteella saatiin parhaassa tapauksessa jopa kuuden prosentin pieneneminen pyörittämiseen tarvittavassa vääntömomentissa.

Mikäli venttiilikoneiston tutkimusta jatkettaisiin pidemmälle, tulisi testipenkkiin tehdä muutamia parannuksia. Öljypumppu tulisi vaihtaa paremmin paineen tuottamiseen sopivaan malliin, jotta mittaussykliä voitaisiin pidentää ilman pumpun ylikuumentumista. Lisäksi voiman mittausmenetelmä tulisi muuttaa erilaiseksi, jotta mittauksien tarkkuus saataisiin paremmalle tasolle. Kustannussyistä testipenkin voimamittaus toteutettiin nyt käyttäen tavallista teollisuusvaakaa. Sen reagoitinopeus ja tarkkuus ei kuitenkaan ole riittävä, mikäli halutaan tarkkailla hetkellisesti esiintyvien voimapulssien muutoksia.

Sähkömoottorin tukivoimaa voisi mitata tarkemmin esimerkiksi voima-anturilla tai venymäliuskalla, jolloin moottorin tuentaan ei tarvitsisi tehdä irtonaisia osia, mikä osaltaan parantaisi myös mittauksien toistettavuutta.

Tutkimuksen perusteella voidaankin todeta, että komponenttien testaaminen on hyvä menetelmä erillisiä osia tai osakokonaisuuksia tutkittaessa, mutta koko moottorin kartoittamiseen tarvitaan myös käyvän moottorin mittauksia. Tutkimuksen tuloksena saatiin arvokasta tietoa kilpa-autossa käytetyn Yamaha R6 -moottorin venttiilikoneiston häviöistä sekä eri komponenttien vaikutuksesta siihen. Lisäksi voidaan todeta, että tutkimukselle asetetut tavoitteet täytettiin ja tulokset olivat pääosin positiivisia.

VIITELUETTELO

- /1/ Ojanen, Mikko, Formula Student -kilpa-auton moottori ja tehonsiirto, Helsingin ammattikorkeakoulu Stadia, Auto- ja kuljetustekniikka. 2002.
- /2/ Yrjönen, Mikko, Formula Student -kilpa-auton moottorin ja voimansiirron jatkokehitys, Helsingin ammattikorkeakoulu Stadia, Auto- ja kuljetustekniikka. 2003.
- /3/ Törrönen, Marko, Formula Student -kilpa-auton moottorin suunnittelu, Helsingin ammattikorkeakoulu Stadia, Auto- ja kuljetustekniikka. 2004.
- /4/ Mäki, Erno, Formula Student -kilpa-auton moottori ja voimansiirto, Helsingin ammattikorkeakoulu Stadia, Auto- ja kuljetustekniikka. 2008.
- /5/ Ahonen, Ville, Formula Student -moottorin kehitystyö, Helsingin ammattikorkeakoulu Stadia, Auto- ja kuljetustekniikka. 2008.
- /6/ Society of Automotive Engineers, 2008 Formula Sae Rules. [verkkodokumentti, viitattu 10.5.2008]. Saatavissa <http://students.sae.org/competitions/formulaseries/rules/rules.pdf>
- /7/ Bowden, Frank Philip, The Friction and Lubrication of Solids. USA: Oxford University Press. 1986.
- /8/ Autoteknillinen taskukirja. 6. painos. Robert Bosch GmbH: Stuttgart. 2002.
- /9/ Parviainen, Heikki, Moottoritekniikan muistiinpanot. Helsingin Ammattikorkeakoulu Stadia, Tekniikka ja liikenne: Helsinki. 2004 - 2008.
- /10/ Bonnicksen, Allan, Automotive Science and Mathematics, Butterworth-Heinemann, 2008.
- /11/ CERAM Research, Materials A to Z. [verkkodokumentti, viitattu 10.11.2008]. Saatavissa <http://www.azom.com/Details.asp?ArticleID=623>
- /12/ Tapani Haikolan haastattelu. 20.4.2008. DiArc Technologies Oy.

Venttiilikoneiston testipenkin mittauspöytäkirja

Päivä 11.11.2008

Mittaus nro 1

Ilman lämpö 15 Öljyn lämpö 15 Öljynpaine 2 bar
Kannen lämpö 15Pyöritysnopeus 1 Tukipisteen etäisyys 0,25 m
Syklin pituus 15 s

Pyöritys	Voima(g)	Vääntö(Nm)	Huomiot
1	1180	2,90	Pyöritysmoottori pitää kovaa ääntä
2	1124	2,76	
3	1140	2,80	
4	1176	2,89	Öljypumpun jäähdytystauko, lämpötila 154C
5	1136	2,79	
6	1182	2,90	
Keskiarvo	1156,33	2,84	

Jousien jäykkyys 3,8 Kg/mm
 Venttiilien lkm 8
 Kiristysmomentti 10 Nm

Venttiilikoneiston testipenkin mittauspöytäkirja

Päivä 11.11.2008

Mittaus nro 2

Ilman lämpö 15 Öljyn lämpö 15 Öljynpaine 3 bar
Kannen lämpö 15Pyöritysnopeus 1 Tukipisteen etäisyys 0,25 m
Syklin pituus 15 s

Pyöritys	Voima(g)	Vääntö(Nm)	Huomiot
1	1150	2,82	
2	1119	2,75	
3	1132	2,78	
4	1124	2,76	Öljypumpun jäähdytystauko
5	1119	2,75	
6	1170	2,87	
Keskiarvo	1135,67	2,79	

Jousien jäykkyys	3,8	Kg/mm
Venttiilien lkm	8	
Kiristysmomentti	10	Nm

Venttiilikoneiston testipenkin mittauspöytäkirja

Päivä 11.11.2008

Mittaus nro 3

Ilman lämpö 15 Öljyn lämpö 15 Öljynpaine 5 bar

Kannen lämpö 15

Pyöritysnopeus 1 Tukipisteen etäisyys 0,25 m

Syklin pituus 15 s

Pyöritys Voima(g) Väätö(Nm) Huomiot

Pyöritys	Voima(g)	Väätö(Nm)	Huomiot
1	1132	2,78	
2	1116	2,74	
3	1123	2,76	
Keskiarvo	1123,67	2,76	

Jousien jäykkyys 3,8 Kg/mm

Venttiilien lkm 8

Kirstysmomentti 10 Nm

Venttiilikoneiston testipenkin mittauspöytäkirja

Päivä 11.11.2008

Mittaus nro 4

Ilman lämpö 15 Öljyn lämpö 15 Öljynpaine 0,5 bar

Kannen lämpö 15

Pyöritysnopeus 1 Tukipisteen etäisyys 0,25 m

Syklin pituus 15 s

Pyöritys Voima(g) Väätö(Nm) Huomiot

Pyöritys	Voima(g)	Väätö(Nm)	Huomiot
1	1112	2,73	
2	1093	2,68	
3	1098	2,70	
Keskiarvo	1101	2,70	

Jousien jäykkyys 3,8 Kg/mm

Venttiilien lkm 8

Kirstysmomentti 10 Nm

Venttiilikoneiston testipenkin mittauspöytäkirja

Päivä 16.11.2008

Mittaus nro 5

Ilman lämpö 15 Öljyn lämpö 15 Öljynpaine 1 bar
Kannen lämpö 15Pyöritysnopeus 1 Tukipisteen etäisyys 0,25 m
Syklin pituus 15 s

Pyöritys	Voima(g)	Vääntö(Nm)	Huomiot
1	890	2,18	
2	878	2,16	
3	882	2,17	
Keskiarvo	883,33	2,17	

Jousien jäykkyys	3,8	Kg/mm
Venttiilien lkm	4	
Kiristysmomentti	10	Nm

Venttiilikoneiston testipenkin mittauspöytäkirja

Päivä 16.11.2008

Mittaus nro 6

Ilman lämpö 15 Öljyn lämpö 15 Öljynpaine 1 bar
Kannen lämpö 15Pyöritysnopeus 2 Tukipisteen etäisyys 0,25 m
Syklin pituus 10 s

Pyöritys	Voima(g)	Vääntö(Nm)	Huomiot
1	753	1,85	Mittaus tasoittui huomattavasti
2	731	1,79	
3	722	1,77	
4	710	1,74	
5	713	1,75	
6	708	1,74	
Keskiarvo	710,33	1,74	

Jousien jäykkyys 3,8 Kg/mm
 Venttiilien lkm 4
 Kiristysmomentti 10 Nm

Venttiilikoneiston testipenkin mittauspöytäkirja

Päivä 16.11.2008

Mittaus nro 7

Ilman lämpö 15 Öljyn lämpö 15 Öljynpaine 1 bar
Kannen lämpö 15Pyöritysnopeus 2 Tukipisteen etäisyys 0,25 m
Syklin pituus 10 s

Pyöritys Voima(g) Vääntö(Nm) Huomiot

Pyöritys	Voima(g)	Vääntö(Nm)	Huomiot
1	751	1,84	Timanttipinnoite evo1
2	728	1,79	
3	711	1,75	
4	692	1,70	
5	695	1,71	
6	688	1,69	
			1. nostajasta pinnoite irti laelta
Keskiarvo	691,67	1,70	

Jousien jäykkyys 3,8 Kg/mm

Venttiilien lkm 4

Kirstysmomentti 10 Nm

Venttiilikoneiston testipenkin mittauspöytäkirja

Päivä 16.11.2008

Mittaus nro 8

Ilman lämpö 15 Öljyn lämpö 15 Öljynpaine 1 bar
Kannen lämpö 15Pyöritysnopeus 2 Tukipisteen etäisyys 0,25 m
Syklin pituus 10 s

Pyöritys Voima(g) Vääntö(Nm) Huomiot

Pyöritys	Voima(g)	Vääntö(Nm)	Huomiot
1	731	1,79	Timanttipinnoite evo2
2	719	1,77	
3	692	1,70	
4	673	1,65	
5	668	1,64	
6	671	1,65	
			3. nostajasta pinnoite irti laelta
Keskiarvo	670,67	1,65	Helmoissa jälkiä. Alumiinia?

Jousien jäykkyys 3,8 Kg/mm

Venttiilien lkm 4

Kirstysmomentti 10 Nm

Venttiilikoneiston testipenkin mittauspöytäkirja

Päivä 16.11.2008

Mittaus nro 9

Ilman lämpö 15 Öljyn lämpö 15 Öljynpaine 1 bar
Kannen lämpö 15Pyöritysnopeus 2 Tukipisteen etäisyys 0,25 m
Syklin pituus 10 s

Pyöritys Voima(g) Vääntö(Nm) Huomiot

Pyöritys	Voima(g)	Vääntö(Nm)	Huomiot
1	691	1,70	Vakionostajat, referenssi
2	672	1,65	
3	641	1,57	
4	628	1,54	
5	632	1,55	
6	631	1,55	
			Voimat pienentyneet 3 mittauksessa 70g
Keskiarvo	630,33	1,55	

Jousien jäykkyys 3,8 Kg/mm
Venttiilien lkm 4
Kirstysmomentti 10 Nm

Venttiilikoneiston testipenkin mittauspöytäkirja

Päivä 16.11.2008

Mittaus nro 11

Ilman lämpö 15 Öljyn lämpö 15 Öljynpaine 1 bar
Kannen lämpö 15Pyöritysnopeus 2 Tukipisteen etäisyys 0,25 m
Syklin pituus 10 s

Pyöritys Voima(g) Vääntö(Nm) Huomiot

Pyöritys	Voima(g)	Vääntö(Nm)	Huomiot
1	553	1,36	Juokset vaihdettu löysempiin
2	527	1,29	Vakionostajat
3	508	1,25	
4	496	1,22	
5	487	1,20	
6	492	1,21	
Keskiarvo	491,67	1,21	

Jousien jäykkyys 1,3 Kg/mm
Venttiilien lkm 4
Kivistysmomentti 10 Nm

Venttiilikoneiston testipenkin mittauspöytäkirja

Päivä 16.11.2008

Mittaus nro 12

Ilman lämpö 15 Öljyn lämpö 15 Öljynpaine 1 bar
Kannen lämpö 15Pyöritysnopeus 2 Tukipisteen etäisyys 0,25 m
Syklin pituus 10 s

Pyöritys Voima(g) Vääntö(Nm) Huomiot

Pyöritys	Voima(g)	Vääntö(Nm)	Huomiot
1	521	1,28	Pukit kiristetty 7Nm
2	508	1,25	Vakionostajat
3	482	1,18	
4	467	1,15	
5	473	1,16	
6	471	1,16	
Keskiarvo	470,33	1,15	

Jousien jäykkyys 1,3 Kg/mm
Venttiilien lkm 4
Kiristysmomentti 7 Nm

Venttiilikoneiston testipenkin mittauspöytäkirja

Päivä 16.11.2008

Mittaus nro 12

Ilman lämpö 15 Öljyn lämpö 15 Öljynpaine 1 bar
 Kannen lämpö 15

Pyöritysnopeus 2 Tukipisteen etäisyys 0,25 m
 Syklin pituus 10 s

Pyöritys	Voima(g)	Vääntö(Nm)	Huomiot
1	521	1,28	Pukit kiristetty 7Nm
2	508	1,25	Vakionostajat
3	482	1,18	
4	467	1,15	
5	473	1,16	
6	471	1,16	
Keskiarvo	470,33	1,15	

Jousien jäykkyys 1,3 Kg/mm
 Venttiilien lkm 4
 Kiristysmomentti 7 Nm

Venttiilikoneiston testipenkin mittauspöytäkirja

Päivä 16.11.2008

Mittaus nro 13

Ilman lämpö 15 Öljyn lämpö 15 Öljynpaine 1 bar
Kannen lämpö 15Pyöritysnopeus 2 Tukipisteen etäisyys 0,25 m
Syklin pituus 10 s

Pyöritys Voima(g) Vääntö(Nm) Huomiot

Pyöritys	Voima(g)	Vääntö(Nm)	Huomiot
1	463	1,14	Pukit kiristetty 7Nm
2	447	1,10	Timanttipinnoite evo1
3	413	1,01	
4	404	0,99	
5	397	0,97	
6	401	0,98	
Keskiarvo	400,67	0,98	

Jousien jäykkyys 1,3 Kg/mm

Venttiilien lkm 4

Kiristysmomentti 7 Nm

Venttiilikoneiston testipenkin mittauspöytäkirja

Päivä 19.11.2008

Mittaus nro 14

Ilman lämpö 15 Öljyn lämpö 15 Öljynpaine 1 bar
Kannen lämpö 15Pyöritysnopeus 2 Tukipisteen etäisyys 0,25 m
Syklin pituus 10 s

Pyöritys Voima(g) Vääntö(Nm) Huomiot

Pyöritys	Voima(g)	Vääntö(Nm)	Huomiot
1	621	1,52	Pinnoite evo1
2	532	1,31	Aloitusermittaus, referenssi
3	501	1,23	
4	481	1,18	
5	480	1,18	
6	481	1,18	
Keskiarvo	480,67	1,18	

Jousien jäykkyys 1,3 Kg/mm
Venttiilien lkm 4
Kirstysmomentti 7 Nm

Venttiilikoneiston testipenkin mittauspöytäkirja

Päivä 19.11.2008

Mittaus nro 15

Ilman lämpö 15 Öljyn lämpö 15 Öljynpaine 1 bar
Kannen lämpö 15Pyöritysnopeus 2 Tukipisteen etäisyys 0,25 m
Syklin pituus 10 s

Pyöritys Voima(g) Vääntö(Nm) Huomiot

Pyöritys	Voima(g)	Vääntö(Nm)	Huomiot
1	603	1,48	Vakionostajat
2	532	1,31	
3	503	1,23	
4	501	1,23	
5	499	1,23	
6	502	1,23	
Keskiarvo	500,67	1,23	

Jousien jäykkyys 1,3 Kg/mm
Venttiilien lkm 4
Kirstysmomentti 7 Nm

Venttiilikoneiston testipenkin mittauspöytäkirja

Päivä 19.11.2008

Mittaus nro 16

Ilman lämpö 15 Öljyn lämpö 15 Öljynpaine 1 bar
Kannen lämpö 15Pyöritysnopeus 2 Tukipisteen etäisyys 0,25 m
Syklin pituus 10 s

Pyöritys Voima(g) Vääntö(Nm) Huomiot

Pyöritys	Voima(g)	Vääntö(Nm)	Huomiot
1	695	1,71	Jouset vaihdettu
2	672	1,65	Vakionostajat
3	664	1,63	
4	642	1,58	
5	647	1,59	
6	643	1,58	
Keskiarvo	644,00	1,58	

Jousien jäykkyys 3,8 Kg/mm
Venttiilien lkm 4
Kivistysmomentti 7 Nm

Venttiilikoneiston testipenkin mittauspöytäkirja

Päivä 19.11.2008

Mittaus nro 17

Ilman lämpö 15 Öljyn lämpö 15 Öljynpaine 1 bar
Kannen lämpö 15Pyöritysnopeus 2 Tukipisteen etäisyys 0,25 m
Syklin pituus 10 s

Pyöritys Voima(g) Vääntö(Nm) Huomiot

Pyöritys	Voima(g)	Vääntö(Nm)	Huomiot
1	722	1,77	Jouset vaihdettu
2	664	1,63	Pinnoite evo1
3	643	1,58	
4	609	1,50	
5	601	1,48	
6	603	1,48	
Keskiarvo	604,33	1,48	

Jousien jäykkyys 3,8 Kg/mm
Venttiilien lkm 4
Kirstysmomentti 7 Nm

Venttiilikoneiston testipenkin mittauspöytäkirja

Päivä 19.11.2008

Mittaus nro 18

Ilman lämpö 15 Öljyn lämpö 15 Öljynpaine 1 bar
Kannen lämpö 15Pyöritysnopeus 2 Tukipisteen etäisyys 0,25 m
Syklin pituus 10 s

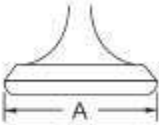
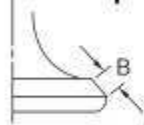
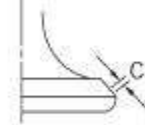
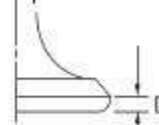
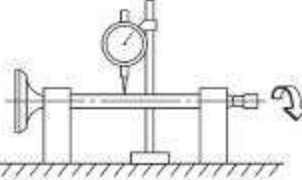
Pyöritys Voima(g) Vääntö(Nm) Huomiot

Pyöritys	Voima(g)	Vääntö(Nm)	Huomiot
1	1608	3,95	8 venttiiliä käytössä
2	1270	3,12	Vakioasetus
3	1108	2,72	
4	2108	5,18	
5	1223	3,00	
6	2205	5,41	
Keskiarvo	1845,33	4,53	

Jousien jäykkyys 3,8 Kg/mm
Venttiilien lkm 8
Kirstysmomentti 10 Nm

ENGINE SPECIFICATIONS

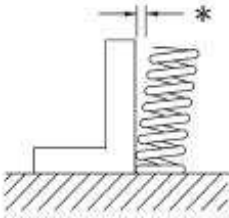



Item	Standard	Limit	
Timing chain			
Model/number of links	RH2015/120	...	
Tensioning system	Automatic	...	
Valves, valve seats, valve guides			
Valve clearance (cold)			
Intake	0.13 ~ 0.20 mm (0.0051 ~ 0.0079 in)	...	
Exhaust	0.23 ~ 0.30 mm (0.0091 ~ 0.0118 in)	...	
Valve dimensions			
			
Head Diameter	Face Width	Seat Width	Margin Thickness
Valve head diameter A			
Intake	24.9 ~ 25.1 mm (0.9803 ~ 0.9882 in)		...
Exhaust	21.9 ~ 22.1 mm (0.8622 ~ 0.8701 in)		...
Valve face width B			
Intake	1.14 ~ 1.98 mm (0.0449 ~ 0.0780 in)		...
Exhaust	1.14 ~ 1.98 mm (0.0449 ~ 0.0780 in)		...
Valve seat width C			
Intake	0.9 ~ 1.1 mm (0.0354 ~ 0.0433 in)		1.6 mm (0.06 in)
Exhaust	0.9 ~ 1.1 mm (0.0354 ~ 0.0433 in)		1.6 mm (0.06 in)
Valve margin thickness D			
Intake	0.6 ~ 0.8 mm (0.0236 ~ 0.0315 in)		0.5 mm (0.02 in)
Exhaust	0.6 ~ 0.8 mm (0.0236 ~ 0.0315 in)		0.5 mm (0.02 in)
Valve stem diameter			
Intake	3.975 ~ 3.990 mm (0.1565 ~ 0.1571 in)		3.95 mm (0.1555 in)
Exhaust	3.960 ~ 3.975 mm (0.1559 ~ 0.1565 in)		3.935 mm (0.1549 in)
Valve guide inside diameter			
Intake	4.000 ~ 4.012 mm (0.1575 ~ 0.1580 in)		4.042 mm (0.1591 in)
Exhaust	4.000 ~ 4.012 mm (0.1575 ~ 0.1580 in)		4.042 mm (0.1591 in)
Valve-stem-to-valve-guide clearance			
Intake	0.010 ~ 0.037 mm (0.0004 ~ 0.0015 in)		0.08 mm (0.0031 in)
Exhaust	0.025 ~ 0.052 mm (0.0010 ~ 0.0020 in)		0.10 mm (0.0039 in)
Valve stem runout	...		0.04 mm (0.0016 in)
			
Valve seat width			
Intake	0.9 ~ 1.1 mm (0.0354 ~ 0.0433 in)		1.6 mm (0.06 in)
Exhaust	0.9 ~ 1.1 mm (0.0354 ~ 0.0433 in)		1.6 mm (0.06 in)

ENGINE SPECIFICATIONS

SPEC



Item	Standard	Limit
Valve springs		
Free length		
Intake (Inner)	35.7 mm (1.41 in)	33.9 mm (1.33 in)
(outer)	40.3 mm (1.59 in)	38.3 mm (1.50 in)
Exhaust	41.7 mm (1.64 in)	39.6 mm (1.56 in)
Installed length (valve closed)		
Intake (Inner)	30 mm (1.18 in)	...
(outer)	32.5 mm (1.28 in)	...
Exhaust	36.1 mm (1.42 in)	...
Compressed spring force (installed)		
Intake (Inner)	61.5 ~ 70.7 N (6.27 ~ 7.21 kg, 13.83 ~ 15.89 lb)	...
(outer)	139.1 ~ 160.1 N (14.18 ~ 16.33 kg, 31.27 ~ 35.99 lb)	...
Exhaust	160 ~ 184 N (16.32 ~ 18.76 kg, 35.97 ~ 41.36 lb)	...
Spring tilt		
		
Intake (Inner)	...	2.5° / 1.6 mm (0.06 in)
(outer)	...	2.5° / 1.8 mm (0.07 in)
Exhaust	...	2.5° / 1.8 mm (0.07 in)
Winding direction (top view)		
Intake (Inner)	Counter clockwise	...
(outer)	Clockwise	...
Exhaust	Clockwise	...
		
Cylinders		
Cylinder arrangement	Forward-inclined, parallel 4-cylinder	...
Bore × stroke	65.5 mm × 44.5 mm (2.58 × 1.75 in)	...
Compression ratio	12.4 : 1	...
Bore	65.50 ~ 65.51 mm (2.5787 ~ 2.5791 in)	...
Max. out-of-round	...	0.05 mm (0.002 in)