

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU
Auto- ja kuljetustekniikan koulutusohjelma
Auto- ja korjaamotekniikka

Opinnäytetyö

Teemu Kalliomäki

MOOTTORITEHODYNAMOMETRIN SUUNNITTELU JA RAKENTAMINEN

Työn ohjaaja
Työn teettäjä
Tampere 2008

Tekniikan lisensiaatti Tauno Kulojärvi
Tampereen ammattikorkeakoulun autolaboratorio

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU

Auto- ja kuljetustekniikan koulutusohjelma

Auto- ja korjaamotekniikka

Teemu Kalliomäki Moottoritehdynamometrin suunnittelu ja rakentaminen

Opinnäytetyö 39 sivua

Työn ohjaaja TkL Tauno Kulojärvi

Työn teettäjä Tampereen ammattikorkeakoulun autolaboratorio

Toukokuu 2008

Hakusanat Moottoritehdynamometri, Froude,

TIIVISTELMÄ

Työn aiheena oli ottaa uudelleen käyttöön Tampereen ammattikorkeakoulun autolaboratoriossa oleva moottoridynamometri. Moottoridynamometri on ollut autolaboratorion käytössä jo aiemmin 90-luvulla, mutta rikkoutumisen vuoksi sen käyttö oli lopetettu. Moottoridynamometrin yhteydessä olevia ohjain- ja tiedonkeruulaitteistoja oli kadonnut ajan kuluessa, joten käyttöä ei voitu jatkaa, vaikka itse moottoridynamometri korjattiinkin.

Työssä käytettiin edellisen vuoden opiskelijan Henri Ekolan suunnittelemaa ja rakentamaa alustaa, jolle moottoridynamometri ja itse testattava moottori asetettiin. Toimiakseen moottoridynamometri ja moottori vaativat kuitenkin asianmukaisen kiinnityksen, jäähdytysjärjestelmän sekä pakokaasujen poistojärjestelmän ja erityisen voimansiirron moottorilta moottoridynamometrille. Tässä työssä suunniteltiin ja rakennettiin edellä mainitut osa-alueet siten, että saatiin toimiva moottorintestausjärjestelmä autolaboratorion käyttöön.

TAMPERE POLYTECHNIC

Automobile and transport technics education program

Automobile and workshop technic

Teemu Kalliomäki Designing and construction of an engine dynamometer

Examination work 39 pages

Supervisor Lic. Techn. Tauno Kulojärvi

Commissioned by Tampere Polytechnic automobile laboratory

May 2008

Keywords Eddy current dynamometer, Froude

ABSTRACT

Subject of this work was reconstruction of an engine dynamometer. Tampere Polytechnics automobile laboratory has already the old eddy-current brake which has gone broke about ten years ago. Before that it was in use, but after when it get broken all of its accessories has disappeared. The university has bought new controller to the dynamometer at winter 2007. Our teachers decide that the dynamometer will be in use again in this spring. That was good and interesting opportunity to do my examination work.

My examination work was one part of this project and there were two other students who also made them examination works with this project. My part in this project was designing and making of water cooling, transmission and engine installation. Two other examination works include engine control system and dynamometer control system. In year 2007 Tampere Polytechnics student Henri Ekola made excellent frame to dynamometer, we have had use that frame in this project.

In future the engine dynamometer will be situated in automobile laboratory, where students can make with it many interesting tests.

ALKUSANAT

Opinnäytetyöni on tehty Tampereen ammattikorkeakoulun autolaboratoriolle. Autolaboratorio tarjosi opinnäytetyöni aiheen, jossa toteutettiin moottoridynamometrin käyttöönotto. Projekti alkoi vuoden 2007 marraskuussa. Moottoridynamometrin käyttöönotosta tehtiin kolme eri opinnäytetyötä, joista minun työni oli yksi. Työni käsitti moottorintuennan, jäähdytysjärjestelmän ja voimansiirron suunnittelun ja toteutuksen. Projektista tehdyissä kahdessa muussa työssä toisessa käsiteltiin moottorinohjausta ja toisessa moottoridynamometrinohjausta ja tiedonkeruuta.

Työn ohjaajina toimivat Tampereen ammattikorkeakoululta Tekniikan Lisensiaatti Tauno Kulojärvi ja laboratorioinsinööri Jari Seppälä. Tauno Kulojärvi antoi ohjeita suunnitteluun ja Jari Seppälä autolaboratorioinsinöörinä oli apuna rakentamisessa. Hän hoiti myös tarvikelaukset ja materiaalihankinnat. Kiitän kaikkia ohjaajia. Kiitos kuuluu myös laboratorioinsinööri Jarmo ”Jammi” Lehtoselle.

Suurimmat kiitokset osoitan kuitenkin opiskelijaystävilleni Tuomas Manniselle ja Panu Vidqvistille, jotka myös tekivät omat opinnäytetyönsä tässä projektissa. Ryhmän apu oli korvaamaton ja monesti tarpeen.

Tampereella 9. toukokuuta 2008

Teemu Kalliomäki

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ ABSTRACT ALKUSANAT

SISÄLLYSLUETTELO.....	5
SYMBOLEIDEN JA MERKKIEN SELITYKSET	6
1 JOHDANTO	7
1.1. TYÖN TAVOITTEET	7
1.2. TYÖN MÄÄRITYS.....	7
1.3 ALKUTILANNE	7
3 FROUDE-MOOTTORIDYNAMOMETRI.....	9
3.1 TEKNISET TIEDOT	9
3.2. TOIMINTAPERIAATE	9
3.2 LISÄVARUSTEET	10
4 MOOTTORI.....	11
4.1 TEKNISET TIEDOT	11
4.2 LISÄLAITTEET	11
5 TARVIKEHANKINNAT	13
6 VOIMANSIIRTO	14
6.1 KYTKIN.....	14
6.2 AKSELLI.....	17
6.3 KYTKIMIEN KIINNITYSLAIPAT	19
7 MOOTTORIN TUENTA.....	21
7.1 MOOTTORIN VÄÄNTÖMOMENTIN AIHEUTTAMA KUORMITUS KIINNIKKEISIIN.....	21
7.2 TAKAPÄÄN TUENTA	23
7.3 ETUPÄÄN TUENTA.....	25
8 JÄÄHDYTYSJÄRJESTELMÄ	27
8.1 MOOTTORI	28
8.2 MOOTTORIDYNAMOMETRI.....	30
8.3 MOOTTORIDYNAMOMETRIN JÄÄHDYTYSJÄRJESTELMÄN RAKENNE	33
8.4 JÄÄHDYTYSSTEHO SALLIMA MOOTTORITEHO.....	34
9 PAKOKAASUJEN POISTOJÄRJESTELMÄ.....	35
10 JÄRJESTELMÄN LIIKUTELTAVUUS JA TUENTA.....	36
12 VAROTOIMENPITEET	37
13 YHTEENVETO	38
LÄHDELUETTELO.....	39

SYMBOLEIDEN JA MERKKIEN SELITYKSET

kg	kilogramma
Pa	Pascal, paineen yksikkö 1 N/m ²
kW	kilowatti, 1,361 hevosvoimaa
Hv	hevosvoima, 0,735 kilowattia
N	newton, SI-järjestelmän voiman yksikkö
rpm	kierrosnopeus, kierrosta minuutissa
°C	astetta Celsiusta
Nm	newtonmetri, vääntömomentin yksikkö

1 JOHDANTO

1.1. Työn tavoitteet

Työn tavoitteena on saada Tampereen ammattikorkeakoulun autolaboratorioon oppilaiden käyttöön moottorintestaus- ja tehonmittauslaite. Koululla on ollut jo aikaisemminkin moottorin tehonmittauslaitteita, mutta ne ovat kadonneet koululla tehdyn remontin aikana. Entisistä laitteista jäljellä on vain Froude-moottoridynamometri, ilman ohjauslaitteita. Työn tavoitteena on tämän moottoridynamometrin uudelleen käyttöönotto.

1.2. Työn määrittäminen

Moottoridynamoprojekti on aloitettu Tampereen ammattikorkeakoululla jo vuonna 2007, jolloin insinööriopiskelija Henri Ekola oli suunnitellut ja valmistanut alustan moottoria ja moottoridynamometriä varten. Projekti haluttiin kuitenkin saada loppuun asti valmiiksi. Minulle tarjottiinkin mahdollisuutta olla mukana projektin kolmen opiskelijan ryhmässä, koska työ on liian laaja vain yhden opiskelijan tehtäväksi. Lisäksi määritettiin myös, että tehonmittauslaite sijoitettaisiin koulun autolaboratorioon ja sen käytön yhteydessä fysiikanlaboratorio voisi tehdä pakokaasujen hiukkasmittauksia omilla laitteillaan.

1.3 Alkutilanne

Projekti käynnistettiin tilanteessa, jossa moottoridynamometriin on tilattu jo ohjainlaite ja tiedonkeruujärjestelmä. Koulu on saanut myös lahjoituksena Hondan koulutuskäytöstä kaksi käyttämätöntä moottoria, yhden bensiinimoottorin ja yhden dieselmootorin. Dieselmootorissa on myös vaihdelaatikko asennettuna, jolloin oli tarkoitus suorittaa mittauksia ja rakentaa tuenta siten, että vaihteisto on liitetty moottoriin. Moottoridynamometrin maksimi jarrutusmomentti olisi kuitenkin saattanut ylittyä, koska vaihteisto kasvattaa moottorin tuottamaa vääntömomenttia. Päätettiin, että vääntömomentti siirretään moottorin vauhtipyörältä akselin välityksellä moottoridynamometrille. Alun perin oli myös

tarkoitus käyttää kumpaakin moottoria vuorotellen tehonmittauksessa, mutta moottorien vaihto ja sovitus olisi ollut liian aikaa vievää, joten päädyttiin käyttämään vain bensiinimoottoria. Moottorinohjaukseen käytetään tamperelaisen Tatechin valmistamaa säädettävää moottorinohjainta. Bensamoottori asennetaan Henri Ekolan tekemällä alustalle, mutta sitä joudutaan kuitenkin muokkaamaan, koska se on alun perin tehty isommalle moottorille.

3 FROUDE-MOOTTORIDYNAMOMETRI

3.1 Tekniset tiedot

Froude-moottoridynamometrillä mitataan moottorin vääntömomenttia ja pyörimisnopeutta. Mittauksissa tulee ottaa huomioon valmistajan ilmoittamat tekniset tiedot /1/.

Mallinimi	EC TA 38
Maksimi jarrutusteho	165 kW
Maksimi jarrutusmomentti	475 Nm
Massa	n. 300 kg
Jäähdytysveden maksimi lämpötila	60 °C

3.2. Toimintaperiaate

Moottoridynamometri EC TA 38 on toimintaperiaatteeltaan pyörrevirtajarru. Käytettävältä moottorilta tuleva vääntömomentti välitetään moottoridynamometrin akselille, jonka päässä on akseliin kiinteästi liitetty hammastettu roottori. Roottori pyörii akselin kanssa samaa nopeutta koteloituna staattoriin. Staattori muodostuu kahdesta ympyränmuotoisesta käämistä, jotka on sijoitettu koteloon, mikä taas on laakeroitu liikkuvaksi saman akselin ympäri kuin roottorikin. Roottorin pyöriessä staattorin käämeihin johdetaan sähkövirta, joka saa aikaan magneettikentän, joka vaikuttaa roottoriin. Magneettivuo, joka kulkee roottorin läpi indusoi siihen jännitteen. Jännite saa aikaiseksi roottorissa olevien vapaiden elektronien liikkeen, josta muodostuu pyörteinen virta. Pyörrevirrat synnyttävät magneettikentän, joka vastustaa magneettivuon kasvamista. Näin syntyy voima, joka vaikuttaa roottorin pyörimisliikkeen vastaisesti. Magneettikenttien aiheuttamien voimien vaikutuksesta staattorikotelo kääntyy vasten voima-antureita. Voima-antureihin vaikuttavan voiman avulla lasketaan vääntömomentti. Kun tiedetään vääntömomentti ja pyörimisnopeus pystytään laskemaan moottorin teho /2/.

3.2 Lisävarusteet

Pyörrevirtajarru vaatii toimiakseen sähkövirtaa. Sähkövirta otetaan sähköverkosta edelleen dynamometrin ohjainlaitteeseen ja virtalähteeseen. Ohjainlaitteesta sähkövirta johdetaan virtalähteeseen, josta tapahtuu ohjainlaitteen määrittämän tietyn suuruisen virran kulku staattorin käämeihin. Virta on suuruudeltaan 0–5 A. Ohjainlaite työskentelee samalla myös tietojenkeruulaitteena. Ohjainlaite (kuva 1) oli projektin kallein hinnaltaan noin 20 000 euroa. Se sisältää paljon elektroniikkaa ja sen kovalevyllä on tallennettu esimerkiksi valmiiksi ohjelmoituja kuormitusajoja. Lisälaitteisiin kuuluu myös moottorin kaasuläpänohjain, joka on liitetty ohjainlaitteeseen ja moottorin kaasuläppään (kuva 2). Kuormitusajon aikana ohjainlaite muuttaa automaattisesti moottorin kaasuläpän asentoa halutun kuormituksen mukaisesti. Moottoridynamometrin ohjauksesta kerrotaan tarkemmin Panu Vidqvistin tekemässä opinnäytetyössä /3/.



Kuva 1 Dynamometrin ohjainlaite



Kuva 2 Kaasuläpänohjain

4 MOOTTORI

Jarrudynamometriin kytketty moottori (kuva 3 ja 4) on bensiinillä toimiva 4-sylinterinen, vapaasti hengittävä Hondan valmistava polttomoottori. Moottori on sylinteritilavuudeltaan 1590 kuutiosenttimetriä. Moottorista on purettu pois tarpeettomana ohjaustehostimen pumppu sekä ilmastoinnin kompressori. Alkuperäinen katalysaattori on korvattu tarvikekatalysaattorilla, ja pakoputkistoon on lisätty toinen lambda-anturi, joka on sijoitettu pakoputkistoon katalysaattorin jälkeen. Jälkimmäistä lambda-anturia ei käytetä avuksi moottorin seossuhteen säädössä, vaan se on asennettu opetuskäyttöä ajatellen.

4.1 Tekniset tiedot

Valmistajan ilmoittamat tekniset tiedot /9/.

Iskutilavuus	1590 ccm
Maksimi teho	77 kW/6200 rpm
Maksimi vääntömomentti	135 Nm/3400 rpm

4.2 Lisälaitteet

Polttoaineen elektronisella suihkutuksella ja elektronisella sytytysjärjestelmällä varustettu moottori tarvitsee toimiakseen moottorinohjaimen. Moottorinohjain sisältää esimerkiksi piirilevyn, pääteasteita sekä tärkeimpänä osanaan muistipiirin, johon tiedot on tallennettu. Tallennettu tieto käsittää valmiiksi moottorille tehdyn ohjelman, niin sanotun kartaston. Kartasto sisältää sytytys- ja polttoainekartan. Vakiomoottorissa kartastot on usein tehty tavoitellen taloudellisuutta ja vähäpäästöisyyttä. Silloin kuitenkin, kun tavoitellaan maksimitehoa ja suurta vääntömomenttia, on karttojen muokkaaminen tarpeen. Vapaasti hengittävässä moottorissa karttojen muokkauksella ei yleensä saada huomattavaa hyötyä verrattuna ahdettuihin moottoreihin /4/. Moottorinohjaimeksi valittiin Tatechin valmistama ja ohjelmoima ohjain.

Moottorinohjain saa tiedon moottorin alkuperäisiltä antureilta, mutta ohjainlaite ja johtosarja on valmistettu tätä moottoria varten.

Moottorinohjain aihetta tässä projektissa käsittelee tarkemmin Tuomas Manninen.



Kuva 3 Moottori vasemmalta



Kuva 4 Moottori oikealta

5 TARVIKEHANKINNAT

Moottoridynamometriprojektia aloitettaessa oli oppilaitoksella valmiina jo alusta, jarrunohjain ja moottori. Moottorintehon mittausjärjestelmä tarvitsee kuitenkin paljon muitakin tarvikkeita toimiakseen. Seuraavaan listaan on koottu tärkeimpiä tarvikkeita helpottamaan kokonaisuuden hahmottamista sekä mahdollisesti helpottamaan samanlaista projektia suunnittelevia:

joustokytkin
kytkimen liitoslaipat
voimansiirron akseli
moottorin värinäneristimet
moottorin säädettävät kiinnityskorvakkeet
moottorin jäähdytys/lämmönvaihdin
dynamometrin jäähdytys/lämmönvaihdin
vesipumppu
vesiletkut
paineanturi
virtausanturi
lämpöanturi
lämpömittari moottorille ja dynamometrille
johtosarjat
akku 12 V
polttoainesäiliö
polttoainepumppu
pakoputkisto
katalysaattori.

6 VOIMANSIIRTO

Kuormitettava moottori ja moottoridynamometri on kytketty toisiinsa kiinteällä voimansiirrolla eli voimansiirto ei sisällä irroituskytintä. Kiinteä kytkeminen vaatii toimiakseen joustokytkimen, sillä voimansiirron linjauksen suuntavirheet sekä moottorin liikkuminen tuennassaan edellyttävät joustoa voimansiirrossa. Joustava kytkin voidaan sijoittaa joko moottorin vauhtipyörään, keskelle voimansiirtoakselia tai moottoridynamometrin vauhtipyörään. Alun perin oli tarkoitus hankkia kytkin, joka sijoitetaan moottorin vauhtipyörään. Vauhtipyörän pieni halkaisija aiheutti sen, että kytkin olisi jouduttu teettämään, jolloin toimitusaika ja hinta olisivat muodostuneet ongelmaksi. Siksi päädyttiin kytkinmalliin, jossa joustoelementtejä on kaksi. Toinen kiinnitettiin moottorin vauhtipyörään ja toinen moottoridynamometrin laippaan. Elementtien välille asennettiin voimansiirron jäykkä teräsakseli. Moottorin tuottama vääntömomentti siirtyy moottorilta moottoridynamometriin seuraavaa reittiä pitkin: vauhtipyörä–kumielementti–keskinapa–akseli–keskinapa–kumielementti–laippa. Kumielementtien liitos vauhtipyörään sekä kumielementtien liitos keskinapaan on toteutettu ruuviliitoksilla. Akseli on liitetty keskinapoihin kartioholkeilla.

6.1 Kytkin

Joustavat kytkimet hankittiin SKS Oy:ltä. Kumielementit (kuva 5) ovat valmistettu silikonikumista. Silikonikumin ominaisuuksina on hyvä lämmön kesto, noin 130 °C ja sitkeyden ansiosta hyvä kyky välittää vääntömomenttia murtumatta. Kytkin elementin sallittu maksimipyörimisnopeus on 6000 rpm /5/.



Kuva 5 Kytkimen joustoelementti

Kumielementti kiinnitettiin vauhtipyörään M12-ruuvien avulla kuvassa 6 näkyvien neljän aksiaalisuuntaisen kiinnitysreiän lävitse. Ruuvien kiinnitys varmistettiin kierrelukitteella. Kumielementin sisäpuolelle asennettiin keskinapa. Keskinapa kiinnitettiin kumielementtiin M12-ruuveilla ja kiinnitys varmistettiin kierrelukitteella.



Kuva 6 Keskinapa asennettuna kumielementtiin

Keskinavan sisälle asetettiin kartioholkki, jonka avulla akseli kiinnitetään kytkimeen.



Kuva 7 Kartioholkki ja keskinapa

Kuvassa 7 on kartioholkki vasemmalla ja keskinapa oikealla

Kytkimen osat (kuva 8) asennettiin vauhtipyörään ja akseliin siinä järjestyksessä, että ensin asennettiin keskinapa akselille, sitten kumielementti vauhtipyörään ja viimeisenä keskinapa kiristetään kumielementtiin, jolloin kumielementtiin aiheutuu tarvittava esijännitys.



Kuva 8 Kytkin purettuna ja koottuna

Kytkimen osilla on oma hitausmomenttinsa, joka vastustaa pyörimisliikkeen muutoksia. Pyörrevirtajarrulla mitattaessa moottorin tehoa ei pyörivien osien hitausmomenteilla ole niinkään merkitystä verrattuna tehonmittauslaitteistoon, jossa mittaus tapahtuu yksinomaan massan hitautta hyväksi käyttäen.

Valmistajan ilmoittamat /5/ hitausmomentit ja kappaleiden massat:

	Kumielementti	Keskinapa
Hitausmomentti:	$0,00997 \text{ kgm}^2$	$0,01443 \text{ kgm}^2$
Massa:	1,59 kg	5,5 kg

6.2 Akseli

Voimansiirron akselina käytettiin akseliterästä S355. Akselin pituus on 334 millimetriä ja sen halkaisija on 35 millimetriä. Toleranssi on h9. Akselin toleranssi h9 tarkoittaa akselin ulkohalkaisijan nimellismittaan toleranssialuetta. 35 mm akselilla 0–(–0,062 mm). Kartioholkkiliitoksissa akselin pinnanlaadun on oltava riittävän hyvä, jotta liitos pystyy välittämään vääntömomentin.

Voimansiirron akseliin kohdistuu vääntömomentti, minkä takia akseli on mitoitettava moottoridynamometrin maksimi jarrutusmomentin mukaisesti. Mitoitus voidaan suorittaa laskemalla akselin leikkausjännitys kaavan 2 avulla ja vääntövastus kaavan 1 avulla.

$$\text{Vääntövastus: } W_v = \frac{\pi(d)^3}{16} \quad (1)$$

d = akselin halkaisija

$$\text{Vääntövastus: } W_v = \frac{\pi(35\text{mm})^3}{16} = 8418,49\text{mm}^3$$

$$\text{Leikkausjännitys: } \tau_{v\max} = \frac{T}{W_v} \quad (2)$$

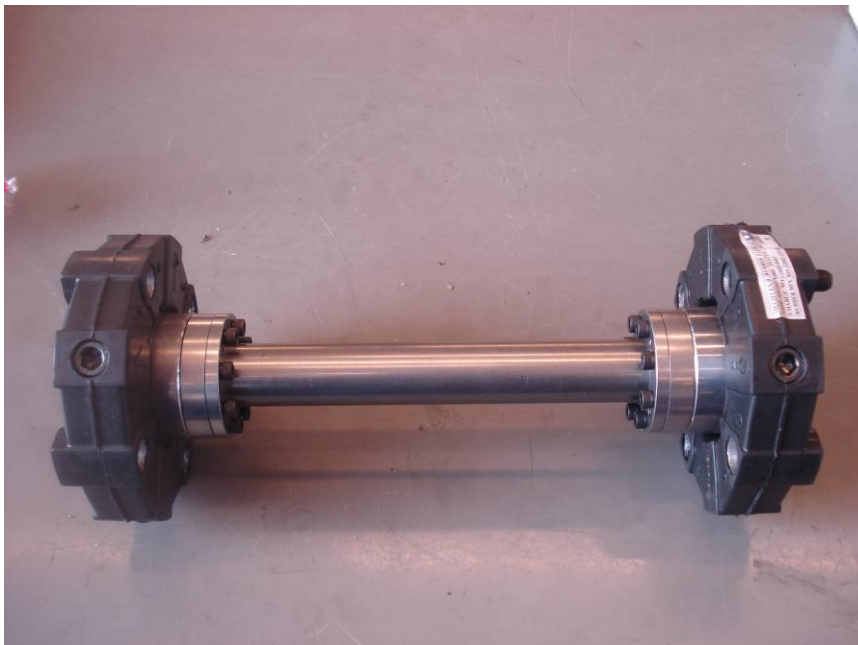
T = maksimi vääntömomentti

W_v = vääntövastus

$$\text{Vääntöleikkaus: } \tau_{v\max} = \frac{475000\text{ Nmm}}{8418,49\text{mm}^3} = 56,4\text{MPa}$$



Kuva 9 Akseli ja kytkimet



Kuva 10 Akseli liitettynä kytkimiin

Akselilla (kuva 9 ja 10) on tietyn suuruinen hitausmomentti, joka voidaan laskea umpinaisen lieriön hitausmomentin kaavalla 4. Laskeminen on mahdollista, kun tiedetään akselin halkaisija ja massa.

Akselin hitausmomentin laskemisen suorittaminen, kun massa ja halkaisija tiedetään. Teräsakseli painaa 0,334 metrin pituisena 2,57 kg ja laskuissa tarvittava lieriön säde saadaan jakamalla akselin halkaisija kahdella, jolloin säteeksi saadaan 17,5 mm.

$$\text{Hitausmomentti: } J_y = \frac{1}{2} m R^2 \quad (4)$$

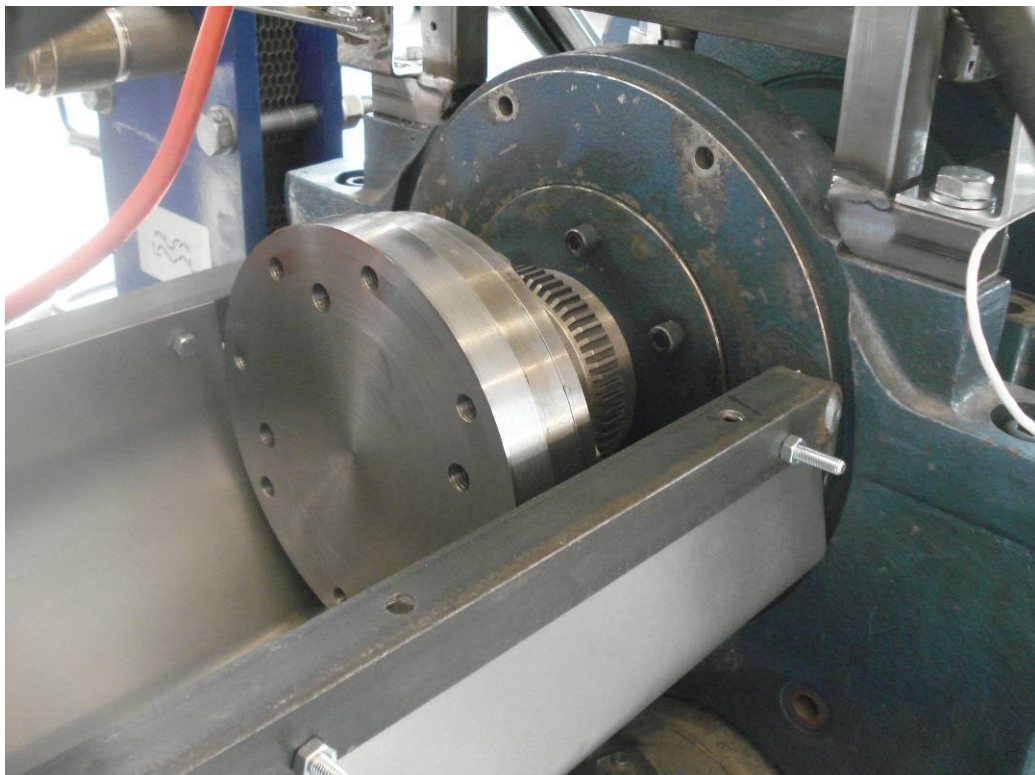
m = kappaleen massa

R = lieriön säde

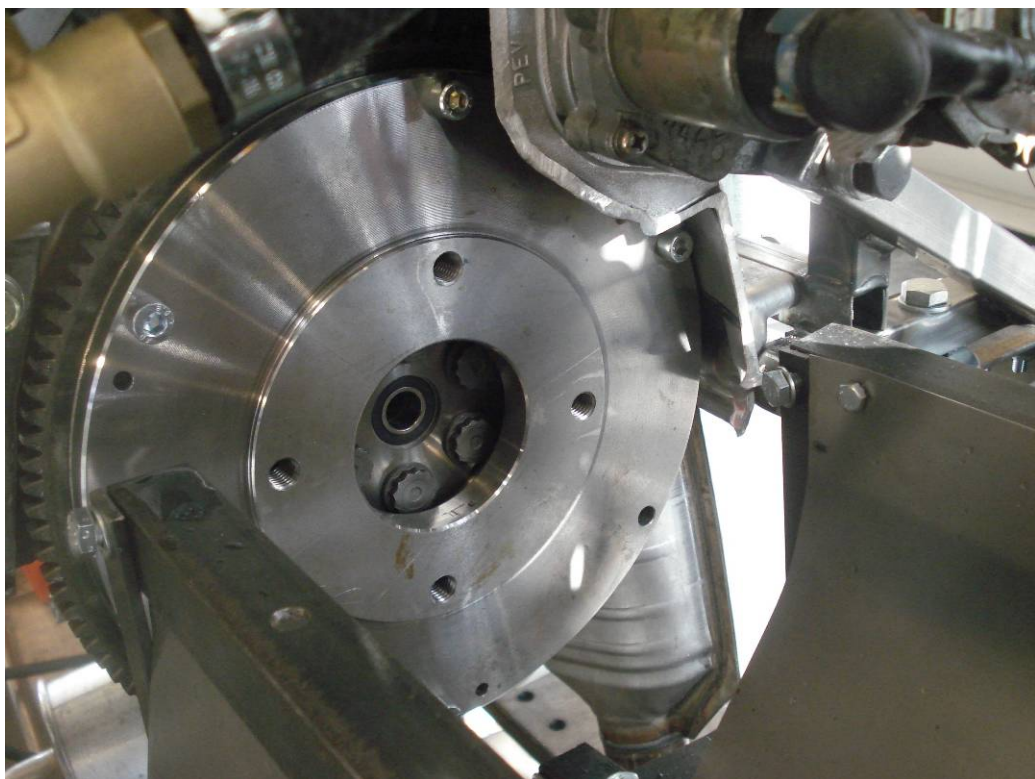
$$J_y = \frac{1}{2} 2,57 \text{ kg} \times 0,0175^2 = 0,00039 \text{ kgm}^2$$

6.3 Kytkimien kiinnityslaipat

Kumielementit kiinnitettiin vauhtipyöriin erillisten välilaippojen avulla. Välilaippoja oli käytettävä, koska vauhtipyöriin ei ollut mahdollista tehdä kumielementin kiinnitykseen vaadittavia ruuvien reikiä. Moottorin vauhtipyörään laippa (kuva 12) kiinnitettiin kuudella M6-ruuvilla ja keskitettiin kahdella keskitystapilla. Välilaipat kuuluivat kytkimien kanssa samaan tilaukseen SKS:ltä. Laippojen mallinnukset piirrettiin Autodesk Inventorilla ja kuvat lähetettiin SKS:lle. Laippojen toimituksessa oli kuitenkin vaikeuksia, ja tilatuista kahdesta laipasta vain toinen toimitettiin kytkimien mukana. Laippojen odottelu viivästytti koko projektin etenemistä. Tästä johtuen tehtiin moottoridynamometrin laippa (kuva 11) itse. Valmistuksessa käytettiin hyväksi moottoridynamometrissä alun perin kiinni ollutta laippaa, johon tehtiin jyrsimellä uusi ruuvijako sekä sorvattiin laippa oikeaan muotoon.



Kuva 11 Moottoridynamometrin laippa



Kuva 12 Moottorin vauhtipyörän laippa

7 MOOTTORIN TUENTA

Polttomoottori aiheuttaa käydessään vaihtelevan taajuista värinää. Sekä pyrkii moottorin kampiakselilla vaikuttavan vääntömomentin takia pyörimään akselinsa ympäri. Näiden syiden takia on moottori tuettava joustavasti, mutta niin tukevasti, että se pysyy paikallaan vääntömomenttia vastaan. Työssä käytetty Hondan moottori on alun perin sijoitettu poikittain autoon, johon se on tuettu vaihdelaatikosta, oikeasta kyljestä ja etupäästä. Moottorin alkuperäisistä kiinnityskohdista voitiin hyödyntää vain etupään kiinnityskohtaa, koska vaihteistoa ei asennettu moottoriin, eikä oikean kyljen kiinnityskohtaa ollut mahdollista käyttää tilankäytön takia.

Moottorin tuenta toteutettiin siten, että yksi kiinnike asennettiin edellä kerrotun mukaisesti moottorin etupäähän ja kaksi muuta moottorin takapäähän kummallekin sivulle vaihteiston kiinnityskohtiin. Takapään kiinnikkeet ottavat vastaan moottorin vääntömomentista aiheutuvan kiertoliikkeen.

7.1 Moottorin vääntömomentin aiheuttama kuormitus kiinnikkeisiin

Kampiakseli pyörii myötäpäivään, jolloin se aiheuttaa oikean puoleiseen takakiinnittimeen vetojännityksen ja vasemman puoleiseen takakiinnittimeen puristuskuormituksen (kuva 13). Aiheutuvat kuormitukset voidaan laskea kaavan 3 avulla, kun tiedetään moottorin vääntömomentti sekä kiinnikkeiden kiinnityspisteiden etäisyys kampiakselin keskikohdasta.

$$\text{Kuormitus: } F = \frac{T}{l} \quad (3)$$

T = moottorin vääntömomentti (Nm)

l = kiinnityspisteiden etäisyys toisistaan (m)

Vasen kiinnike on asennettu 0,27 m ja oikea kiinnike 0,25 m etäisyydelle kampiakselin keskipisteestä. Kaavan 3 avulla lasketaan kiinnittimiin vaikuttava voima. Moottorin pyörimissuunnasta johtuen oikeaan kiinnikkeeseen kohdistuva voima on vetosuuntaista.

$$F = \frac{135 \text{ Nm}}{0,52 \text{ m}} = 259,6 \text{ N}$$

Oikeaan kiinnikkeeseen vaikuttaa 259,6 newtonin vetovoima. Vasemman puoleiseen kiinnikkeeseen vaikuttaa 259,6 newtonin puristusvoima. Lisäksi kiinnittimet kannattelevat puolta moottorin massasta, moottorin massa on noin 110 kg. Kiinnittimiin vaikuttava painovoima. Kaava 4.

$$F = \frac{F * l_{v/o}}{l}$$

$$F = \frac{1}{2} \text{ moottorin painovoima (N)} \quad (4)$$

$$l_{v/o} = \text{kiinnikkeen etäisyys kampiakselista (m)}$$

$$l = \text{kiinnikkeiden etäisyys toisistaan (m)}$$

Oikea kiinnitin: 259,4 N

Vasen kiinnitin: 280,151 N

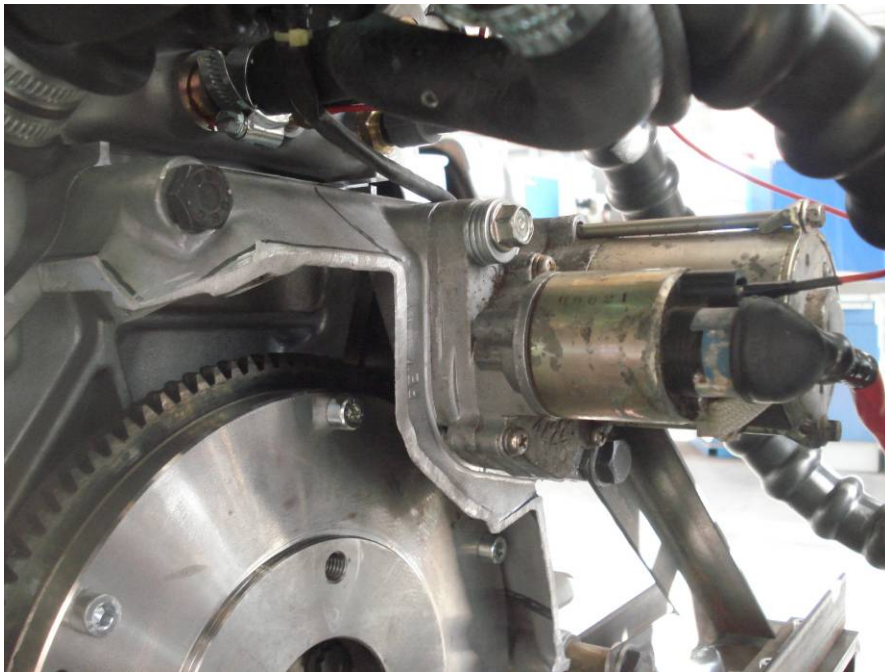
Kiinnikkeisiin vaikuttavien voimien summat:

$$\text{Oikea: } F = 259,4 \text{ N} - 220,7 \text{ N} = 39 \text{ N}$$

$$\text{Vasen: } F = -280,2 \text{ N} - 220,7 \text{ N} = -500 \text{ N}$$

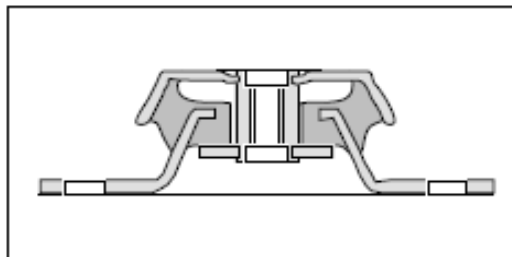
7.2 Takapään tuenta

Takapään tuettiin samoista kiinnityskohdista, joista vaihteiston kotelo oli kiinnitettyä moottoriin. Oikealla puolella moottorin kannatin (kuva 16) on monimutkaisempi, koska starttimoottorin kiinnityskohta sijaitsi myös moottorin oikealla puolella. Starttimoottori oli alkuaan kiinnitetty vaihteiston koteloon. Starttimoottorin kiinnityksessä hyödynnettiin vaihteiston kotelosta leikattua palasta, jossa käynnistin alkuaan oli kiinni (kuva 14). Tällä menettelyllä saatiin käynnistin sijoitettua oikeaan paikkaa siten, että se kohtaa vauhtipyörän hammastuksen oikealta etäisyydeltä.

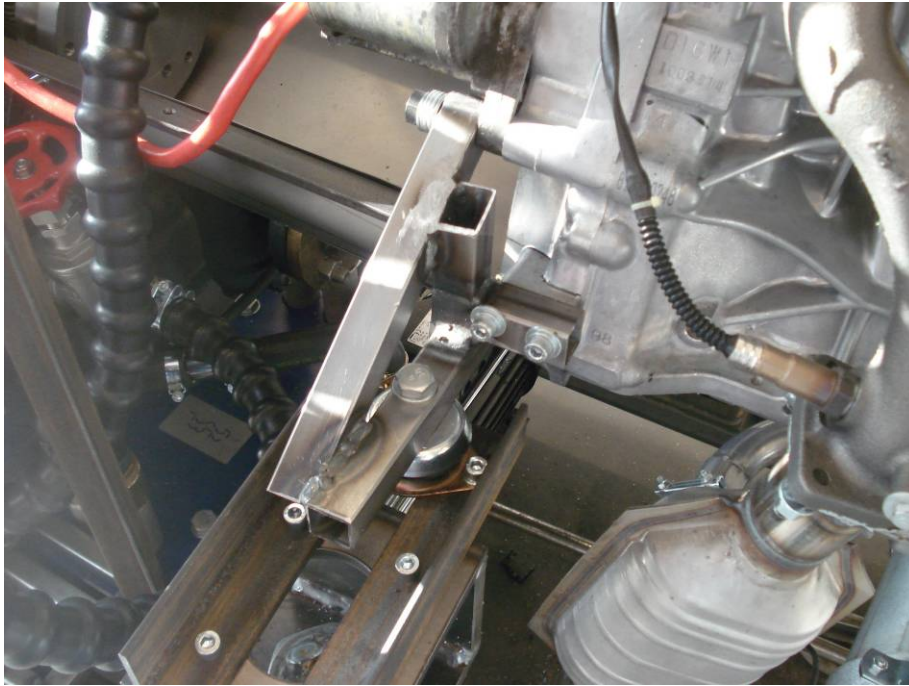


Kuva 14 Käynnistin moottorin kiinnitys

Takapään tärinäneristimiksi valittiin Korja-Kumi Oy:ltä Novibra Rab-tärinäneristimet. Tärinäneristin (kuva 15) koostuu kahdesta metallilevystä joiden väliin on vulkanoitu kumityyny. Kumin kovuus on 50 ± 5 °ShA.

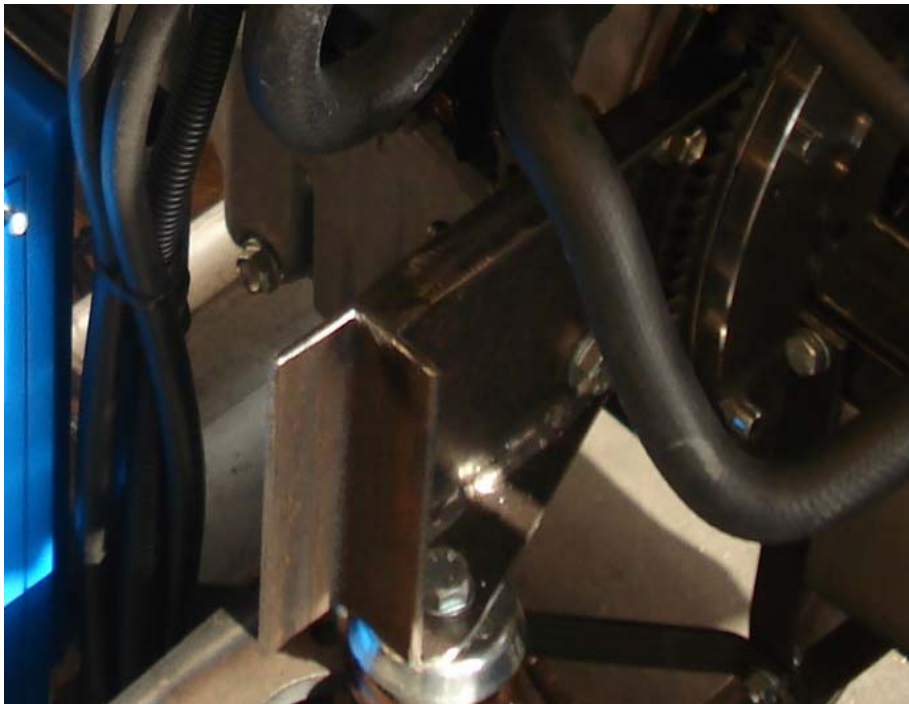


Kuva 15 Novibra Rab-tärinäneristimen poikkileikkaus /6/



Kuva 16 Moottorin takapään oikea tuki ja tärinäneristin

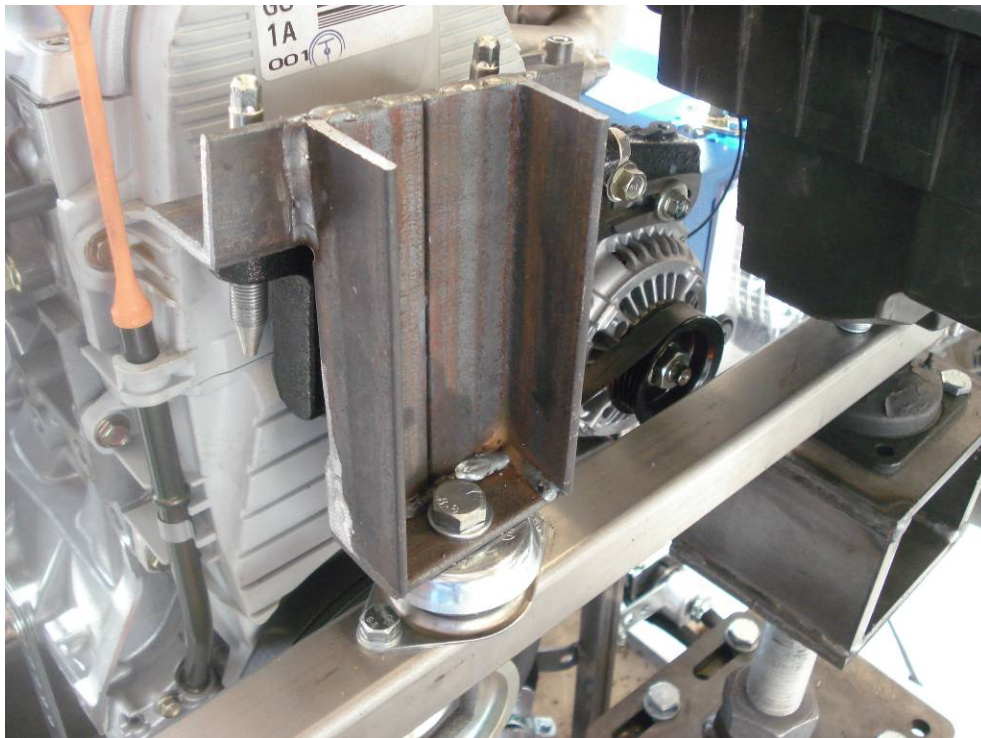
Moottorin takapään oikeanpuoleinen tuki (kuva 17) on valmistettu 3 millimetriä paksusta teräslevystä, joka on hitsattu kolmiomuotoon sekä vahvistettu kulmateräksellä.



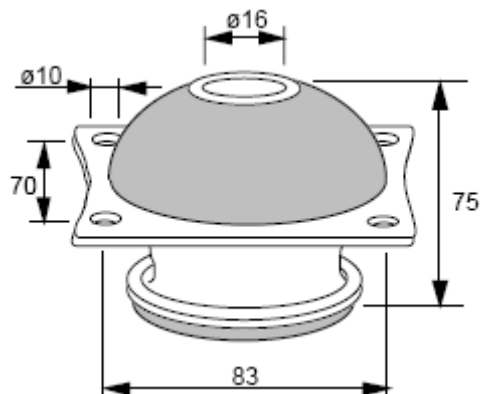
Kuva 17 Moottorin takapään vasen tuki ja tärinäneristin

7.3 Etupään tuenta

Moottorin etupään tuenta kannattelee puolta moottorin painosta. Siihen kohdistuu myös hitausvoimien aiheuttamaa pystysuuntaista liikettä. Etupään ainoana tärinäneristimenä, moottori pyrkii kääntymään sen keskipisteen ympäri. Etupään tärinäneristimenä (kuva 18) käytetään samanlaista Novibra Rab-tärinäneristintä kuin moottorin takapään tuennassa.

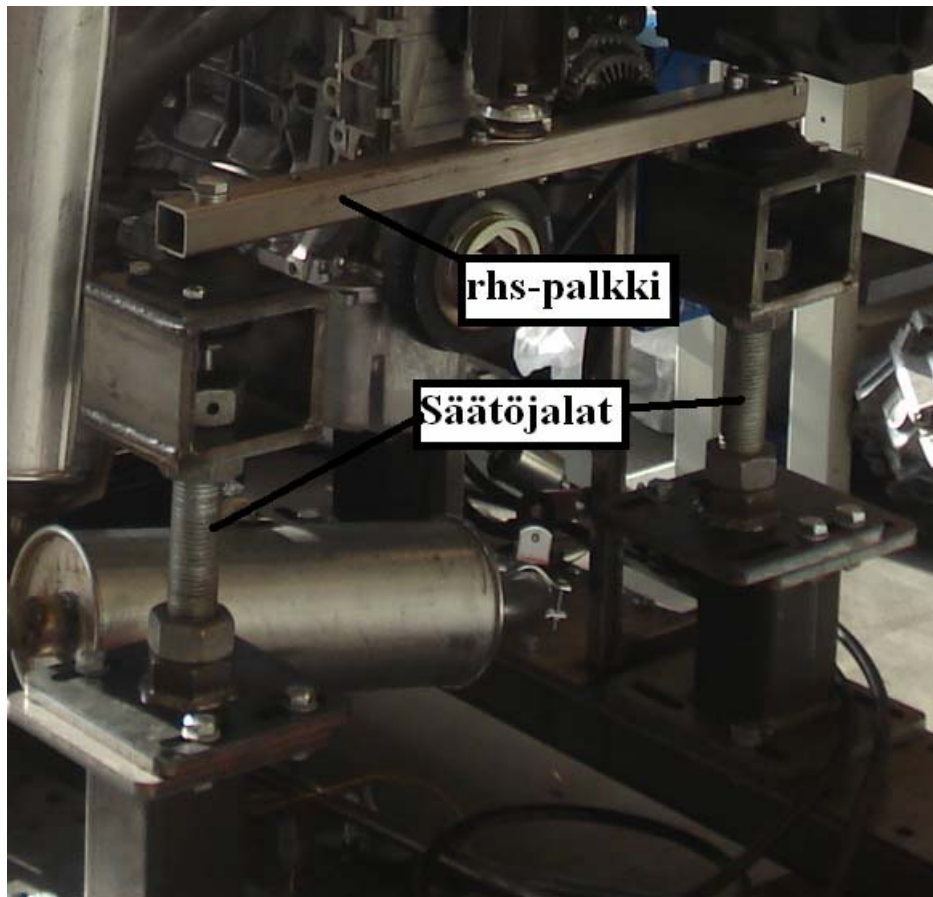


Kuva 18 Etupään tuki ja kannatin



Kuva 19 Etupään palkin tärinäneristin /6/

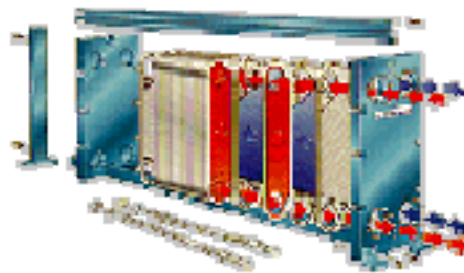
Etupään kannatin on kiinnitetty 40-millimetrisen rhs-palkkiin, joka on tuettu molemmista päistään runkoon vaimenninkumien (kuva 19) avulla. Ratkaisuun päädyttiin siksi, että rhs-palkin avulla voidaan käyttää rungossa olevia moottorin asennon säätämiseen tarkoitettuja säätöjalkoja.



Kuva 20 Etupään säätöjalat ja palkki

8 JÄÄHDYTYSJÄRJESTELMÄ

Polttomoottori muuttaa polttoaineen sisältämän energian kampikoneiston avulla liike-energiaksi. Polttomoottorin hyötysuhde on bensiiniä käytettäessä kuitenkin vain noin 30 %. Lämpöenergiasta noin 40 % poistuu pakokaasujärjestelmän kautta, loput noin 30 % siirtyy mäntien ja sylinterilohkon ja sylinterikannen kautta jäähdytysnesteeseen. Tämän takia täytyy jäähdytysjärjestelmä mitoittaa tarpeeksi suureksi, jotta moottori ei ylikuumentu. Auton moottorissa jäähdytys on toteutettu jäähdytysnesteen avulla, joka kiertää moottorissa ja lopulta jäähdyttimen kautta luovuttaen lämpöenergian ympäröivään ilmaan. Moottorintestausjärjestelmää rakentaessa tuli kuitenkin huomioida, että moottori ja jäähdytysjärjestelmä pysyvät koko ajan paikallaan eikä näin synny jäähdyttävää ilmavirtausta. Tästä syystä toteutettiin moottorin ja dynamometrin jäähdytys lämmönvaihtimilla. Jäähdytysneste johdetaan lämmönvaihtimeen ja lämmönvaihtimen toisella puolella olevissa nestekanavissa virtaa vastakkaiseen suuntaan kylmä vesijohtovesi. Vesikanavat on jäähdytystehon lisäämiseksi sijoitettu lomittain niin, että kummankin puoliskon kanava on aina peräkkäin. Lämpöenergia siirtyy johtumalla väliaineena käytetyn alumiinin kautta vesijohtoveteen. Osa lämpöenergiasta siirtyy säteilemällä ympäröivään ilmaan.



Kuva 21 Levylämmönvaihdin /7/

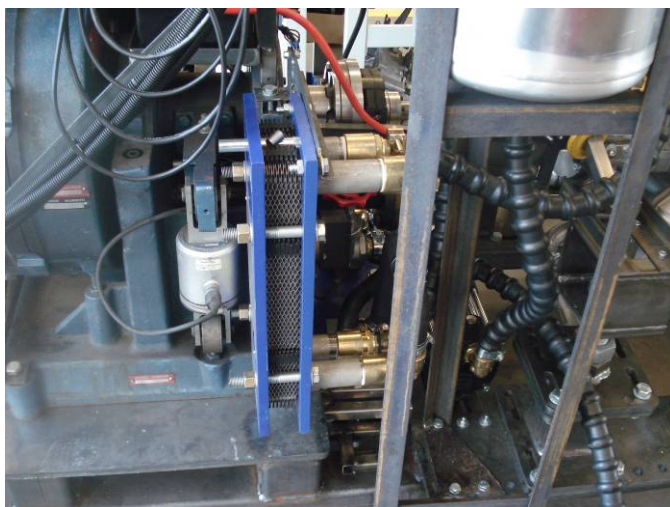
Lämmönvaihtimet ovat tyypiltään levylämmönvaihtimia (21) ja ne tilattiin Alfa Lavalilta. Lämmönvaihtimien mitoituksen teki Alfa Laval, jolle ilmoitettiin moottorin ja dynamometrin maksimitehot. Kummatkin lämmönvaihtimet kytkettiin sarjaan, eli niiden läpi kulkee sama jäähdytysvesi vesijohtoverkosta. Vesijohtovesi virtaa ensin dynamometrin lämmönvaihtimen (kuva 24) läpi ja vasta sitten moottorin

lämmönvaihtimen läpi. Asennus tehtiin tarkoituksella tässä järjestyksessä, että voitaisiin varmistaa dynamometrin riittävä jäähtyminen. Dynamometrin jäähdytysnesteen lämpötila ei saa nousta missään vaiheessa käytön aikana yli 60 °C. Dynamometriin on asennettu lämpöanturi, joka kytkee pois päältä moottorin ja dynamometrin, mikäli lämpötila nousee yli sallitun.

Veden ominaislämpökapasiteetti 10 °C:n lämpötilassa on 4,19 kJ/(kg*K). Vesijohtoverkon kylmän veden lämpötilaksi mitattiin noin 10 °C. Silloin voidaan laskea, että lämmönvaihtimissa veden täytyy virrata 1 litra sekunnissa, jotta tarvittava jäähdytysteho saavutettaisiin. Moottorin jäähdytysnesteen lämpötila laskee lämmönvaihtimen läpi virratessaan noin 90 °C:sta noin 70 °C:seen. Dynamometrin jäähdytysnesteen lämpötila laskee jäähdytyksen aikana noin 60 °C:sta noin 51 °C:seen. Läpi virtaavan vesijohtoveden lämpötila nousee noin 52 °C:seen ennen kuin se poistuu toisesta lämmönvaihtimesta. Käytetty vesijohtovesi lasketaan viemäriverkkoon.

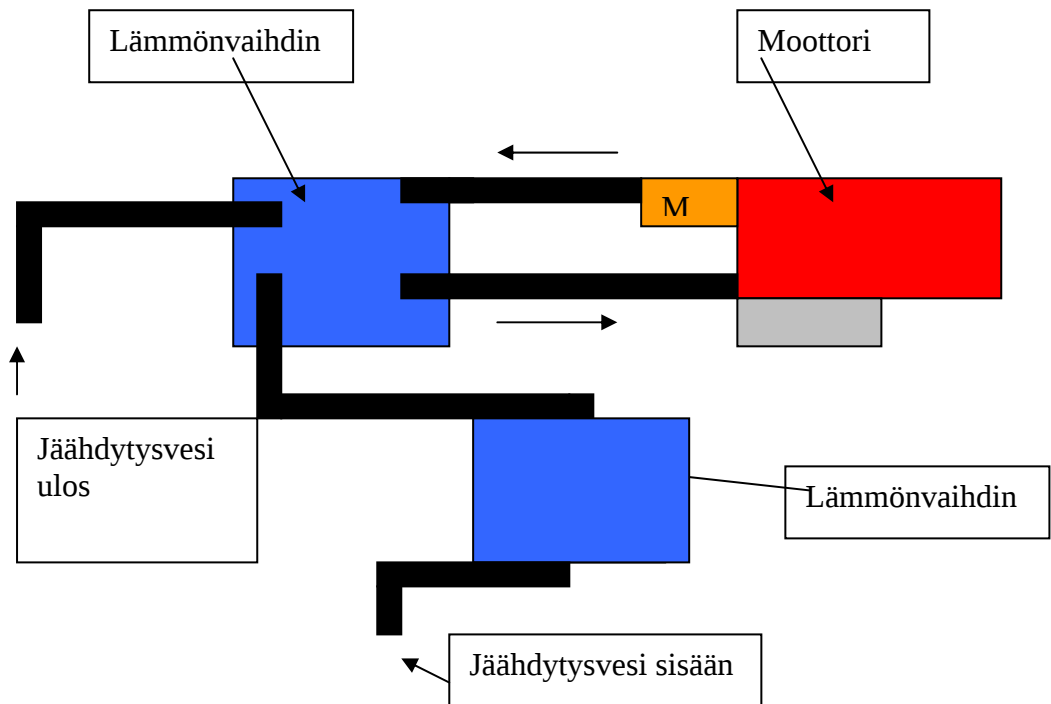
8.1 Moottori

Moottorin jäähdytysnestettä kierrättää moottorin oma vesipumppu ja moottorin oma termostaatti ohjaa nestekiertoa lämmönvaihtimelle. Moottorin jäähdytysnesteen lämpötilan ollessa noin 90 °C avautuu termostaatti, joka päästää nesteen kulkemaan lämmönvaihtimen lävitse (kuva 22).



Kuva 22 Moottorin lämmönvaihdin

Moottorin lämmönvaihdin joutuu toimimaan korkeammassa lämpötilassa sarjaan kytkennän ja moottorin korkeamman lämpötilan vuoksi, joten se on sijoitettu dynamometrin vasemmalla puolelle siten, että sen ympärillä olisi mahdollisimman paljon ilmatilaa (kuva 23).



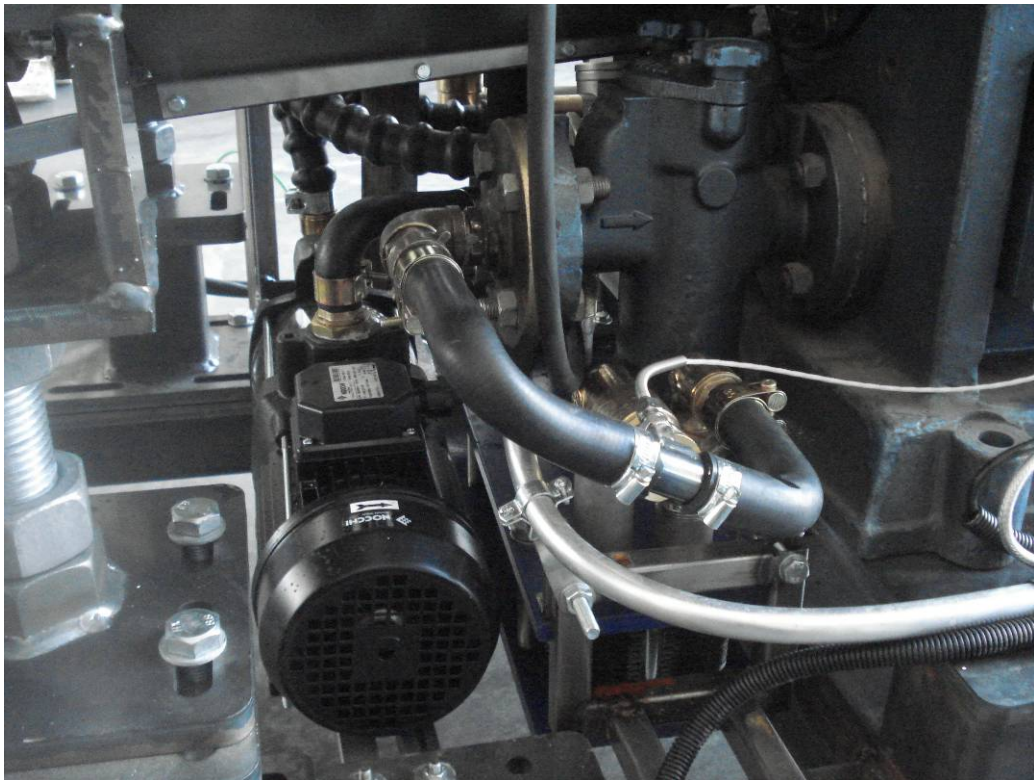
Kuva 23 Moottorin jäähdytysjärjestelmän kaavio



Kuva 24 Jäähdytysveden sisäänmenoliitin 1. lämmönvaihtimessa

8.2 Moottoridynamometri

Työssä käytetty moottoridynamometri on toimintaperiaatteeltaan pyörrevirtajarru. Jarrussa liike-energia muutetaan lämpöenergiaksi. Lämpöä moottoridynamometriin syntyy myös staattorin käämeissä. Moottoridynamometrin lämpötilan on pysyttävä koko kuormituksen ajan mahdollisimman alhaisena. Riittävä jäähdytys moottoridynamometrille on toteutettu nestejäähdytyksellä, jossa jäähdytysneste jäähdytetään lämmönvaihtimen avulla. Jäähdytysnestettä moottoridynamometrissa kierrättää erillinen vesipumppu (kuva 25).



Kuva 25 Moottoridynamometrin vesipumppu

Moottoridynamometrin jäähdytysjärjestelmälle on asetettu valmistajan toimesta seuraavia ehtoja ja rajoituksia /1/:

- jäähdytysveden virtaus 6350 l/tunti
- jäähdytysveden paine 0.074 Mpa
- jäähdytysveden lämpötila maksimi 60 °C.

Moottoridynamometrin vesipumppu (kuva 25) on Noramaa Oy:ltä hankittu 3-vaihe-keskipakopumppu, mallimerkinnältään MULTINOX 200-65A-T.

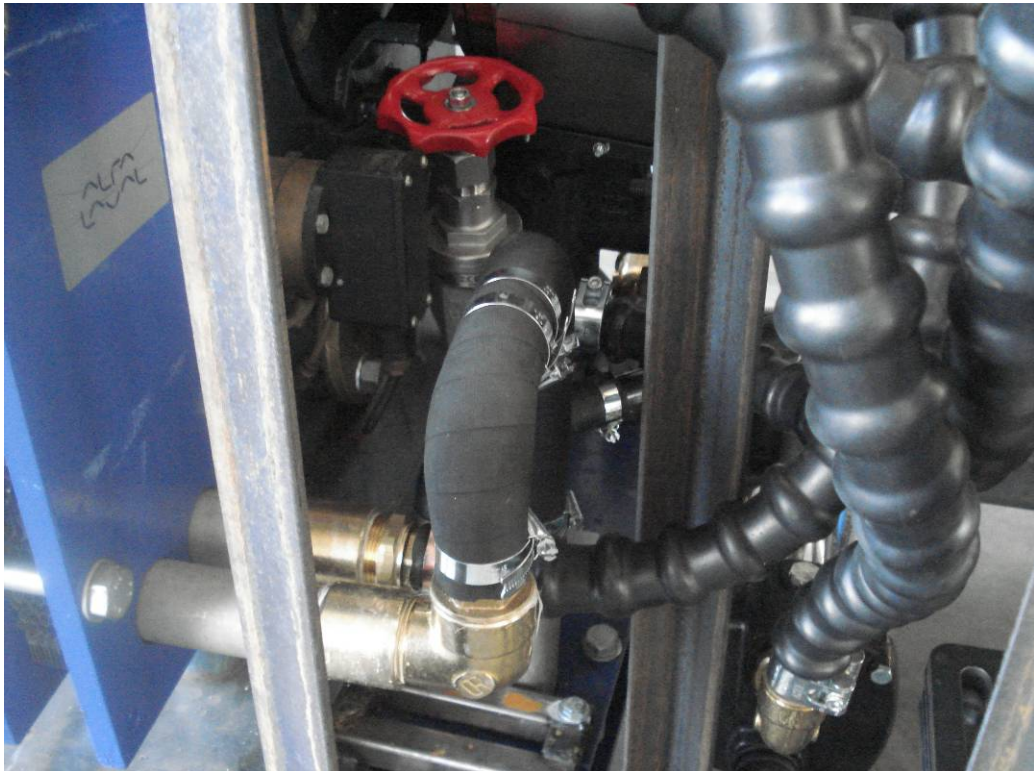
Tekniset tiedot /8/:

Maksimi paine: 0,65 MPa

Maksimi tuotto: 200 l/min

Teho: 2,2 kW

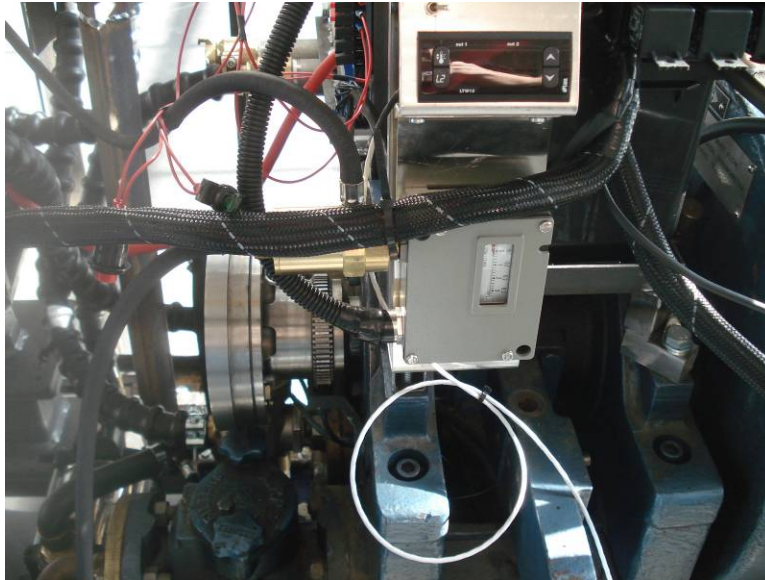
Moottoridynamometrin jäähdytysjärjestelmän painetta säädetään kuristusventtiilillä. Kuristusventtiilin (kuva 26) hanaa kääntämällä muutetaan vesikanavan poikkipinta-alaa moottoridynamometrin jäähdytysveden ulostulokanavassa.



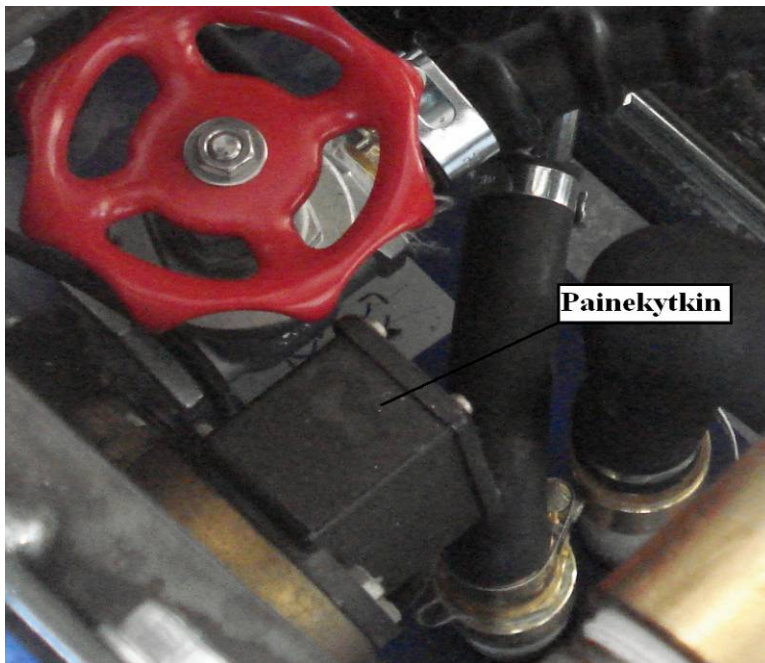
Kuva 26 Kuristusventtiili

Veden virtausta tarkkaillaan virtausvahdilla, jossa jäähdytysveden painetta mitataan ennen ja jälkeen moottoridynamometrin. Veden virratessa muodostuu paine-ero näiden kahden mittapisteen välille. Mikäli veden virtaus jostakin syystä katkeaa, muuttuu

paine-ero nollassi mittapisteiden välillä. Paine-eron katoamisesta johdetaan tieto ohjaimelle, joka sammuttaa moottoridynamometrin. Virtausvahdin (kuva 27) kytkennän hoiti Panu Vidqvist omassa opinnäytetyössään.



Kuva 27 Jäähdytysnesteen virtausvahti

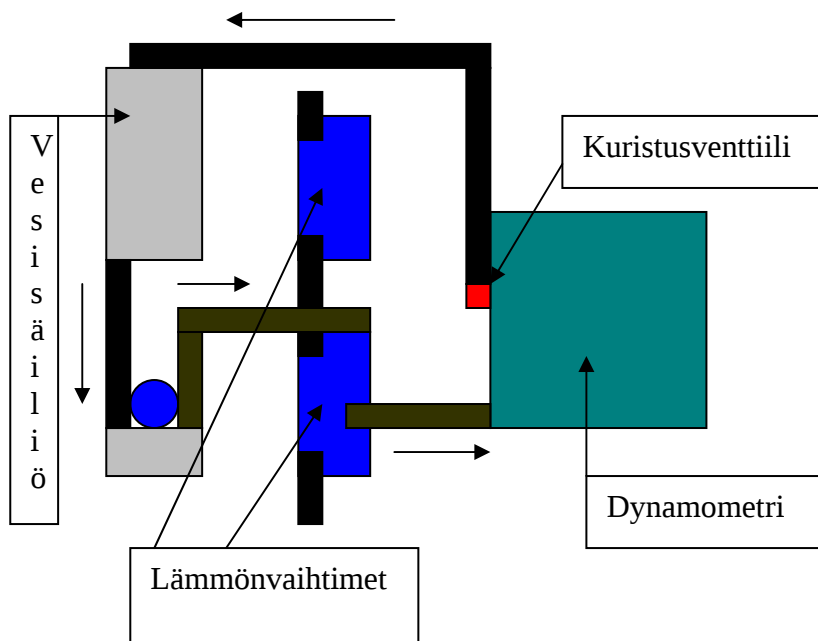


Kuva 28 Jäähdytysnesteen painekytin

Moottoridynamometrin jäähdytysjärjestelmän painetta tarkkailee jäähdytysnesteen ulostulon yhteyteen kytketty painevahti (kuva 28). Mikäli paine laskee arvoon alle 0,074 Mpa moottoridynamometri kytketään pois päältä.

8.3 Moottoridynamometrin jäähdytysjärjestelmän rakenne

Moottoridynamometrin jäähdytysjärjestelmä (kuva 29) koostuu jo edellä mainittujen vesipumpun ja lämmönvaihtimen lisäksi myös erillisestä säiliöstä. Jäähdytysneste varastoidaan tilavuudeltaan 40-litraiseen säiliöön. Säiliöstä jäähdytysneste laskeutuu vesipumpun imupuolelle. Vesipumpulta jäähdytysneste pumpataan lämmönvaihtimen läpi moottoridynamometrille. Moottoridynamometrin läpi virrattuaan jäähdytysneste palautuu säiliölle virrattuaan ensin kuristusventtiilin läpi. Jäähdytysjärjestelmän letkut on hankittu Korja-Kumi Oy:ltä. Letkujen materiaalina on EPDM-kumi (eteenipropeenidieeniterpolymeeri).



Kuva 29 Moottoridynamometrin jäähdytysjärjestelmä

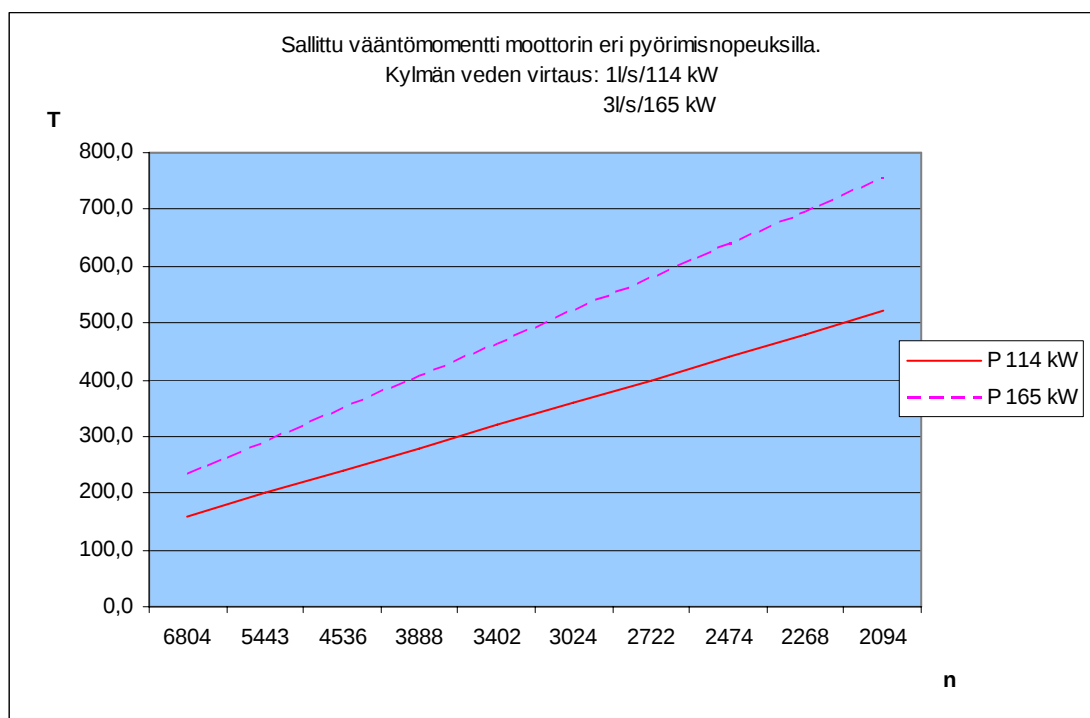
8.4 Jäähdytystehon sallima moottoriteho

Moottorin tuottama teho on moottorin vääntömomentin ja kulmanopeuden tulo.

Moottoritehodynamometrissä muutetaan jarrun avulla moottoriteho lämpöenergiaksi.

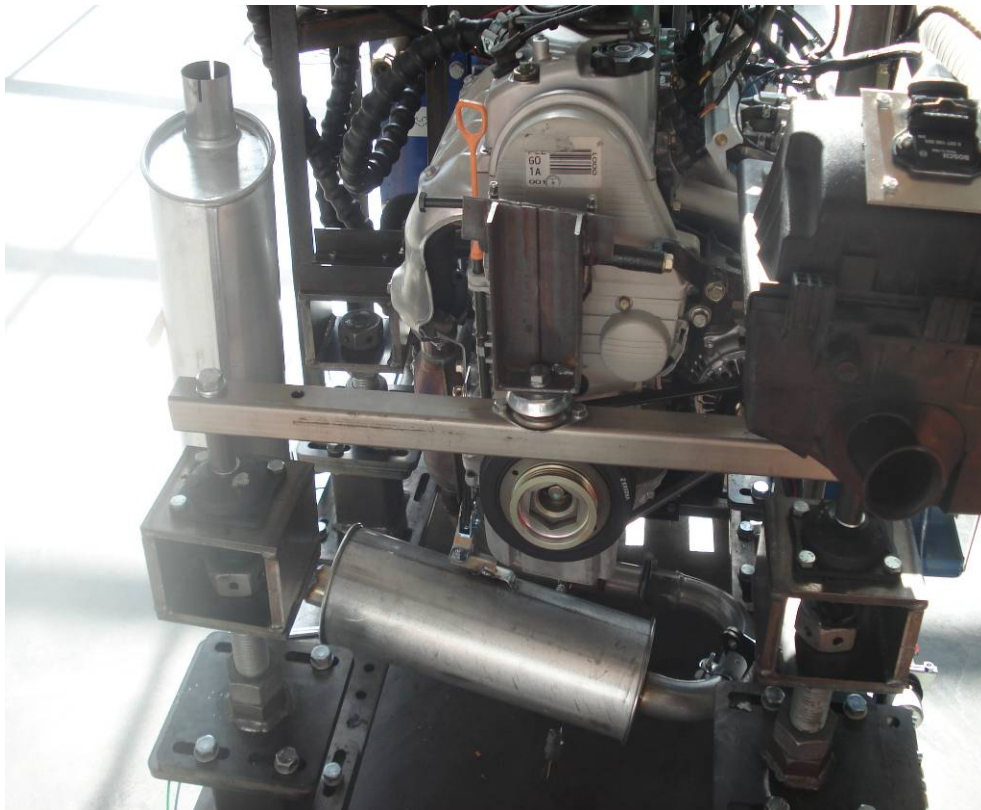
Jäähdytysjärjestelmän mitoittamiseksi on asetettava moottorille sallitut pyörimisnopeudet, joilla voidaan tuottaa tietyn suuruinen vääntömomentti jolloin ei maksimiteho ylitä (Taulukko 1).

Taulukko 1 Sallitut vääntömomentit



9 PAKOKAASUJEN POISTOJÄRJESTELMÄ

Pakoputkiston asennus moottorin testauspenkkiin oli ongelmallinen tilankäytön takia. Alun perin suunniteltiin pakoputkistoa, joka olisi tehty alustan pituussuuntaisesti, mutta putkistosta olisi tullut liian pitkä alustan pituuteen nähden. Päädyttiin pakoputkistoon, joka kiertää moottorin alta ja nousee pystyyn moottorin vasemmalta puolelta. Pakoputkistoon kuuluu kaksi äänenvaimenninta sekä yksi katalysaattori (kuva 30). Katalysaattori on asennettu heti pakosarjan jälkeen sen vaatiman korkean käyttölämpötilan takia. Katalysaattoria ennen ja jälkeen on asennettu lambda-anturit tarkkailemaan pakokaasujen happipitoisuutta. Ensimmäinen lambda-anturi on kytketty moottorinohjausjärjestelmään, mutta jälkimmäinen on asennettu opetuskäyttöä varten. Sen avulla voidaan tutkia katalysaattorin toimintaa.



Kuva 30 Pakoputkisto

10 JÄRJESTELMÄN LIIKUTELTAVUUS JA TUENTA

Moottorintestauspenkistä haluttiin tehdä liikuteltava, jolloin sitä voitaisiin tarpeen mukaan käyttää myös ulkona. Järjestelmän liikuteltavuus vaati sen, että kaikki käytön aikana tarvittavat laitteet on sijoitettu kiinteästi alustaan. Kiinteä asennus teki järjestelmästä hiukan vaikeamman huoltaa, mutta muuten kompaktista rakenteesta ei ole haittaa. Ainoastaan polttoainesäiliö on erillään alustasta, koska se voidaan tulevaisuudessa asettaa tarkkuusvaa`an päälle, jolloin polttoaineen kulutusta voidaan mitata.

Alustan alle asennettiin pyörät (kuva 31), jolloin järjestelmää ei tarvitse liikutella trukilla. Suunniteltiin myös, että järjestelmä olisi käytön aikana nostettu ilmaan ilmapalkeiden avulla, mutta se olisi haitannut järjestelmän liikuteltavuutta. Ilmapalkeiden avulla olisi voitu vähentää rungon tärinää lattiaa vasten käytön aikana.

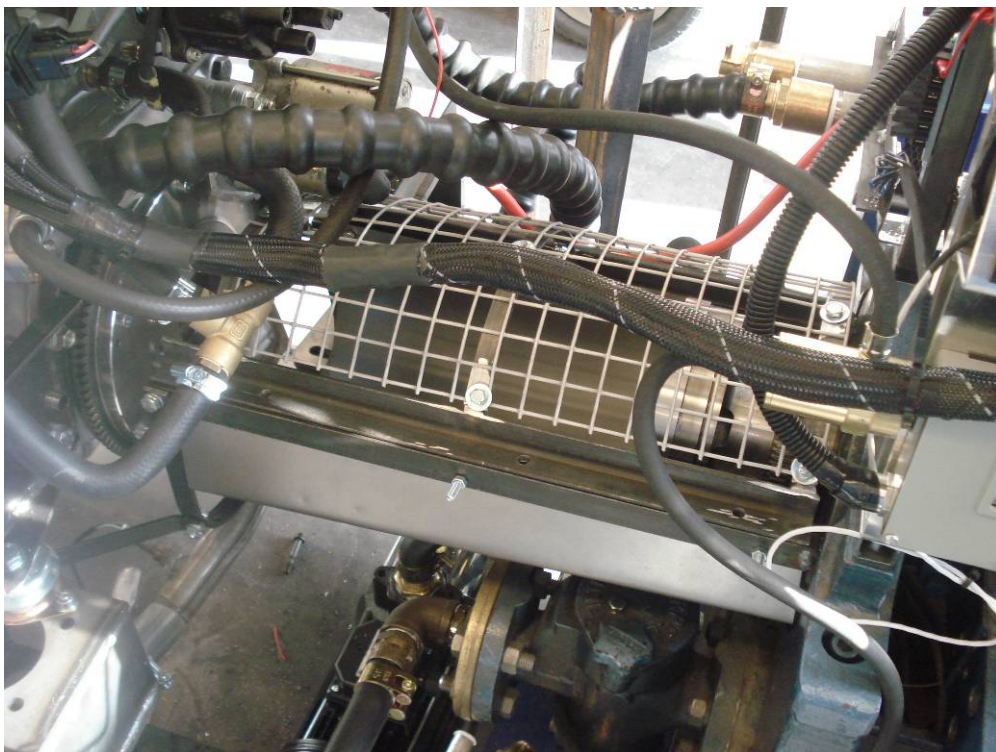


Kuva 31 Alustan pyörä

12 VAROTOIMENPITEET

Järjestelmän rakenne, jossa kaikki osat on sijoitettu kiinteästi ja lähekkäin toisiinsa, johtaa siihen, että käytön aikana joudutaan työskentelemään moottorin välittömässä läheisyydessä. Käytön aikana on vaara joutua kosketuksiin pyörivien taikka kuumien osien kanssa. Nämä osat on pyritty suojaamaan mahdollisimman hyvin, jolloin välttyttäisiin kosketukselta. Kuitenkin osa pakoputkistosta ja moottorin etupään hihnapyöristä on avoimina ja mahdollisuus kosketuksiin on mahdollinen.

Voimansiirron pyörivät osat aiheuttavat kuitenkin suurimman vaaran moottorin käyttäjälle. Voimansiirron osat ovat yleensä raskaita ja pyörivät jopa 6000 kierrosta minuutissa. Voimansiirto onkin suojattu irrotettavaan koteloon (kuva 32), joka estää mahdollisten irtoavien osien lentämisen kohti ihmisiä.



Kuva 32 Voimansiirron kotelointi

13 YHTEENVETO

Omalta osaltani työ saatiin suunnitellusti loppuun. Tosin matkalla mahtui monia vastoinkäymisiä. Suurimmat ongelmat liittyivät projektin suunnitteluun ja tarvikkeiden hankintaan. Suunnitteluongelmia aiheutui lähinnä siitä, että ei ollut tarpeeksi selvästi mietitty ja sovittu, minkälainen kokonaisuus järjestelmästä muodostetaan. Tarvikkeiden hankinnassa ongelmat liittyivät lähinnä voimansiirron osien toimituksiin. Osien viivästynyt toimitus siirsi projektin valmistumista muutamalla viikolla.

Projekti oli pitkä. Se oli alkanut jo noin puolitoista vuotta sitten, kun opiskelija Henri Ekola aloitti rungon ja jäähdytysjärjestelmän suunnittelemisen. Työt moottorintestausjärjestelmän kanssa saattavat vieläkin jatkua, mikäli samaa moottoridynamometriä halutaan käyttää muiden moottorien testaukseen. Lisäksi fysiikanlaboratorion aikeet suorittaa hiukkasmittauksia moottorin käytön yhteydessä jatkavat projektia.



Kuva 33 Projekti valmiina

LÄHDELUETTELO

Painetut lähteet

- 1 Froude instruction manual, I M 855/3
- 2 Pentti Inkinen, Jukka Tuohi, Reijo Manninen, Momentti 1, Insinöörifysiikkaa, Otava. Helsinki 2003. s. 176–177, 377.
- 3 Vidqvist, Panu, Moottoridynamometrin ohjausyksikön päivitys ja testaus. Opinnäytetyö. Tampereen ammattikorkeakoulu. Koneosasto. Tampere 2008. 66 s.
- 4 Robert Bosch, Autoteknillinen taskukirja. Gummerus. Jyväskylä 1993. s. 472–473.
- 5 SKS-tekniikka Oy, Megiflex-B, tekniset tiedot.

Sähköiset lähteet

- 6 Korja-kumi Oy [www.korjakumi.fi]. [Viitattu 26.4.2008] Saatavissa: http://www.korjakumi.fi/mp/db/file_library/x/IMG/10476/file/-Tarinaneristimet102.pdf
- 7 Alfa Laval Nordic Oy [www.alfalaval.com/nordic]. [Viitattu 27.4.2008] Saatavissa: <http://www.alfalaval.com/ecoreJava/WebObjects/ecoreJava.woa/wa/>
- 8 Noramaa Oy [<http://www.noramaa.fi>]. [Viitattu 30.4.2008] Saatavissa: <http://www.noramaa.fi/index.phtml?s=67>
- 9 Autodb.fi [<http://autodb.fi>]. [Viitattu 30.4.2008] Saatavissa: <http://autodb.fi/mallit/model.php?carid=2149>