

Opinnäytetyö (AMK)

Auto- ja kuljetustekniikka

Ajoneuvotekniikka

2016

Marko Ylilontinen

PIENMOOTTORIDYNAMO- METRIN KEHITTÄMINEN

– Inertiaan perustuva järjestelmä



TURUN AMMATTIKORKEAKOULU
TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

OPINNÄYTETYÖ (AMK) | TIIVISTELMÄ

TURUN AMMATTIKORKEAKOULU

Auto- ja kuljetustekniikka | Ajoneuvotekniikka

Toukokuu 2016 | 41 sivua

Ohjaaja: Markku Ikonen

Marko Ylilontinen

PIENMOOTTORIDYNAMOMETRIN KEHITTÄMINEN

Tässä opinnäytetyössä kehitettiin pienmoottorin tehomittaukseen sopiva, vauhtipyörän hitausmomenttiin perustuva moottoridynamometri. Moottori, jolle järjestelmä ensisijaisesti suunniteltiin, on Samuli Hallivuoren opinnäytetyökseen vuonna 2015 valmistama 240 cm³ yksisylinterinen ottomoottori, josta dynamometrillä on tarkoitus saada mitattua moottorin teho sekä vääntömomentti pyörintänopeuden funktiona. Järjestelmä suunniteltiin sellaiseksi, että sitä voi hyödyntää myöhemmin myös alustadynamometrinä 2-pyöräisille.

Työn alussa selvitettiin moottorin lähtötiedot, sekä pyrittiin arvioimaan moottorin tuottama vääntömomentti ja pyörintänopeusalue. Näiden tietojen perusteella valittiin dynamometrityypiksi inertiaan perustuva järjestelmä. Mittausohjelmistoksi valikoitui nimensä mukaisesti yksinkertainen SimpeDyno-ohjelmisto. Ohjelmiston vaatima induktiivinen pyörintänopeusanturi valmistettiin itse.

Suunnittelussa käytettiin apuna 3D-mallinnusta sekä FEM-laskentaa. Kestävyyden kannalta kriittisille osille suoritettiin lujuustarkastelu.

Työn tuloksena syntyivät tarkat piirustukset sekä 3D-malli dynamometristä. Varsinaista tehonmittausta ei laitteistolla ole vielä suoritettu, mutta mittausohjelmiston testiajon oheistuotteena syntyi kohtuullisen tarkka käsitys mielenkiinnon kohteena olevan moottorin tuottamasta tehosta sekä tehoalueesta.

ASIASANAT:

Dynamometri, Inertia, Moottori, Tehonmittaus, FEM-laskenta, 3D-mallinnus

BACHELOR'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Bachelor of Engineering | Automotive engineering

May 2016 | 41 pages

Instructor: Markku Ikonen

Marko Ylilonttinen

DYNAMOMETER DESIGN FOR SMALL INTERNAL COMBUSTION ENGINES

The main goal of this thesis was to design a dynamometer primarily for a small 240 cm³ petrol powered internal combustion engine. This engine is designed and manufactured by Samuli Hallivuori in his own engineering thesis in the year 2015.

The power measuring device which is based on the moment of inertia is able to plot the power and torque curves graphically as a function of rotational speed of the engine.

The project started by collecting the output specifications from engine design documentation as well as making effort in creating more precise estimation of the rotational speed and torque generated by the engine. An inertia based system was selected on account of this information.

SimpleDyno, the simple dynamometer software as its name suggests, was selected for measurement software. Inductive speed sensor required by the software is authors own made and design.

The designing process was aided by 3D modeling and finite element method calculation software.

As a result of this thesis, detailed drawings and a 3D model of the dynamometer were created. The actual power measurement of the engine has not been carried out yet. However, as a coproduct of the software test run, a reasonably accurate perception of the power band and torque generated by the engine was achieved.

KEYWORDS:

Dynamometer, Engine, 3D modelling, FEM, Inertia, Power measurement

SISÄLTÖ

1 JOHDANTO	6
1.1 Tutkimuskohde	6
1.2 Tehon arviointi ennen suunnittelua	8
2 TEHODYNAMOMETRI	10
2.1 Dynamometrityypit kiinnityksen mukaan	10
2.1.1 Alustadynamometri	10
2.1.2 Moottoridynamometri	10
2.1.3 Napadynamometri	11
2.2 Dynamometrit jarrutyypin mukaan	11
2.2.1 Kitkajarru	12
2.2.2 Hydraulinen/pyörrevesijarru	14
2.2.3 Pyörrevirtajarru	15
2.2.4 Inertia	16
3 MITTAUSLAITTEISTO	19
3.1 Ohjelmisto	19
3.1.1 WT-lite	19
3.1.2 SimpleDyno	19
3.2 Vaadittava anturointi	21
3.3 Mittauslaitteiston asetukset ja testaus	22
3.4 Mekaaninen rakenne	26
3.4.1 Rulla	26
3.4.2 Rullan lujuustarkastelu	28
3.4.3 Akseli	32
3.4.4 Värähtelynvaimennin	33
3.4.5 Laakerointi	34
3.4.6 Runko	35
4 TULOKSET JA HAVAINNOT	36
4.1 Moottorin alustavat suoritusarvot	36
4.2 Kehityskohteita	38
5 YHTEENVETO	40

LIITTEET

- Liite 1. Rullan ja akselin mitoituspiirros
 Liite 2. Rungon mitoituspiirros

KUVAT

Kuva 1. Moottorin osia odottamassa kasausta kesäkuussa 2015. (Kuva: Samuli Hallivuori)	7
Kuva 2. Prony Brake periaatekuva (Brar & Bansal, 2004, 379.)	12
Kuva 3. Pyörrevesijarrun periaatekuva (Beaumont, 1889, 167.)	14
Kuva 4. Kaksiroottorinen ilmajäähdytetty pyörrevirtajarru (Killedar, 2012, 104.)	15
Kuva 5. SimpleDynon käyttöliittymä	20
Kuva 6. Pyörintänopeusanturi jatkojohtoineen	22
Kuva 7. SimpleDynon asetusikkuna.....	23
Kuva 8. Dynamometri mallinnettuna kokonaisuudessaan	26
Kuva 9. Värähtelynvaimennin	33
Kuva 10. UCP-208 pukkilaakeri	34
Kuva 11. Dynamometri kiinnitettynä moottorin pukkisiin.	35
Kuva 12. Dynamite alustadynamometri (Dynamite, 2016.).....	38

KUVIOT

Kuvio 1. Teho ja vääntömomentti pyörintänopeuden funktiona	24
Kuvio 2. Mittaustulokset ajan funktiona tasoitettuna ja tasoittamattomana	25
Kuvio 3. Keskipakoisvoiman aiheuttama von Mises -jännityksen jakautuminen lieriömäisessä vauhtipyörässä	29
Kuvio 4. Pyörivien osien von Mises -jännitykset	31
Kuvio 5. Akselin von Mises -jännitykset	32
Kuvio 6. Moottorin teho ja vääntömomentti pyörintänopeuden funktiona	37

TAULUKOT

Taulukko 1. Moottorin tiedot (Virkki 2015.)	7
Taulukko 2. Moottorin suoritusarvot	37

1 JOHDANTO

Työn tarkoituksena on kehittää pienehkön nelitahtimoottorin tehojen mittaamiseen soveltuva dynamometri. Laitteella on määrä saada mitattua Samuli Hallivuoren opinnäytetyönään suunnittelema ja valmistama 240 cm³ ottomoottorista teho- ja vääntökäyrä pyörintänopeuden funktiona. Järjestelmää suunniteltaessa pyritään ottamaan kuitenkin huomioon myös muut käyttömahdollisuudet, eli järjestelmästä pyritään suunnittelemaan sellainen, että se soveltuu myös muiden vastaavan tehoisten moottoreiden mittaukseen mahdollisimman pienillä muutoksilla.

Työn tuloksena on määrä syntyä tarkat piirustukset, jonka pohjalta dynamometri pystytään rakentamaan. Suunnitteluprosessiin liittyvät asiat pyritään selostamaan sellaisella tarkkuudella, että tämän opinnäytetyön lukemalla asiasta kiinnostuneet saisivat tietoa ja ideoita vastaavanlaisen järjestelmän rakentamiseksi ja ymmärtävät sen toimintaperiaatteen. Dokumentointi toimii samalla käyttöohjeena laitteiston loppukäyttäjälle.

Toimeksianto työlle tuli Turun ammattikorkeakoulu Oy:ltä, siellä Samulin omavalmistemoottorin suorituskykyä kohtaan heränneen mielenkiinnon vuoksi.

1.1 Tutkimuskohde

Moottori, jolle dynamometria tässä työssä suunnitellaan, on Samuli Hallivuoren alusta asti itse suunnittelema ja valmistama 240 cm³ nelitahtinen bensiinimoottori. Moottori on mallinnettu Solidworks-ohjelmalla ja osat koneistettu CNC-jyrsintä sekä perinteisempiä työstökoneita käyttäen pääosin itse.

Valmiina ostettuja osia moottorista löytyy vain muutamia, kuten esimerkiksi kiertokangon alasilmän laakeri sekä nokka-akseli. Kuvassa 1. on esitetty valmiita osia odottamassa moottorin kokoamista.



Kuva 1. Moottorin osia odottamassa kasausta kesäkuussa 2015. (Kuva: Samuli Hallivuori)

Se, että moottorista oli täydellinen 3D-malli saatavilla, helpotti suunnittelutyötä valtavasti. Käytännössä kaikki dynamometrin osat pystyttiin suunnittelemaan ja mallintamaan suoraan sopiviksi ilman, että tarvitsi mitata mitään fyysisistä kappaleista.

Reijo Virkin opinnäytetyössä taas on suunniteltu kyseisen moottorin kaasutin, pakoputkisto sekä venttiilien ja kanavien koko. Hänen opinnäytetyötään tutkimalla selvisi teho sekä pyörintänopeusalue, jolle moottori on alun perin suunniteltu (Taulukko 1.) Näitä tietoja hyödynnettiin lähtökohtana dynamometrin suunnittelutyössä.

Taulukko 1. Moottorin tiedot (Virkki 2015.)

Iskutilavuus	240 cm ³
Iskun pituus	65 mm
Sylinterin halkaisija	68 mm
Puristussuhde	9
Suunniteltu huipputeho	3 kW @ 3000 rpm

Koska suunniteltu ja toteutunut moottoriteho eivät kuitenkaan välttämättä todellisuudessa osu edes lähelle toisiaan, päätettiin ennen tarkempia suunnitelmia yrittää mitata varmuuden vuoksi moottorin tuottamaa tehoa polttoaineen massavirran perusteella. Tästä kerrotaan tarkemmin seuraavassa luvussa.

1.2 Tehon arviointi ennen suunnittelua

Koska dynamometristä ei haluttu käyttötarkoitukseen nähden liian järeää, eikä tietenkään myöskään alimitoitettua, päätettiin moottorin tuottamaa teholuokkaa ja aluetta pyrkiä tarkentamaan ennen tarkempia suunnitelmia.

Tämä toteutettiin mittaamalla tankista imetyn polttoaineen painoa tarkan vaa'an ja sekuntikellon avulla moottoria kuormitettaessa.

Moottorin kuormitus toteutettiin yksinkertaisuudessaan jarruttamalla sen pyörimistä vipuamalla laudanpätkällä vauhtipyörää vasten.

Mittaus onnistui sujuvasti kolmen ihmisen voimin. Yksi hoiti jarruttamisen, toinen käytti kaasua ja kolmas kirjasi tulokset ylös. Rajoittavaksi tekijäksi kuitenkin muodostui se, ettei moottorin pyörimistä pystytty jarruttamaan aivan riittävästi tällä menetelmällä. Tällöin kaasua ei voitu avata täysin auki, mikä näkyikin vähän odotettua pienempinä tuloksina.

Mitattu polttoaineenkulutus oli n. 6 grammaa 40 sekunnin mittausvälillä.

Poltetun polttoaineen massasta ja ajasta saadaan energiasisällön sekä moottorin arvioidun 20 % hyötysuhteen avulla laskettua teho ominaispolttoaineenkulutuksen kaavaa soveltamalla. (Robert Bosch GmbH. 2002, 459.)

$$b_e = \frac{Vb * \rho_B * 3600 * Hu * n_e * b_e}{t_b * P_{eff}} \quad (1)$$

Muutetaan kaava muotoon:

$$P_{eff} = \frac{Vb * \rho_B * Hu * n_e}{t_b}$$

Muunnetaan polttoaineen mitattu tilavuus vielä massaksi, jolloin kaava saadaan käyttökelpoiseen muotoon:

$$P_{eff} = \frac{B_m * Hu * n_e}{t_b}$$

$$P_{eff} = \frac{0,006kg * 42MJ/kg * 0,2}{40s}$$

$$P_{eff} = 0,00126 \frac{MJ}{s} = 1,26 kW$$

Jossa:

P_{eff} = Moottorin akseliteho (kW)

B_m = Polttoaineen kulutus mittaussvälillä (kg)

t_b = aika mittaussvälillä (s)

Hu = polttoaineen lämpöarvo (MJ/kg)

n_e = moottorin hyötysuhde

Laskennassa käytettiin bensiinin lämpöarvona 42 MJ/kg. Tuloksista huomattiin, että suunnitellusta 3 kW kampiakselitehosta puuttui yli puolet. Tässä pitää kuitenkin ottaa huomioon, että laskennassa käytettävä hyötysuhde on vain karkea arvio, kaasua ei voitu avata aivan auki, eikä todennäköisesti pyörintänopeuskaan ollut 3000 RPM, jolle huipputeho oli suunnitteluvaiheessa mitoitettu.

Näin kuitenkin saatiin varmuus sille, ettei moottorin teho ainakaan todennäköisesti ole paljoa yli suunnitellun. Näiden tietojen pohjalta lähdettiin miettimään vaihtoehtoja varsinaisen dynamometrin tyypiksi.

2 TEHODYNAMOMETRI

Tehodynamometri on laite, jolla saadaan mitattua moottorin tuottamaa tehoa ja vääntömomenttia. Useimmiten järjestelmä on liitetty tietokoneeseen, jonka ruudulla pystytään esittämään teho- ja vääntökäyrät pyörintänopeuden funktiona.

Nykyaikaisiin järjestelmiin on usein lisätty mahdollisuus samalla kerätä muutakin tietoa moottorin toiminnasta, kuten esimerkiksi seossuhdemittari. Tällöin saadaan vaivattomasti esitettyä samassa kuvaajassa seossuhde tai muuta hyödyllistä tietoa.

Tässä osiossa selitetään lyhyesti yleisimmin käytössä olevien dynamometrityyppien erot, toimintaperiaatteet ja esitetään fysiikan peruskaavoihin perustuvat laskut tehon ja vääntömomentin selvittämiseksi.

2.1 Dynamometrityypit kiinnityksen mukaan

Tehodynamometrit voidaan jakaa karkeasti kahteen pääluokkaan; alustadynamometreihin ja moottoridynamometreihin. Lisäksi on olemassa niin kutsuttuja napadynamometrejä, joihin on pyritty yhdistämään kummankin tekniikan hyvät ominaisuudet.

2.1.1 Alustadynamometri

Alustadynamometri on yleisin ja monelle autoharrastajallekin tuttu dynamometrityyppi, jolla voidaan suorittaa tehomittaus moottorin ollessa normaalisti kiinnitettynä ajoneuvoon. Mittaustilanteessa ajoneuvon moottoria kuormitetaan dynamometrin rullien päällä ajamalla.

2.1.2 Moottoridynamometri

Moottoridynamometri puolestaan on laitteisto, jossa mitattava moottori kiinnitetään suoraan dynamometriin, jolloin teho mitataan suoraan kampiakselin päästä. Tämän tyyppiä dynamometrejä käytetään useimmiten erilaisissa moottorilaboratorioissa, joissa yksittäistä moottoria on pystyttävä ajamaan pitkiä aikoja, eikä moottorille välttämättä edes ole olemassa ajoneuvoa, johon sen voisi kiinnittää. Moottorin kiinnittäminen tällai-

seen järjestelmään on työläs operaatio, jonka vuoksi moottoridynamometriä harvoin käytetään vain tehojen tarkastukseen tai moottorinohjauksen säätöön ajoneuvokäytössä.

2.1.3 Napadynamometri

Kahden edellä mainitun päätyypin väliltä löytyy myös hieman erikoisempi ratkaisu, napadynamometri. Nimensä mukaisesti tässä järjestelmässä mittausrakenteisto kiinnitetään vetävien pyörien tilalle suoraan mittauksen kohteena olevan ajoneuvon pyörännapoihin. Ruotsalainen Rototest on kaupallisten napadynamometrien tunnetuin valmistaja ja alan pioneeri.

Tämän tyyppisen järjestelmän etuja ovat pieni tilantarve ja helppo siirrettävyys. Lisäksi poistuu mahdollisuus renkaiden luistamiseen dynamometrin rullilla sekä tarve ajoneuvon sitomiselle paikoilleen. Ajoneuvon karkaamista rullilta ei napadynamometriä käytettäessä pääse mitenkään tapahtumaan. Ratkaisu ei kuitenkaan ainakaan Suomessa ole saavuttanut toistaiseksi suurta suosiota. Allekirjoittaneella ei ole tätä kirjoittaessa tiedossa ainuttakaan kaupallisia palveluita tarjoavaa yritystä, jolla olisi napadynamometri käytössä. Tutkimuskäytössä esimerkiksi Tampereen ammattikorkeakoululta kuitenkin löytyy Rototest:n valmistama napadynamometri.

2.2 Dynamometrit jarrutyypin mukaan

Newtonin III lakiin perustuen on voimalla oltava aina vastavoima ja tähän fysiikan perusilmiöön pohjautuvat myös kaikki moottorin vääntömomenttia mittaavat laitteet.

Jotta moottori voisi ylipäänsä tuottaa voimaa, jota olisi mahdollista mitata, on moottorin pyörimistä kyettävä jollakin tavalla jarruttamaan. Silloin kun tämä jarruttaminen tapahtuu dynamometrissä itsessään, kutsutaan sitä absorptioon perustuvaksi dynamometriksi. Järjestelmä siis ”imee” moottorin tuottaman tehon ja muuttaa sen lopulta tavalla tai toisella lämmöksi. Jarruvoiman tuottavan laitteiston mukaan dynamometrit voidaan jakaa vielä useampaan alaryhmään:

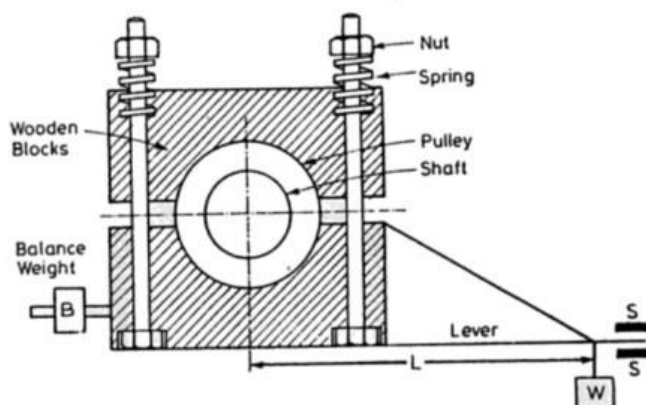
- Kitkajarru
- Hydraulinen/Pyörrevesijarru
- Pyörrevirtajarru
- Inertia

2.2.1 Kitkajarru

Kitkalla aikaansaadun jarrutusvoiman mittaamiseen perustuva dynamometri on yksi useista ns. absorptioon perustuvista mittausmenetelmistä. Yhtenä ensimmäisistä akselitehon mittaamiseen soveltuvana menetelmänä voidaan pitää ranskalaisen Gaspard de Pronyn vuonna 1826 kehittämää Prony Brake:a (Grattan-Guinness, 1990,1087).

Yksinkertaisuudessaan Prony Brake (kuva 2.) koostuu moottoriin kytketystä akselistä, jonka pyörimistä jarrutetaan kahdella akselin ympärille pultein puristettavalla puupalalla. Alempaan puupalaan on liitetty vipuvarsi, johon ripustetaan painoja (vrt. vanhanai-kainen vaaka). Ylempään puupalaan taas on kiinnitetty vastakkaiseen suuntaan osoitava varsi, johon asetetaan sopivat vastapainot, joilla kuormittamaton laite tasapainote-taan. (Brar & Bansal, 2004, 379.)

Mittaustilanteessa muttereita kiristämällä lisätään kitkavoimaa, kunnes sopivasti valitulla punnuksella varustettu vipu pysyy vaakatasossa, moottorin pyöriessä tasaisella nopeudella. Tällöin moottorin tuottama vääntömomentti ja punnuksella ja vipuvarrella aikaan saatu vastakkaissuuntainen vääntömomentti ovat yhtä suuret. (Brar & Bansal, 2004, 379.)



Kuva 2. Prony Brake periaatekuva (Brar & Bansal, 2004, 379.)

Akselilla vaikuttava vääntömomentti saadaan tällöin laskettua voiman momenttiyhtälön avulla. (Robert Bosch GmbH. 2002, 37.)

$$M = F * r \quad (2)$$

Jossa:

$M =$ Vääntömomentti (Nm)

$F =$ Punnuksen paino (N)

$r =$ Voiman vaikutussuoran etäisyys akselistasta (m)

Momentti voidaan edelleen muuttaa akselitehoksi kun muodostetaan yhtälö momentin ja pyörimisliikkeen välille. (Robert Bosch GmbH. 2002, 37.)

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

$$\Leftrightarrow P = \frac{2\pi N}{60}$$

Jossa:

$P =$ Akseliteho W

$\omega =$ akselin kulmanopeus (rad/s)

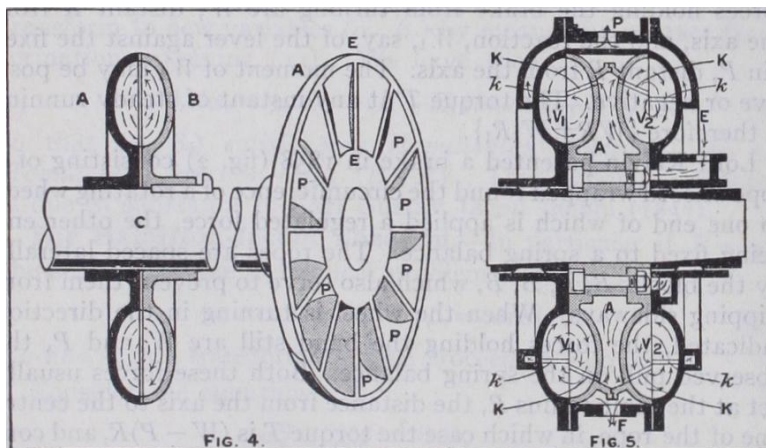
$N =$ akselin pyörintanopeus (r/min)

Kitkavoimaan perustuvia jarruja ei dynamometreissä tänä päivänä juurikaan käytetä niiden suuren ja vaikeasti hallittavan lämmöntuoton, nopean kulumisen sekä rajoitetun pyörintänopeusalueen vuoksi. Tämä vaihtoehto esiteltiin, koska mittausteknisesti täsmälleen samaan periaatteeseen pohjautuvat myös nykyaikaisemmat staattiseen kuormitukseen perustuvat mittauslaitteet. Näissä kitkajarru vain on korvattu kehittyneemmällä järjestelmällä ja punnukset venymäliuskoihin perustuvilla voima-antureilla.

2.2.2 Hydraulinen/pyörrevesijarru

Vesipyörrejarrun toiminta perustuu suljetussa kotelossaan pyörivään turbiiniin, joka pyöriessään saa aikaan pyörteisen vesimassan. Turbiinin liikuttama vesimassa taas pyrkii pyörittämään koteloita, johon on kiinnitetty momentin mittaamista varten voimaanturi. Koska tässäkin jarrutyypissä kaikki teho muuttuu lämmöksi, on kotelossa liikkuvaa vettä jäähdytettävä jatkuvasti. Veden määrää kotelossa muuttamalla säädellään myös jarrutustehoa. Jarrutustehon säätäminen riittävällä tarkkuudella oli ensimmäisissä versioissa haasteellista, mutta nykyään tietokoneen ohjaamalla sähköisillä venttiileillä tämä ei ole ongelma (Plint & Martyr, 1999, 119–122,133).

Vuonna 1887 W. Frouden kehittämä tehokas vesipyörrejarru (kuva 3.) koostuu kahdesta parista samanlaisia, vastakkain sijoitettuja turbiinipyöriä A ja B, jotka muodostavat rengasmaisen kanavan turbiinikoteloon. A:n ollessa kiinteästi kiinni kotelossa pyrkii akseliin kiinnitetty B veden pyörteiden välityksellä pyörittämään kotelointia. (Beaumont, 1889, 167.)



Kuva 3. Pyörrevesijarrun periaatekuva (Beaumont, 1889, 167.)

Hydrauliikkapumppuun perustuvassa jarrussa pumpun tilavuusvirtaa kuristamalla tuotettu öljynpaine pyrkii vastustamaan pumpun pyörimistä. Pumpun jarrutusteho riippuu paineen ohella pyörimisnopeudesta.

Hydraulinen järjestelmä on kokoonsa nähden erittäin tehokas, mutta vaatii muiden absorptioon perustuvien dynamometriänsä tapaan tehokkaan jäähdytyksen. Mittaustulokset saadaan myös suoraan pumpun tuottamaa painetta mittaamalla, jolloin erillisiä voimaantureita ei tarvita. Tällöin kuitenkin pumpun kierrosluvun mukaan vaihteleva hyö-

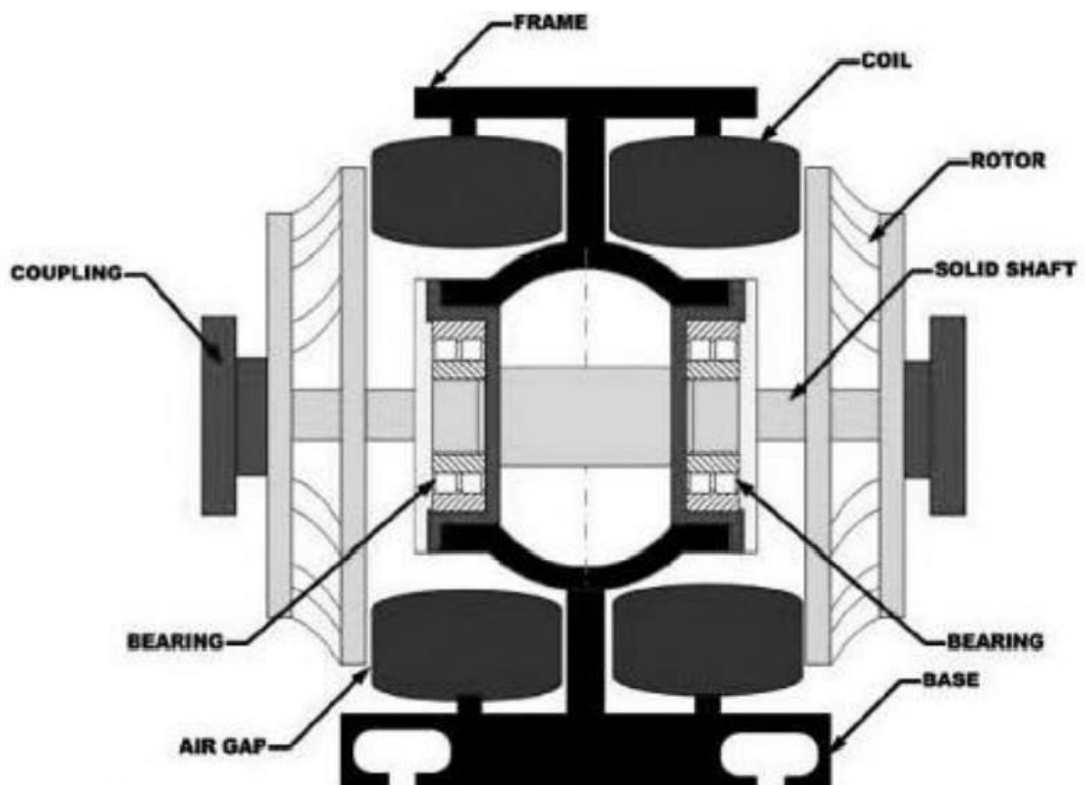
tysuhde aiheuttaa epätarkkuutta mittauksissa, ellei se ole tarkasti tiedossa. (Lätti, 2011, 11.)

Järjestelmä mahdollistaa jarrutusvoiman tarkan säädön ja täyden kapasiteetin koko pyörintänopeusalueella, mutta kaikesta huolimatta se ei ole kuitenkaan saavuttanut suurta suosiota (Plint & Martyr, 1999, 122–123).

2.2.3 Pyörrevirtajarru

Pyörrevirtajarrussa jarrutusvoima tuotetaan sähkömagneettisella induktiolla. Jarrun käyttöakselille kiinnitettyyn roottoriin indusoituu pyörrevirtoja sen pyöriessä staattorin keloilla tuotetun magneettikentän sisällä. Pyörrevirroista aiheutuu staattorin pyörimistä jarruttava voima, joka samalla kuumentaa staattoria voimakkaasti. (Plint & Martyr, 1999, 123–124.)

Useimmiten dynamometrikäytössä jäähdytys on hoidettu staattoriin integroidulla keskisäilytyksellä, jonka läpileikkaus on esitetty kuvassa 4.



Kuva 4. Kaksiroottorinen ilmajäähdytetty pyörrevirtajarru (Killedar, 2012, 104.)

Jarrutustehoa säädetään yleensä staattorin syöttövirtaa säätelemällä, mutta kesto-
magneetteja sähkömagneettien sijaan käytettäessä voidaan tehoa säätää myös staat-
torin ja roottorin ilmaväliä muuttamalla, kuten esim. kuntopyörissä usein tehdään. Pyör-
revirtajarru on erityisesti alustadynamometrikäytössä hyvin yleinen.

2.2.4 Inertia

Inertiaan, eli kappaleen massan hitauteen perustuvassa järjestelmässä moottorin pyö-
rimistä vastustaa dynamometrin rullien massan hitausmomentti. Englanniksi termi ly-
hennettäisiin MOI, joka tulee sanoista moment of inertia.

Inertia, toisin sanoen pyörivän massan kyky vastustaa kulmanopeuden muutosta on
mahdollista määrittellä tarkasti matemaattisesti, kun esimerkiksi tiedetään kappaleen
muoto ja materiaalin tiheys.

Taulukkokirjasta saadaan valmis kaava esimerkiksi umpinaisen lieriön muotoisen kap-
paleen hitausmomentin laskemiseen. (Tammertekniikka, 2012, 94).

$$I = \frac{1}{2} * m * r^2 \quad (4)$$

Jossa:

$I =$ kappaleen hitausmomentti ($kg * m^2$)

$m =$ kappaleen massa (kg)

$r =$ lieriön säde (m)

Lieriömäisen kappaleen massa voidaan selvittää joko punnitsemalla, tai mittojen ja
materiaalin ominaispainon avulla käyttämällä laskukaavaa:

$$m = \pi * r^2 * h * \rho \quad (5)$$

Jossa edellisen kaavan termien lisäksi:

$h = \text{lieriön pituus (m)}$

$\rho = \text{kappaleen tiheys (kg/m}^3\text{)}$

Inertiadynamometri on anturointinsa puolesta kaikkein yksinkertaisin toteuttaa. Koska hitausmomentin suuruus on jo etukäteen laskennallisesti selvitetty, ainoaksi mitattaviksi suureiksi jäävät aika, pyörintänopeus ja sen muutos. Käytännössä siis tarvitaan vain anturi, jolla saadaan rullan pyörintänopeutta mitattua riittävällä tarkkuudella.

Kun kulmanopeuden muutos tietyllä aikavälillä on saatu mitattua, voidaan moottorin tuottama keskiteho ko. aikavälillä laskea seuraavien yhtälöiden avulla:

Lasketaan ensin hetkellinen kulmakiihtyvyys mittauspisteiden välillä. (Tammertekniikka, 2012, 92).

$$\alpha = \frac{d\omega}{dt} \quad (6)$$

Jossa:

$\alpha = \text{kulmakiihtyvyys (rad/s}^2\text{)}$

$d\omega = \text{kulmanopeuden muutos (rad/s)}$

$dt = \text{aika (s)}$

Kulmakiihtyvyyden ja hitausmomentin avulla päästään nyt käsiksi moottorin tuottamaan vääntömomenttiin pyörimisen liikeyhtälön avulla. (Tammertekniikka, 2012, 93.)

$$M = I * \alpha \quad (7)$$

Jossa:

$M = \text{moottoriin tuottama vääntömomentti (Nm)}$

$I = \text{Mittauslaitteiston hitausmomentti (kg * m}^2\text{)}$

Tällä mittaustekniikalla moottorin pyörintänopeusalue jaetaan mittausvaiheessa pienen pieniin osiin (dt) ja lasketaan jokainen mittauspisteiden väli erikseen. Lopuksi tulokset voidaan esimerkiksi sijoittaa kuvaajaan ja esittää pyörintänopeuden funktiona, jolloin syntyy perinteinen vääntömomenttikäyrä.

Tämän tyyppisessä järjestelmässä pyörintänopeusalueen läpi käyminen kestää tyypillisesti alle 10 sekuntia, joten mittaus vaatii aina jonkinlaista automatisoitua tiedonkeruuta kirjaamaan pyörintänopeuden muutokset ajan funktiona ylös useita kertoja sekunnissa. Tässä tapauksessa hyväksi puoleksi voidaan lukea myös mittaustarkkuuden kasvaminen moottorin tehon pienentyessä, eli täysin päinvastoin kuin tapahtuu muun tyyppisten dynamometrien kohdalla.

Yksinkertaisen rakenteen, helposti toteutettavan anturoinnin, sekä helposti saatavilla olevan mittausohjelmiston vuoksi mittausjärjestelmän tyyppiä valikoitui tässä työssä nimenomaan inertiaan perustuva laitteisto. Inertiaan perustuvan laitteiston katsottiin myös olevan edullisin valmistaa.

3 MITTAUSLAITTEISTO

3.1 Ohjelmisto

Sopivaa ohjelmistoa mittauslaitteistoon pohdittaessa tutkittiin ensin kaupallisia vaihtoehtoja, joita inertiaan perustuvalla järjestelmälle näyttikin löytyvän runsaasti. Muutamia ilmaisia ohjelmia oli kuitenkin myös saatavilla. Lupaavalta vaikuttanut ohjelmisto löytyikin hieman yllättäen RC-autoharrastajalta saadun vinkin perusteella. Mikä parasta, harrastuspohjalta kehitetty SimpleDyno-ohjelmisto on täysin ilmainen ja ladattavissa suoraan internetistä.

3.1.1 WT-lite

Esimerkkinä maksullisista ohjelmistoista, Suomessa toimiva Dynomec tarjoaa WT-lite -nimistä ohjelmisto-kierroslukuanturipakettia kohtuulliseen 200 € hintaan. Tässä, kuten useimmissa muissakin vastaavissa järjestelmissä, kierroslukuanturi olisi kytkettävä sarjaportin (RS-232) välityksellä tietokoneeseen. (Dynomec, 2016).

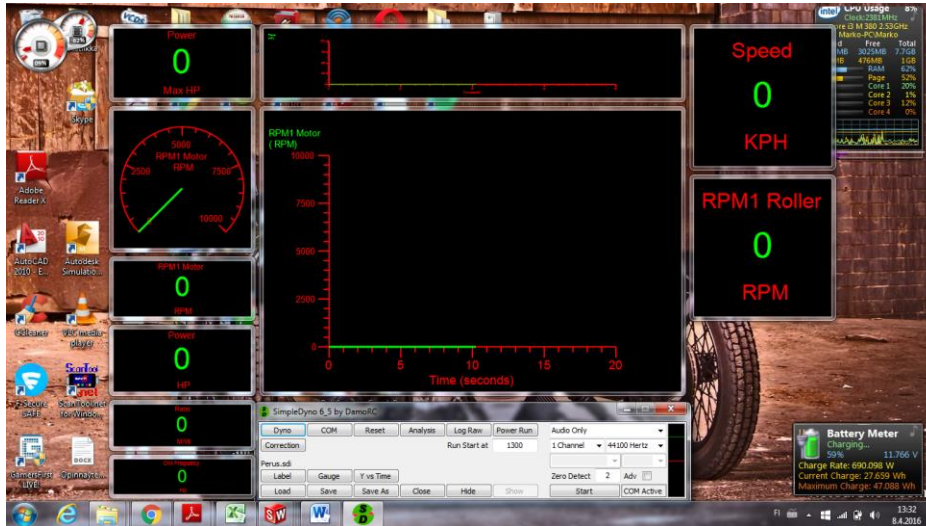
Tietokoneiden sarjaportit ovat jo mennyttä aikaa, eikä niitä ole varsinkaan kuluttajille suunnatuissa kannettavissa tietokoneissa juuri näkynyt lähes kymmeneen vuoteen. Saatavilla kuitenkin on USB → RS-232-adapttereita, mutta kokemukseni mukaan nämä harvoin toimivat toivotulla tavalla. Tämä vuoksi ohjelman valmistajakaan ei takaa toimivuutta adapteria käytettäessä. Tästä syystä sopivan ohjelmiston etsintöjä jatkettiin vielä.

3.1.2 SimpleDyno

SimpleDyno on alun perin nimimerkki DamonRC:n kehittämä ja nimensä mukaisesti hyvin yksinkertainen radio-ohjattavien autojen tehonmittaukseen tarkoitettu ohjelmisto. Sittemmin kehitystyöhön on osallistunut useampiakin harrastajia ja myös ohjelmiston lähdekoodi on tällä hetkellä vapaasti ladattavissa internetistä.

Vaikka ohjelma onkin kehitetty alun perin pienoismalleja varten, taipuu se helposti jopa täysikokoisen henkilöauton tehonmittaukseen tietyin rajoituksin.

Myös ohjelman graafinen käyttöliittymä on hyvin pitkälle muokattavissa tarpeen mukaisesti ja se sisältää mm. melkoisen määrän reaaliaikaista dataa näyttäviä mittareita täysiveristen ammattikäyttöön suunniteltujen ohjelmistojen tapaan, kuten kuvasta 5. on nähtävissä.



Kuva 5. SimpleDyna:n käyttöliittymä

Erikoinen ja samalla lopullisen ohjelmistovalinnan ratkaissut tekijä on ohjelman käyttämä anturointi, joka hyödyntää tietokoneen mikrofoniiliitäntää. Yksinkertaistettuna mikrofoniiliitäntään kytketään vain induktiivinen anturi, eli kela, joka muuttaa dynamometrin rullaan kiinnitetyn ns. liipaisinyörän hampaiden tai magneettien aiheuttamat magneettikentän muutokset sähköiseksi signaaliksi. Tietokoneen äänikortin DA-muunnin taas muuttaa signaalin digitaalseksi ohjelmiston ymmärtämäksi signaaliksi jopa 44 kHz näytteenottotaajuudella.

Ohjelma osaa tallentaa mittaustiedot myös Microsoft Excel -yhteensopivassa muodossa, jonka avulla esimerkiksi laskentamallin oikeellisuus oli helppo tarkastaa. SimpleDyna osaa kuitenkin suorittaa kaiken varsinaisen laskennan itsenäisesti ja esittää tulokset selkeästi graafisessa muodossa (katso kuvio 1, s.24), joten normaalissa käytössä ei datan kierrättäminen Excelin kautta ole tarpeellista.

3.2 Vaadittava anturointi

Tehodynamometri vaatii luonnollisesti mittausohjelmiston tueksi aina jonkinlaisen anturoinnin, jolla saadaan dynamometrissä tapahtuva mekaaninen työ mitattua ja muutettua digitaaliseen muotoon. Yksinkertainen anturointi olikin pääasiallinen syy siihen, miksi päädyimme tässä työssä käyttämään inertiaan perustuvaa mittausjärjestelmää.

Ainoaksi mitattavaksi suureeksi jäävät siis aika sekä vauhtipyörän pyörintänopeus. Ajan mittaamisen hoitaa tietenkin mittausohjelmisto tietokoneen sisäänrakennetun tarkkan kellon avulla.

Pyörintänopeuden mittaamiseksi yleisimmät käytössä olevat anturityypit ovat hall- ja induktiivinen anturi. Esimerkiksi Dynomecin tarjoama WT-lite käyttää hall-anturia, kun taas SimpleDyno on suunniteltu toimimaan yksinkertaisemmalla induktioon perustuvalla anturilla, vaikkei estettä monimutkaisemmankaan anturoinnin rakentamiselle ohjelmiston puolella toki ole. (Dynomec, 2016; SimpleDyno, 2016.)

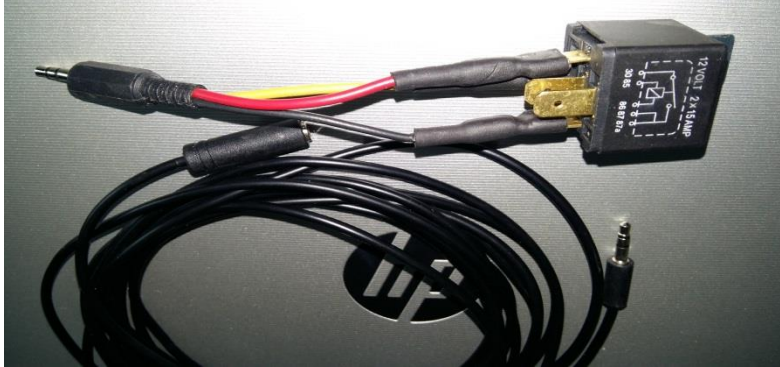
Pyörintänopeusanturin rakentaminen

SimpleDynon kehittäjän ohjeistuksen mukaan pyörintänopeuden mittaamiseen soveltuu käytännössä lähes mikä tahansa kela sopivalla impedanssilla. Hänen laatimassaan esimerkissä anturina käytetäänkin aivan tavallista nappikuuloketta. (SimpleDyno 2016).

Nappikuulokkeen käyttäminen anturina ei kuitenkaan ole kovin toimiva ratkaisu, koska kaiutin toimii aina myös jossain määrin mikrofonina. Tällöin anturi reagoisi liipaisinpyörän aiheuttaman magneettikentän vaihtelun lisäksi myös ääniaaltoihin aiheuttaen signaaliin häiriöitä. Myöskään ajoneuvokäytössä yleisiä induktiivisia kampiakselin kulmanopeusantureita ei voitu käyttää, sillä näiden induktanssi on aivan turhan suuri. Signaalijännitteen taso suurilla pyörintänopeuksilla saattaa nousta jopa yli 100 V, joten suoraan tietokoneen mikrofoniporttiin kytkettynä seurauksena olisi varmasti ainakin äänikortin välitön tuhoutuminen. Tavallisesti äänikortin mikrofoniliitännän suurin sallittu sisääntulojännite on suuruusluokaltaan < 400 mV, mutta varmaa tietoa tähän ei ole saatavilla, koska laitevalmistajat eivät ole nähneet tarpeelliseksi sitä ilmoittaa.

Halpa ja yksinkertainen anturi valmistettiin lopulta itse auton 12 V releestä. Releen sisältämän vetokäämin napoihin 86 ja 85 kytkettiin 3,5 mm stereo-liitin. Viiden metrin

jatkokaapelin avulla anturi on nyt helppo kytkeä tietokoneeseen. Releen purkaminen liitosten tekemiseksi ei ollut tarpeellista, vaan kytkennät voitiin tehdä puristettavilla lattiiliittimillä releen ulkopuolelle. Valmis anturi on esitetty kuvassa 6.



Kuva 6. Pyörintänopeusanturi jatkojohtoineen

SimpleDynon yksi hienoimmista ominaisuuksista on se, että anturi kytketään suoraan tietokoneen mikrofoniporttiin, eli mittauselektronikan määrä sekä hinta on saatu tehokkaasti minimoitua. Analogisen anturin signaalin muuttaminen digitaalseksi hoidetaan tällöin tietokoneen omalla äänikortilla, jopa 44 kHz:n taajuudella. Yhden pulssin per kierros tuottavalla liipaisulla mittaustarkkuus ja suurin mitattavissa oleva pyörintänopeus muodostuvat näin ollen vähintäänkin riittäviksi.

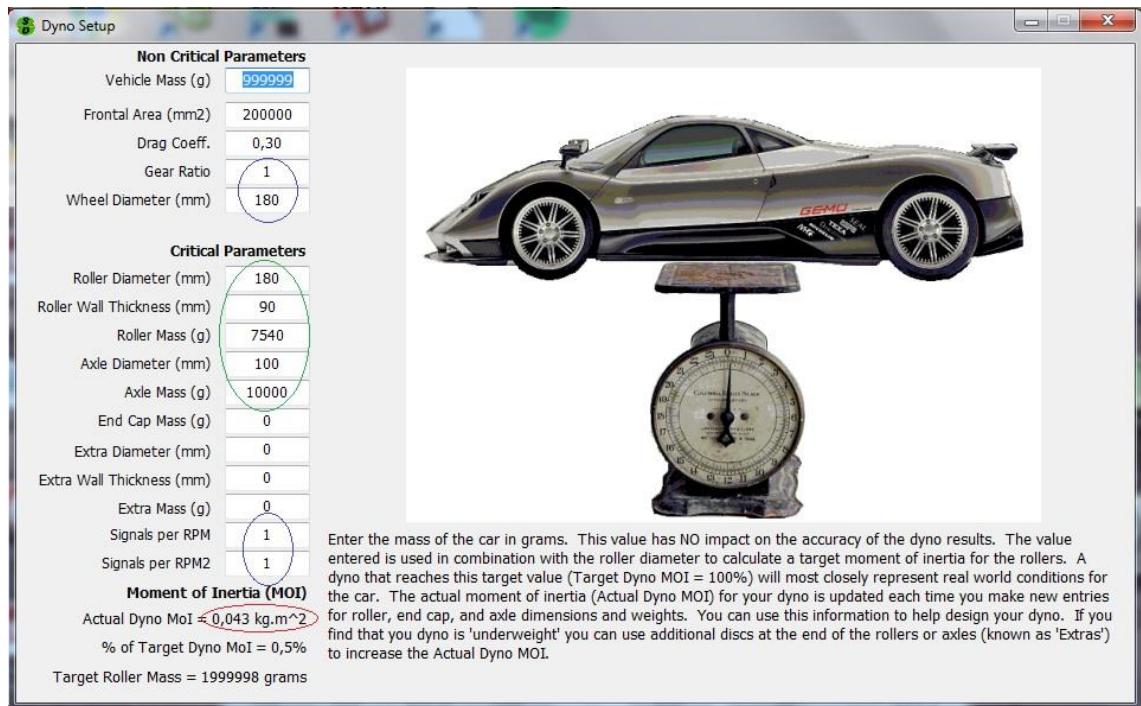
3.3 Mittauslaitteiston asetukset ja testaus

Kun käytettävä mittausohjelmisto saatiin valittua ja pyörintänopeusanturi valmistettua päätettiin järjestelmää vielä testata moottoriin kytkettynä ilman varsinaista dynamometriä. Samalla saatiin vielä tarkennettua moottorin tehoarviota ennen dynamometrin lopullisten mittojen lyömistä lukkoon.

Moottorissa itsessään on melko raskas vauhtipyörä ja kampiakseli, joten näiden oman hitausmomentin avulla on jo mahdollista mitata moottorin tuottama teho, vaikkakin kyseenalaisella tarkkuudella.

Mittaus suoritettiin yksinkertaisesti niin, että SolidWorks:n avulla tarkastettiin 3D-mallista kampiakselin ja vauhtipyörän yhteenlaskettu hitausmomentti ja se syötettiin mittausohjelmiston asetusikkunaan (kuva 7.) Pyörintänopeusanturi asetettiin moottorin

sytytysjärjestelmän läheisyyteen, jolloin kierrosluku saatiin luettua tarkasti sytytyksen tuottamista induktiivisista pulsseista.



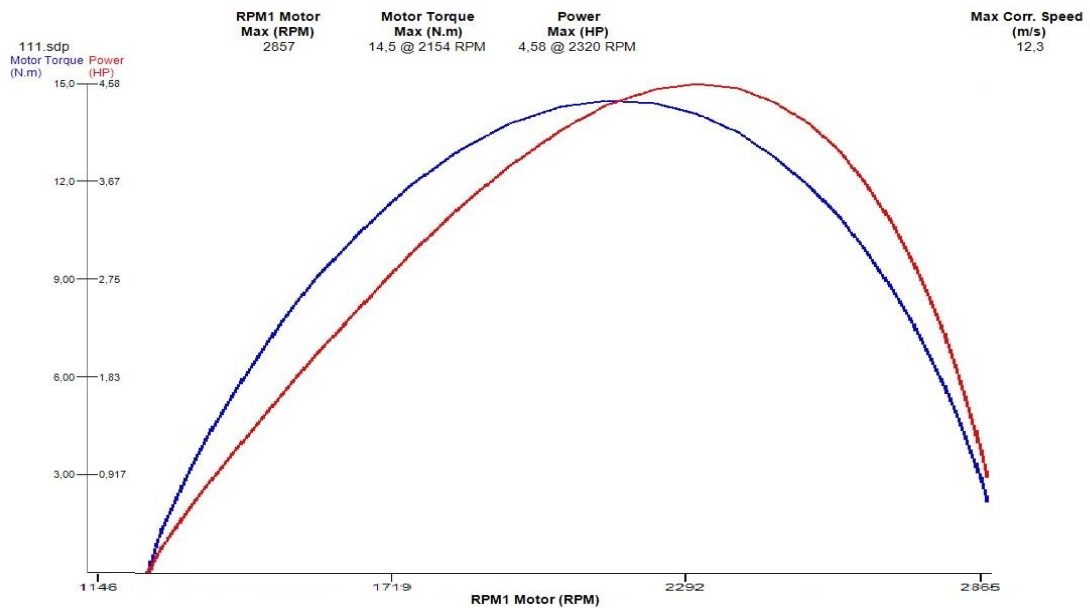
Kuva 7. SimpleDynon asetusikkuna

Kuviossa vihreällä ympyröityjä rullan mittoja muuttamalla haettiin punaisella ympyrällä merkitty hitausmomentti tarkasti oikeaksi, joka tässä tapauksessa oli SolidWorks:n ilmoittamana 0,043 kg*m².

Sinisillä ympyröillä merkityt kentät taas vaikuttavat mitattuun pyörintänopeuteen. Hukakakipinäsytytyksellä varustetusta moottorista pulsseja tulee 1 kpl kierrosta kohden. Moottorin ja kuvitteellisen dynamometrin rullan välinen välityssuhde on 1. Tarkemmin eri asetuskenttien vaikutukset ja muut asetusten määrytykset on selostettu SimpleDynon käyttöohjeessa, jonka lukemalla mittauslaitteiston saattaminen käyttökuuntoon onnistuu asiaan hieman perehtyneeltä henkilöltä helposti.

Itse mittaus tapahtuma käynnistyy "PowerRun" nappia klikkaamalla. Tämän jälkeen moottorin pyörintänopeuden ylittäessä ennalta asetetun "run start at" -kentän arvon alkaa ohjelma tallentaa mittaus tapahtumaa muistiin. Mittaus päättyy automaattisesti kun moottorin kierrosluku kääntyy laskuun.

Tämän jälkeen näytölle piirtyy pyörintänopeuden kasvua kuvaava käyrä ja ohjelma pyytää valitsemaan mahdollisimman tarkasti tätä vastaavan matemaattisesti määritetyn funktion. Valitun funktion tarkoitus on tasoittaa pyörintänopeutta kuvaava käyrä, jotta pyörintänopeuden mittauksessa mahdollisesti esiintyvät häiriöt eivät näkyisi mittaustuloksissa, jotka on esitetty kuviossa 1.



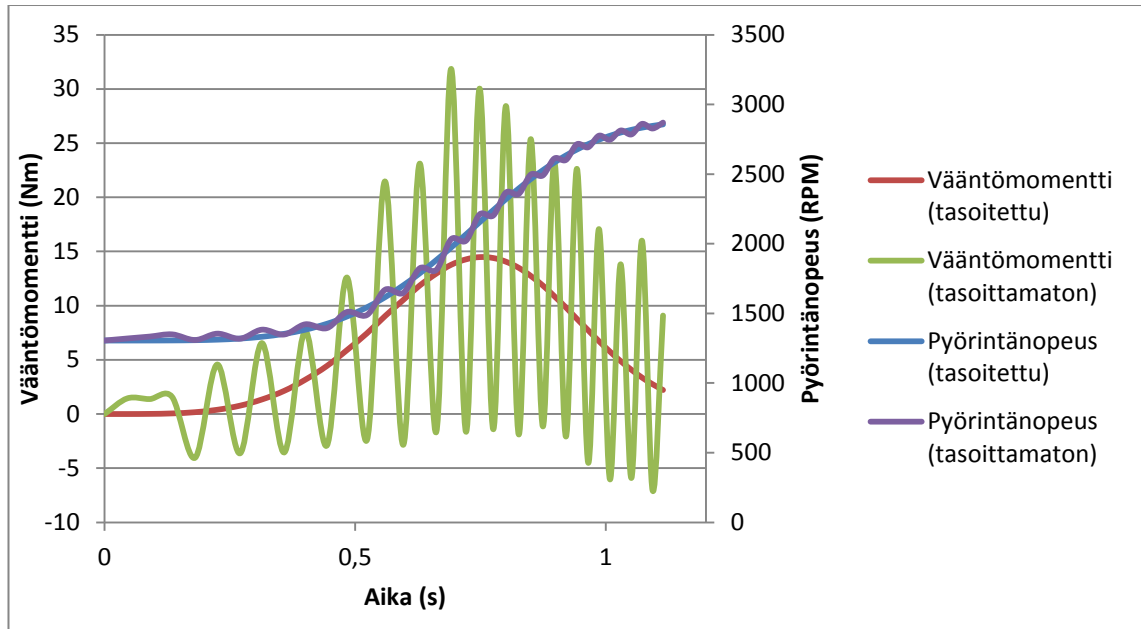
Kuvio 1. Teho ja vääntömomentti pyörintänopeuden funktiona

Näin saatujen alustavien mittaustulosten perusteella vaikuttaisi, että suurin teho todellakin saavutetaan hyvin matalilla kierroksilla ja sekä tehoa että vääntöä olisi jopa suunniteltua enemmän. Tuloksia tarkastellessa on huomattava, että mittausta oli pienestä inertiaasta johtuen momentin ja tehon osalta melko epätarkka. Lisäksi moottori ei teknisesti ongelmasta johtuen suostunut käymään suurilla kierroksilla, vaan sammui täysin aina noin 3000 RPM kohdalla, mikä näkyy myös tehokäyrässä.

Käyntihäiriön syyksi paljastui myöhemmin liian kova öljynpaine hydraulisissa venttiilivälysten tasaimissa, mikä kierrosten noustessa esti venttiilien kunnollisen sulkeutumisen. Tämä saattoi hyvinkin vaikuttaa mittaustuloksiin ylemmillä kierroksilla jo ennen moottorin täydellistä sammumista.

Näin saatiin kuitenkin hieman tarkempaa tietoa moottorin ominaisuuksista dynamometrin mekaanisen suunnittelun avuksi, sekä varmistettua mittaustulosten toimivuus.

Maininnan arvoista lienee ainakin pyörintänopeuden mittaustarkkuus, sillä koko kuviossa (kuvio 2.) esitetyn pyörintänopeusalueen mittaus kesti alle 1,2 sekuntia. Näinkin lyhyeen aikaan ohjelma sai mahdutettua kuitenkin 35 mittauspistettä, eli yhden mittauspisteen per kierros.



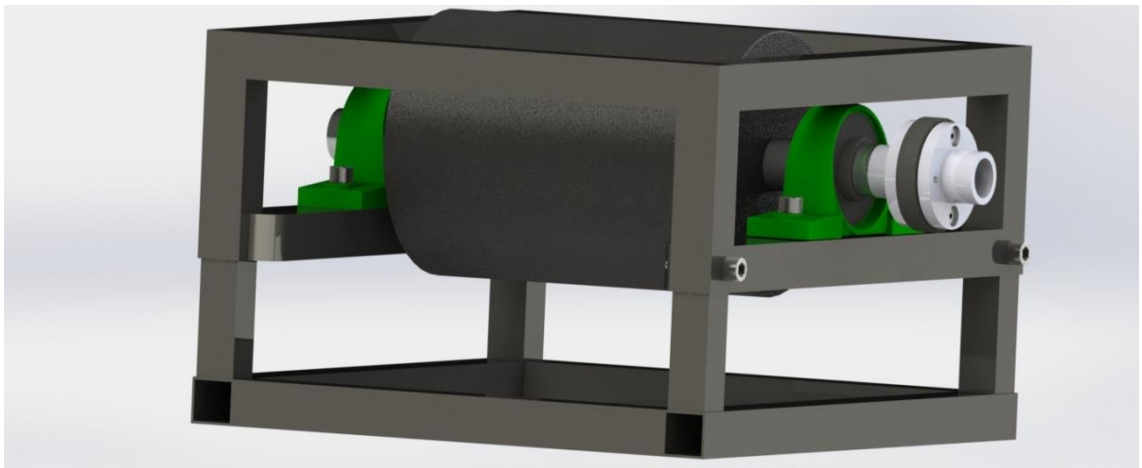
Kuvio 2. Mittaustulokset ajan funktiona tasoitettuna ja tasoittamattomana

Mittaustapahtuman Excel-taulukosta poimituista tiedoista sai hyvin havainnollistavan esityksen, josta on selkeästi nähtävissä miksi pyörintänopeuden sovittaminen matemaattisesti määritellylle käyrälle on tarpeen. Ohjelman mittaustarkkuus on nimittäin niin suuri, että yksisylinterisestä moottorista jokainen työ- ja puristustahti ovat muutoin erikseen luettavissa ajan funktiona piirretystä vääntökäyrästä. Kuvaajan tasoittamattomia vihreää ja violettiä käyrää vertaamalla tasoitettuihin punaiseen ja siniseen on kyseinen ilmiö helposti nähtävissä.

3.4 Mekaaninen rakenne

Dynamometrin mekaanisen osan suunnittelussa tärkeimmät lähtökohdat olivat:

- Rullan sopiva inertia
- Osien mekaaninen kestävyys
- Kevyt rakenne
- Mahdollisimman kompaktit ulkomitat
- Mittauksen kohteena olevaan moottoriin soveltuva kiinnitys
- Mahdollisuus muuhun käyttöön myöhemmin
- Helppo valmistettavuus
- Materiaalin hinta



Kuva 8. Dynamometri mallinnettuna kokonaisuudessaan

Osien suunnittelussa käytettiin apuna SolidWorks-mallinnusohjelmaa, sekä pyörivien osien mekaanisen kestävyuden tarkasteluun Autodesk Simulation FEM-laskentaohjelmistoa.

3.4.1 Rulla

Rullan tärkein tehtävä on tuottaa järjestelmään tehonmittauksessa tarvittava hitausmomentti. Muita tärkeitä suunnitteluun vaikuttavia tekijöitä olivat keveyden ja ulkomittojen ohella kestävyys. Lisäksi laitteen muuta käyttöä ajatellen mitoitus pyrittiin saamaan

sellaiseksi, että rullan päällä pystyisi myös ajamaan kevytmoottoripyörällä tms. pienitehoisella 2-pyöräisellä kulkuneuvolla.

Sopivan halkaisijan valitseminen rullalle olikin yksi suunnitteluprosessin monimutkaisimmista ja hankalimmista asioista, sillä huomioon otettavia muuttujia oli useita:

- Halkaisijan vaikutus hitausmomenttiin on huomattavasti suurempi kuin rullan pituuden. Suurempi rullan halkaisija mahdollistaa täten kevyemmän rakenteen.
- Halkaisija ja pyörintänopeus määrittävät keskipakoisvoiman, joka pyrkii repimään pyörivän kappaleen palasiksi.
- Laitteen turvallisuuden kannalta rullan mitoitus on ratkaisevan tärkeässä asemassa, joten myös käytettävän varmuuskertoimen on oltava riittävä.
- Esim. valurautaa materiaalina käytettäessä sopiva varmuuskerroin materiaalin murtolujuuden suhteen olisi 10–13 ja teräksestä valmistettuna suurin turvallinen kehänopeus noin 61 m/s (Oberg 2012, 3007).

Lisäksi rulla on pystyttävä valmistamaan sorvaamalla siten, että se on riittävän hyvässä tasapainossa ja tarvittaessa tasapainotettavissa.

Sopiva rullan hitausmomentti arvioitiin luvussa 2.2.4 esitetystä pyörimisliikkeen yhtälöstä johdetun kaavan avulla:

$$M = I * \alpha \quad (8)$$

$$\langle - \rangle I = \frac{M}{\alpha}$$

Esimerkkilaskussa käytettiin 52 rad/s kulmakihtyvyyttä, joka vastaa likimain 1000 RPM – 6000 RPM kiihdytystä 10 sekunnin aikana, ja moottorin tuottaman vääntömomentin keskiarvona 10 Nm.

$$I = \frac{10 \text{ Nm}}{52 \text{ rad/s}^2}$$

$$I = 0,1923 \text{ kg} * \text{m}^2$$

Jossa:

$I = \text{vauhtipyörän hitausmomentti}$

$M = \text{moottorin tuottama keskimääräinen vääntömomentti (Nm)}$

$\alpha = \text{haluttu kulmakiihtyvyys (rad/s}^2\text{)}$

Koska moottorin tuottama tarkka vääntömomentti ei luonnollisesti suunnitteluvaiheessa ollut tiedossa, ei tämän tarkemmille laskutoimituksille mitoitusvaiheessa nähty tarvetta.

Vauhtipyörän mitat pyrittiin siis valitsemaan sillä perusteella, että kiihdytysajaksi 1000–6000 RPM alueen yli tulee yläkanttiin arvioidulla 10 Nm keskiväännöllä vähintään 10 sekuntia. Tällöin, mikäli mitattavan moottorin tehoalue todella loppuu jo 3000 RPM kohdalla, kuten alun perin on suunniteltu, jää kiihdytysajaksi vielä kuitenkin yli 5 sekuntia, jonka arvioitiin vielä riittävän.

Kaikki pyörivät osat on huomioitava lopullisessa hitausmomentin laskennassa, jonka tulokset sitten syötetään mittausohjelmistoon. Tämä tieto saatiin helpoiten ja tarkimmin suoraan SolidWorks-ohjelmasta, kun osat oli mallinnettu. Mukaan laskettiin tarkkuuden parantamiseksi myös moottorin kampiakselin sekä oman vauhtipyörän hitausmomentit.

Vauhtipyörän halkaisijaksi valikoitui lopulta 200mm ja pituudeksi 280 mm, joka tekee hitausmomentiksi 0,35 kg*m². Painoa rullalla on tällöin teräksestä valmistettuna n. 69 kg, joka alkaa olla siirreltävyuden kannalta maksimirajoilla. Näiden mittojen katsottiin olevan hyvä kompromissi valmistettavuuden, painon ja turvallisuuden suhteen.

Akselit asennetaan rullaan tarkalla sovituksella koneistettuihin 20mm syviin reikiinsä ja hitsataan kiinteästi paikoilleen. Tämän jälkeen koko paketti sorvataan yhdellä kiinnityksellä lopullisiin mittoihin rullan ja akselin osalta. Tällä tavalla saadaan akselit linjattua suoraan ja mahdollisimman keskelle rullaa. Näin tehtynä paketin pitäisi olla jo lähtökohteisesti täydellisessä tasapainossa.

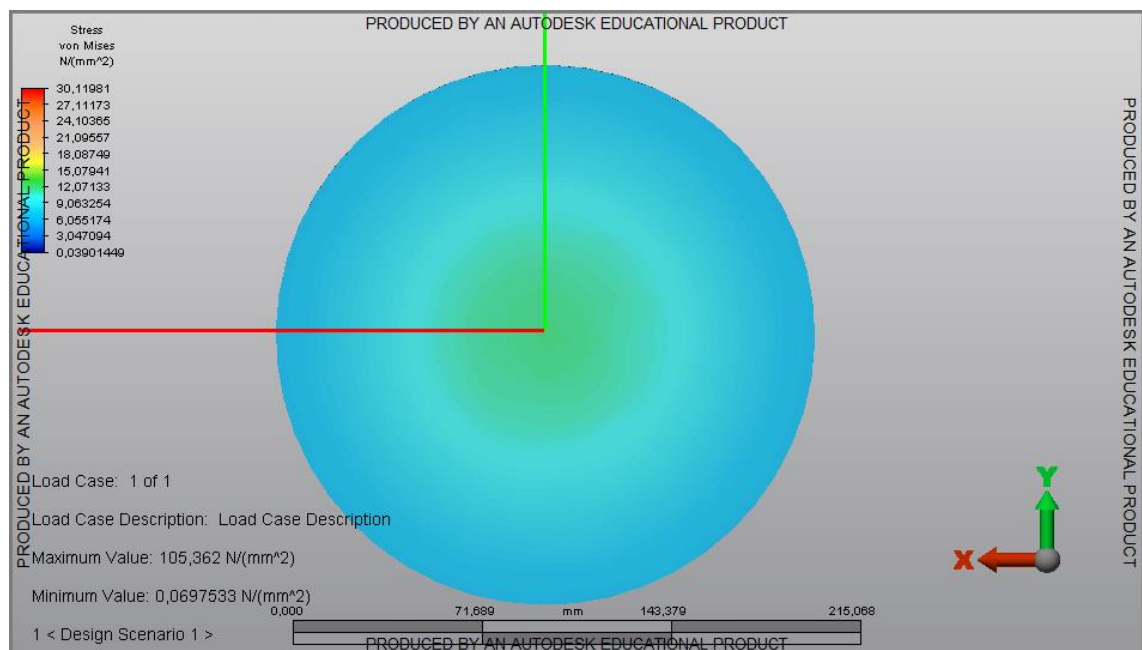
3.4.2 Rullan lujuustarkastelu

Kuten edellisessä luvussa todettiin, on rullan suunnittelu dynamometrin turvallisuuden kannalta ratkaisevassa osassa. Liian heikkoa kappaletta pyöritettäessä korkealla pyörimisnopeudella saattaa seurauksena olla kappaleen murtolujuuden ylittyminen, jolloin

sen osat sinkoutuvat tangentin suuntaan. Kohtalaisen raskaan kappaleen ja korkean pyörintänopeuden ollessa kyseessä olisi tilanne potentiaalisesti hengenvaarallinen. Tämän vuoksi rullan lujuuden varmistamiseen kiinnitettiin erityistä huomiota. Keskipakovoimasta aiheutuva jännitys laskettiin Autodesk Mechanical Simulation -ohjelmistolla ja tulosten paikkansapitävyys tarkastettiin vielä lopuksi käsin laskemalla.

Von Mises -lujuushypoteesin avulla pyritään ennustamaan materiaalin käyttäytymistä moniakselisessa jännitystilassa, joka ei pelkästään materiaalin aksiaalisesta vetokoikeesta saatavan jännitys-venymäyhteyden ja lujuusparametrien avulla ole mahdollista. Von Mises -jännitys koostuu useista erisuuntaisista myötöehdon mukaisesti yhteen lasketuista jännityskomponenteista. Tätä jännitystä materiaalin myötörajaan vertaamalla pystytään ennustamaan kestäkö rakenne rasituksen, vai aiheutuuko tästä pysyviä muodonmuutoksia. (Salmi & Pajunen 2010, 329–335.)

Kuvioissa 3 ja 4 on näkyvissä rullan von Mises -vertailujännitys. Laskenta kaikissa esitettyissä kuvioissa on tehty pyörintänopeudella 6000 RPM. Laskennan perusteella suurin jännitys on alle 15 N/mm^2 ja se sijaitsee rullan keskiosassa.



Kuvio 3. Keskipakovoiman aiheuttama von Mises -jännityksen jakautuminen lieriömäisessä vauhtipyörässä

Tämä tarkoittaa sitä, että rullan voisi von Mises -myötöehdon perusteella turvallisesti valmistaa materiaalista, jonka myötölujuus ylittää 150 MPa. Tällöin varmuuskerroin olisi 10. Käytännössä kaikki teräslaadut täyttävät lujuutensa puolesta vaatimuksen. Esimerkiksi yleisesti saatavissa olevilla rakenneteräksillä myötölujuudet ovat 235 MPa ja 355 MPa välillä.

Materiaalina päädyttiin turvallisuuden maksimoimiseksi käyttämään s355 rakenneterästä, jolloin varmuuskertoimeksi myötölujuuden suhteen jää pyörintänopeudella 6000 RPM noin 24. Murtolujuuden suhteen varmuuskerroin on tällöin yli 30.

Bansal (2010, 941.) esittää kirjassaan, että umpinaisen lieriön keskellä vallitsevat pääjännitykset voidaan laskea seuraavan kaavan mukaan:

$$(\sigma_r)_{max} = (\sigma_c)_{max} \frac{\rho * \omega^2}{8} * (3 + \mu) * r_2^2 \quad (9)$$

Jossa:

$(\sigma_r)_{max}$ = Säteissuuntainen maksimi jännitys

$(\sigma_c)_{max}$ = Kehäjännityksen maksimiarvo

ρ = materiaalin ominaispaino (teräs \approx (7850 kg/m³))

ω = kulmataajuus (6000 rpm \approx 628 rad/s)

μ = materiaalin poissoninluku (teräs \approx 0,3)

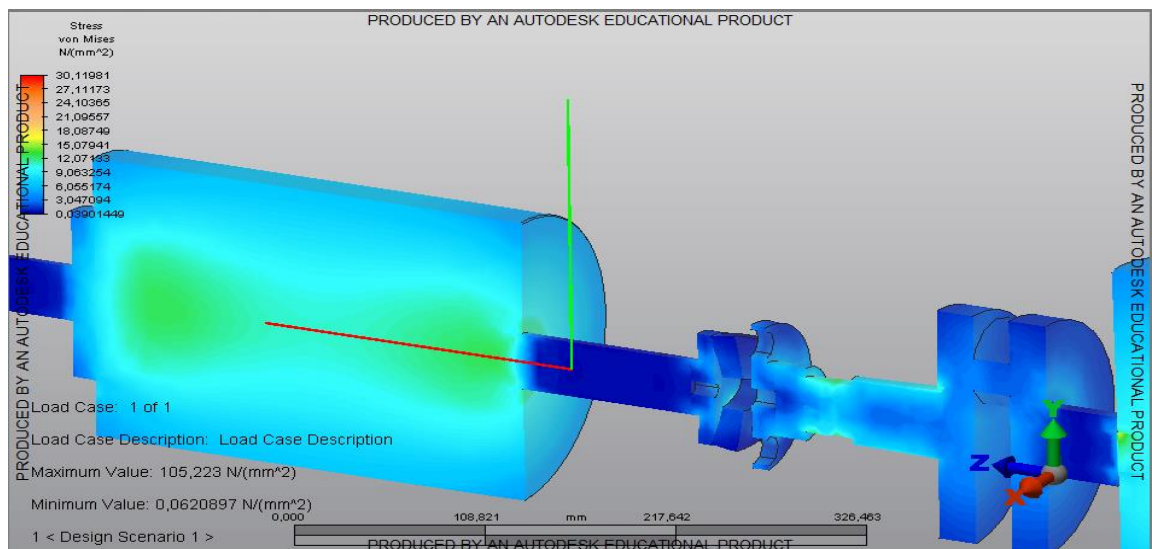
r_2 = lieriön säde (0,1 m)

Sijoitetaan aiemmin mainitut rullan mitat ja materiaalin ominaisuudet kaavaan:

$$\begin{aligned}
 (\sigma_r)_{max} = (\sigma_c)_{max} &= \frac{7850 * (628)^2}{8} * (3 + 0,3) * 0,1^2 \\
 &= 12,7813 \text{ N/mm}^2 \\
 &\approx 13 \text{ N/mm}^2
 \end{aligned}$$

Vertaamalla näin laskettua maksimijännityksen arvoa FEM-analyysin tuloksiin, (kuviot 4. & 3.) voidaan todeta, että tulokset ovat keskenään yhtenevät ja näin ollen riittävän luotettavat.

Suunnitteluvaiheessa rullan vasemmassa päädyssä testattiin myös pultattavaa laippakiinnitystä (kuvio 4). Oikeassa päädyssä on hitsattu kiinnitysratkaisu, johon lopulta päädyttiin. Laippakiinnitystä esittävässä kuvassa ei ole huomioitu pulttien aiheuttamaa laippaan ja rullaan kohdistuvaa jännitystä, joka olisi todellisuudessa kiristysmomentista riippuen moninkertainen muiden voimien aiheuttamiin jännityksiin nähden. Monimutkaisemman rakenteen ja suurempien jännityksien vuoksi päädyttiin hitsaamalla koottavaan rakenteeseen.

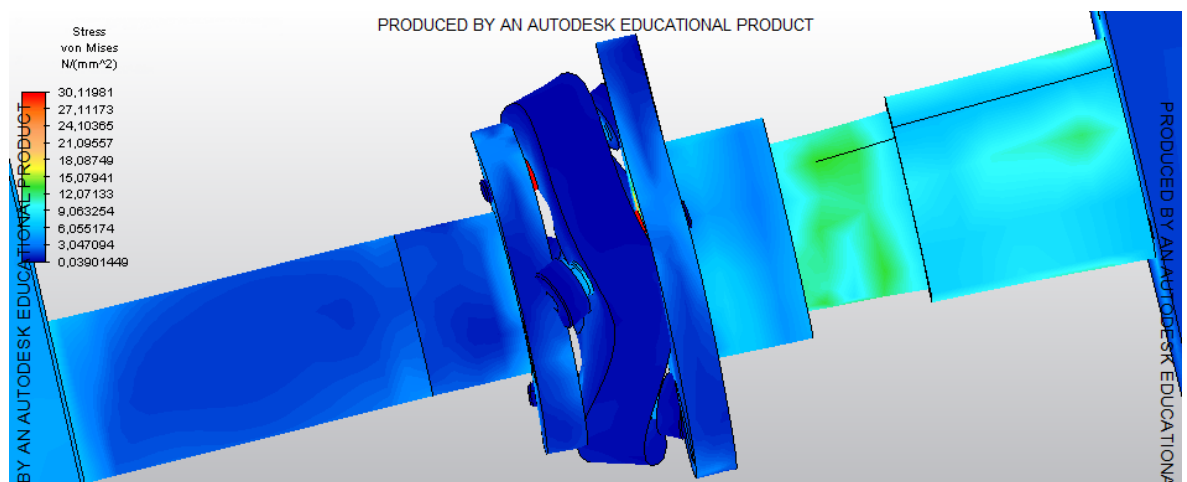


Kuvio 4. Pyörivien osien von Mises -jännitykset

3.4.3 Akseli

Akselin paksuus valittiin saatavilla olevien standardikokoisten laakereiden mukaan. Valmistusteknisesti helpoksi vaihtoehdoksi katsottiin 40 mm halkaisija. Tarkat mitat akselin valmistamiseksi löytyvät liitteestä 1. Laakerien tarkka asettuminen akselille varmistetaan koneistamalla laakerin ja akselin välille tartuntasovite. Laakerien lukitus akselille varmistetaan säteissuunnasta kiristettävillä lukitusruuveilla.

Akselin kestävyys tarkastettiin myös FEM-laskentaohjelmassa ja todettiin sen olevan reilusti ylimitoitettu (kuvio 5.) Kuvassa oikealla näkyvän moottorin kampiakselin jännitykset ovat kappaleen virheellisestä kiinnityksestä johtuen vääristyneet ja tulee jättää huomiotta.



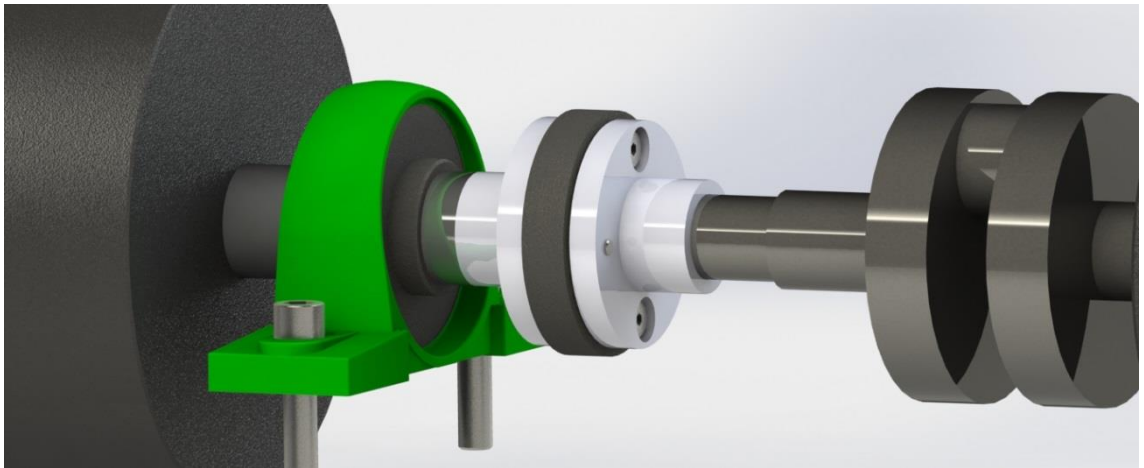
Kuvio 5. Akselin von Mises -jännitykset

Koska mitattavien moottoreiden teholuokka on hyvin pieni, ei akselille aiheudu mainittavaa vääntömomenttia, vaan ratkaisevassa osassa on rullan ja mahdollisesti rullan päällä ajettavan ajoneuvon massa, joka pyrkii taivuttamaan akselia.

Kuten kuviosta 5. voidaan havaita, ei kaikkien voimien yhdessä aiheuttama jännitys noussut 10 N/mm² korkeammaksi dynamometrin sisääntuloakselilla. Laskennassa on otettu rullan oman massan aiheuttaman voiman lisäksi huomioon 100 kg painavan ajoneuvon aiheuttama alaspäin kohdistuva voima. Akselin halkaisijaa ei kuitenkaan valmistusteknisistä syistä lähdetty tästä pienentämään.

3.4.4 Värähtelynvaimennin

Moottorin kampiakselin ja dynamometrin akselin kytkemiseksi toisiinsa oli suunniteltava jonkinlainen helposti avattavissa ja kiristettävissä oleva kytkentälaitte. Voiman ulosottoa varten moottorin kampiakselille on valmiiksi koneistettu kiilaura ja 30 mm h7 sovite.



Kuva 9. Värähtelynvaimennin

Kytkeäntälaitteen suunnittelu aloitettiin mallintamalla kampiakselin päähän sopiva veto-laippa ja vastaavanlainen samanlaisella sovituksella oleva osa, joka sopii dynamometrin 30mm halkaisijalle sorvatun akselin päähän. (kuva 9.)

Kytkimen laippojen väliin valmistetaan CNC-jyrsimellä kumista vielä värinänvaimennin-kiekko. Kumiosan tarkoitus on paitsi vaimentaa 1-sylinterisen moottorin epätasaisesta käynnistä aiheutuvat vääntövärähtelyt myös antaa pientä pelivaraa moottorin ja dynamometrin akseleiden keskinäiseen linjaukseen.

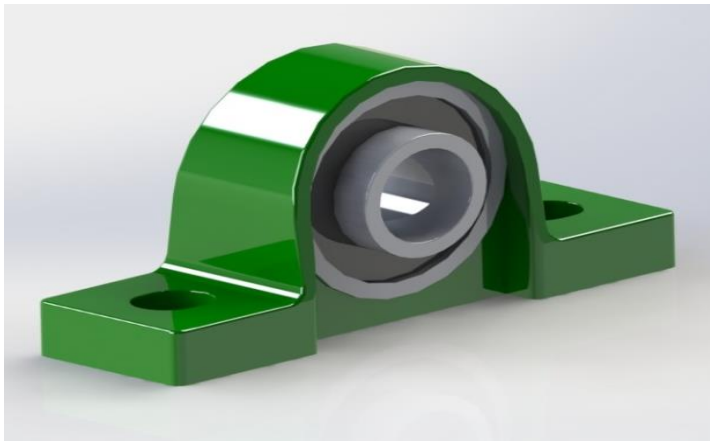
Ilman minkäänlaista joustavaa osaa olisi pienestäkin akselin linjavirheestä helposti seurauksena moottorin runkolaakereiden ylikuormitus, tai pahimmassa tapauksessa jopa kampiakselin vaurioituminen.

Kuviossa 4. on näkyvissä kytkimen jousto rajusti liioiteltuna. Voiman välittämiseen käytettyjen pulttien jännitykset pysyttelevät maltillisesti n. 30N/mm arvossa, jonka jopa 8.8 lujuusluokituksen omaava pulttikin kestää helposti. Tämä on samalla kaikkien dynamometrin osien suurin vertailujännitys.

Lopulliseen versioon päätettiin kuitenkin lisätä kuvasta (kuva 9.) poiketen vielä kolmas pulttipari kytkimeen ja kasvatettiin halkaisijaa hieman. Tämä mahdollistaa hieman pehmeämmän kumin käyttämisen ja suuremmat tangentin suuntaiset joustot ennen kuin pultit osuvat kytkimen runkoon.

3.4.5 Laakerointi

Dynamometrin akselin laakerointi on toteutettu kahdella kuvan 10. mukaisella UCP-208 laakeriyksiköillä, eli ns. pukkilaakereilla. Laakerit ovat puolalaisen CX Machine Parts:n valmistamat, 40 mm akselin halkaisijalle tarkoitetut ja lukittavissa ruuvien avulla akseliin.



Kuva 10. UCP-208 pukkilaakeri

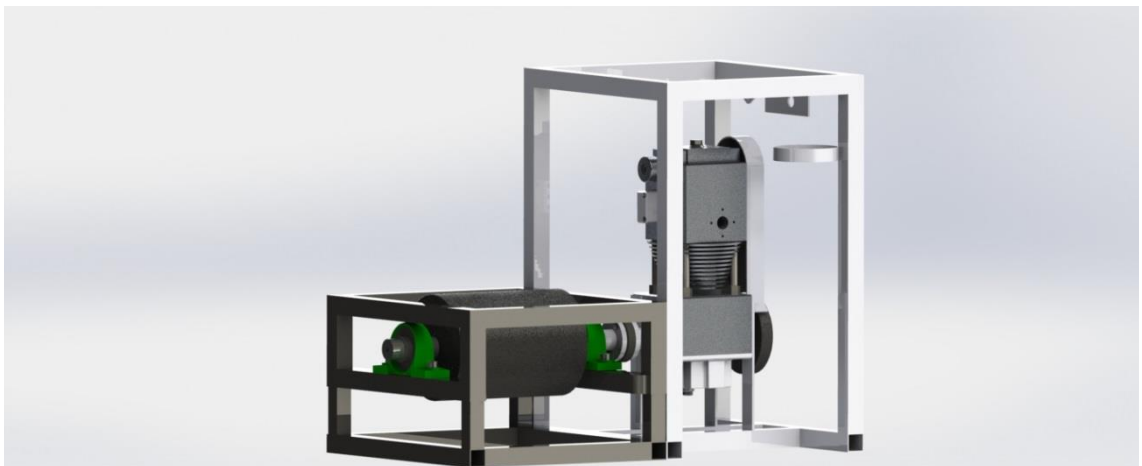
Laakerointia suunniteltaessa huomattiin, että laakereiden suurin sallittu pyörintänopeus olisi ensimmäinen asia, joka rajoittaa rullan suurinta mahdollista pyörintänopeutta. UCP-208 laakerilla (kuva 10.) suurin sallittu pyörintänopeus on tyyppillisesti vain 3100 RPM. (FBJ, 2016.)

Koska tälle dynamometrille ei ole tiedossa kovinkaan aktiivista käyttöä, jäävät käyttö-tunnit todennäköisesti vähäisiksi. Myös laakeroinnin kuormitus jää hyvin maltilliseksi, joten voidaan katsoa, että maksimipyörintänopeus voidaan tarvittaessa hetkellisesti ylittää. Kunhan laakereiden säännöllisestä rasvauksesta huolehditaan, voidaan olettaa laakereiden eliniän olevan silti käyttötarkoitukseen nähden vähintäänkin riittävällä tasolla.

3.4.6 Runko

Rungon suunnittelu oli osista helpoin, sillä sitä miettiessä muut osat ja mitat oli jo valittu. Runko suunniteltiin siis täysin muiden osien ehdoilla niin, että osat saatiin tukevasti kiinnitettyä toisiinsa. Materiaalina käytetään pääasiassa 35 mm x 35 mm neliprofiilia 2 mm seinämävahvuudella. Materiaalivahvuus mitoitettiin sen verran varman päälle, ettei tarkempien lujuuslaskelmien tekoa nähty tarpeelliseksi. Rungon mitoituspiirros on esitetty liitteessä 2.

Rungon korkeudesta tehtiin säädettävä, jotta dynamometrin akseli olisi mahdollista säätää tarkasti moottorin kampiakselin korkeudelle (kuva 11). Toisaalta myöhempää käyttöä ajatellen alustadynamometrinä käytettäessä on tällöin mahdollista laskea rulla mahdollisimman lähelle lattian pintaa.



Kuva 11. Dynamometri kiinnitettynä moottorin pukkiin.

Dynamometrin runko kiinnitetään pultein moottorin pukkiin. Näin laitteet pysyvät tukevasti paikallaan, mutta ovat helposti irrotettavissa esimerkiksi siirtelyä varten.

Runko kootaan pääosin hitsaamalla. Laakerit kiinnitetään runkoon pulttiliitoksilla. Korkeudensäätö tapahtuu muuttamalla pulttien paikkaa runkoputkiin poratuissa rei'issä.

4 TULOKSET JA HAVAINNOT

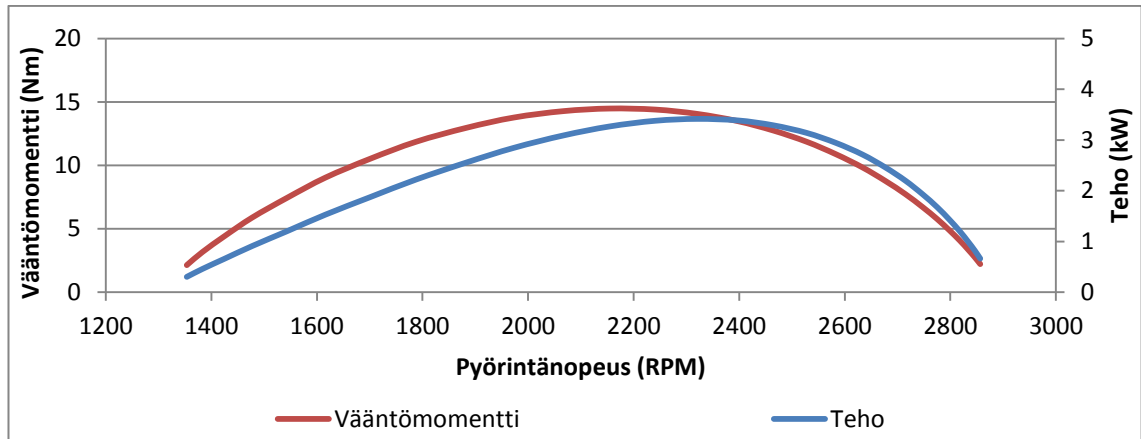
Työn tavoitteena oli ensisijaisesti suunnitella mielenkiinnon kohteena olevalle omavalmistemoottorille sopiva tehodynamometri. Toisena tavoitteena laitteelle oli, että sitä voisi käyttää pienin muutoksin myös pienitehoisen moottoripyörän tai mopon tehonmittaukseen. Tarkoitukseen sopivasta dynamometrillä luotiin 3D-malli ja mallin perusteella piirustukset laitteen valmistamiseksi. Työn ensisijaiset tavoitteet on täten saavutettu. Laitteen piirustukset on esitetty liitteissä 1. ja 2.

Toisena tavoitteena oli raportoida suunnittelun vaiheet ja lopputulokseen johtaneet ratkaisut sellaisella tarkkuudella, että lukijalle syntyy ymmärrys suunnitellun laitteen toimintaperiaatteesta. Samalla oli tarkoitus käydä läpi erilaiset dynamometrityypit sekä selvittää niidenkin toimintaperiaatteet fysiikan lakeihin pohjautuen. Voidaan katsoa, että nämäkin tavoitteet saavutettiin ja tekniikkaan perehtyneelle lukijalle syntyy opinnäytetyötäni lukiessa käsitys tässä suunnitellun laitteen toimintaperiaatteesta.

Koska dynamometrin rakentaminen on tätä kirjottaessa vasta aloitettu, ei mietteitä valmiin laitteiston toiminnasta käytännössä ole mahdollista käsitellä tässä opinnäytetyössä. Rahoitus laitteen valmistamiseksi järjestyi Turun Ammattikorkeakoulu Oy:ltä, ja laitteisto valmistunee pääosin vielä kesän 2016 aikana. Mittausohjelmisto sekä pyörintänopeusanturi kuitenkin ovat jo valmiina, joten näiden toiminta saatiin kokeiltua myös käytännössä. Samalla saatiin mitattua suuntaa antavasti moottorin tuottama teho pyörintänopeuden funktiona.

4.1 Moottorin alustavat suoritusarvot

Vaikkei tehonmittauksen suorittaminen kuulunutkaan tämän työn varsinaisiin tavoitteisiin, käydään tässä kuitenkin lyhyesti läpi oman työni sivutuotteena jo syntyneet alustavat mittaustulokset. Omavalmistemoottorista mitattu vääntömomentti ja teho on esitetty pyörintänopeuden funktiona kuviossa 6.



Kuvio 6. Moottorin teho ja vääntömomentti pyörintänopeuden funktiona

Nyt suoritetussa koemittauksessa oli käytettävissä vain moottorin kampiakselin sekä oman vauhtipyöränsä tuottama hitausmomentti, jonka vuoksi mittaustapahtuma oli todella nopea. Vaikka kiihdytys kesti alle 1,2 sekuntia, ohjelmisto ja anturointi osoittautuivat silti riittävän tarkkoiksi näinkin lyhyellä mittausajalla. Lähtötiedot, eli moottorin oma inertia oli kuitenkin vain karkeahko arvio, joten lukemien tarkkuus on tässä vaiheessa varsin kyseenalainen. Moottorista mitatut suoritusarvot on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Moottorin suoritusarvot

Huipputeho	3,4 kW @ 2320 RPM
Suurin vääntömomentti	14,5 Nm @ 2154 RPM

Koska aivan kaikkia moottorin pyöriviä osia ei tässä testissä inertiaa määritettäessä otettu huomioon, ovat näin saadut tulokset kuitenkin todellisuutta pienempiä. Lisäksi ongelma moottorin toiminnassa yläkierroksilla todennäköisesti pienensi tuloksia osaltaan ja kavensi tehoaluetta pyörintänopeusalueen yläpäästä.

Näiden alustavien tulosten valossa voidaankin todeta, että moottorin suunnittelutyö on onnistunut suoritusarvojen osalta jopa yli odotusten.

4.2 Kehityskohteita

Koska valmis dynamometrilaitteisto on vielä testaamatta, on kehityskohteita tässä vaiheessa hieman vaikea arvioida. Jos laitetta käytetään paljon suoraan moottorin kampiakseliin kiinnitettynä, olisi jonkinlainen jarru varmasti tarpeellinen pyörimisen hidastamiseksi mittauksen jälkeen. Nopeus toki hidastuu moottorijarrutuksellakin, mutta tämä ottaa jonkin verran aikaa. Jos mitattava moottori olisi 2-tahtinen, aiheuttaisi moottorijarrutustilanteen puutteellinen voitelu helposti vahinkoa moottorille.

Alustadynamometrinä käytettäessä ei nopeuden hidastaminen olisi ongelma, koska siihen voisi käyttää ajoneuvon omaa jarrua. Tässä käytössä pitäisi dynamometri kuitenkin joko upottaa monttuun, tai rakentaa jonkinlainen ramppi ja taso moottoripyörän saamiseksi rullan päälle. Lisäksi tarvitaan vielä teline, jolla ajoneuvo lukittaisiin etupyörästään oikealle paikalleen, kuten esimerkiksi kuvassa 12. esitettyssä Dynamiten valmistamassa alustadynamometrissä.



Kuva 12. Dynamite alustadynamometri (Dynamite, 2016.)

Käyttäjien turvallisuuden takaamiseksi laitteen pyörivät osat olisi syytä suojata kotelomallalla laite. Jos asennus tapahtuu monttuun, sopisi suojaksi kansi, josta ainoastaan pyörivä rulla tulee läpi tarpeellisilta osilta.

Jotta laitteelle olisi jatkokäyttöä nyt mielenkiinnon kohteena olevan moottorin tehonmittauksen jälkeenkin, on mahdollisia kehityskohteita siis paljon ja tässä olisi varmasti aihetta vielä toiseenkin opinnäytetyöhön.

Myös nyt mittauksen kohteena olevan omavalmistemoottorin lopullisen tehomittauksen ja käyttökokemusten raportointi muodostaisivat jo sinällään riittävän laajan ja mielenkiintoisen aiheen uudelle opinnäytetyölle. Omaan työhöni liitettynä aihe olisi jo paisunut kohtuuttoman laajaksi ja raportointi olisi joka tapauksessa jäänyt hyvin pintapuoliseksi.

5 YHTEENVETO

Tässä työssä suunniteltiin tehodynamometri 1-sylinterisen 240 cm³ omavalmistemoottorin tehon mittaamiseksi. Työn tuloksena syntyivät tarkat piirustukset, sekä 3D-malli järjestelmästä. Laitteiston tarkoitus on toimia myöhemmin myös alustadynamometrinä pienitehoisille kaksipyöräisille.

Ennen tarkempaa suunnittelua käytiin läpi tehon mittaamiseksi käytössä olevat fysiikan lakeihin pohjautuvat menetelmät. Samalla tutustuttiin muutamiin yleisimmin käytössä oleviin dynamometrityyppeihin. Moottorin rakentaneiden opiskelutovereiden dokumentoinnin ja omien karkeiden alustavien mittausten pohjalta valittiin sopiva toimintaperiaate ja teholuokka, jolle mittauslaitteistoa lähdettiin suunnittelemaan.

Dynamometrin tyypiksi valittiin inertiaan perustuva järjestelmä. Laitteiston mekaaninen rakenne suunniteltiin 3D-mallintamalla ja pyöriville osille tehtiin lujuustarkastelu FEM-laskentaohjelmassa. Lujuuslaskennan paikkansa pitävyys varmistettiin käsin laskemalla.

Mittausohjelmistoksi valittiin alun perin RC-autojen tehonmittaukseen suunniteltu SimpleDyno -niminen ohjelmisto, joka on harrastajien kehittämä ja ilmaiseksi saatavissa internetistä. PC:llä toimiva järjestelmä ei tarvitse pyörintänopeusanturin lisäksi muuta elektroniikkaa.

Induktiivinen pyörintänopeusanturi valmistettiin itse. Anturilla voidaan lukea kierrosluku sytytysjärjestelmän tuottamista pulsseista tai dynamometrin akselille kiinnitetystä magneetista.

Dynamometrin rakentaminen on tätä kirjoittaessa aloitettu, mutta käyttökokemukset ja moottorin tehonmittauksen lopullisten tulosten käsittely on aikataulun vuoksi rajattava tämän opinnäytetyön ulkopuolelle.

LÄHTEET

- Bansal, R. 2010. A Textbook of Strength of Materials, Revised fourth edition. New Delhi: Laxmi Publications
- Brar, J. & Bansal, R. 2004. A Text Book of Theory of Machines. New Delhi: Laxmi Publications
- Beaumont, W. 1889. Dynamometers and Friction Brakes. vol. XCV. London: Proc. Inst. C.E.
- Dynomec 2016. Dynomec dynamometer systems 2016. Viitattu 1.4.2016
<http://www.dynomec.com>
- Dynomite 2016. DYNO mite™ Motorcycle / ATV Dynamometer Systems. Viitattu 3.5.2016
<http://www.dynomitedynamometer.com/motorcycle-dyno/motorcycle-dyno.htm>
- FJB 2016. FBJ Pillow Block Bearings. Viitattu 1.4.2016
http://www.guoliuera.lt/site/files/failai/Guoliai/Guoliu_mazgai_ir_charakteristikos.pdf
- Grattan-Guinness, I. 1990. Convolutions in French Mathematics, 1800–1840: From the Calculus and Mechanics to Mathematical Analysis and Mathematical Physics Vol 2. Berlin: Birkhäuser
- Killedar, J. 2012. Dynamometer: Theory and Application to Engine Testing. Xlibris Corporation.
- Lätti, Simo 2011. Hydraulisen moottoridynamometrin kehittäminen. Opinnäytetyö, Tampereen ammattikorkeakoulu.
- Oberg, E. 2012. Machinery's Handbook, 29th edition. New York: Industrial Press
- Plint, M. & Martyr, A. 1999. Engine testing. Theory and practice, second edition. Oxford: Butterworth-Heinemann
- Robert Bosch GmbH. 2002. Autoteknillinen käsikirja, 6. painos. Jyväskylä: Gummerus
- Salmi, T. & Pajunen, S. 2010. Lujuusoppi. Tampere: Pressus
- SimpleDyno 2016. Welcome to SimpleDyno. Viitattu 17.5.2016
<https://sites.google.com/site/simpledyno>
- Tammertekniikka. 2012. Tekniikan kaavasto, 10. painos. Tampere: Amk Kustannus
- Virkki, Reijo 2015. Polttoaine- ja pakokaasujärjestelmien suunnitteleminen nelitahtiseen ottomoottoriin. Opinnäytetyö, Turun ammattikorkeakoulu.

Rungon mitoituspiirros

