

Santeri Pöyskö

EMISSIOLABORATORION ENERGIATEHOKKUUDEN PARANTAMINEN

Moottoritestisolujen päivityksen suunnittelu AC-dynamometreille ja energian talteenoton parantaminen

EMISSIOLABORATORION ENERGIA TEHOKKUUDEN PARANTAMINEN

Moottoritestisolujen päivityksen suunnittelu AC-dynamometreille ja energian talteenoton parantaminen

Santeri Pöyskö
Opinnäytetyö
Kevät 2024
Konetekniikan tutkinto-ohjelma
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Konetekniikan tutkinto-ohjelma, auto- ja työkonetekniikka

Tekijä: Santeri Pöyskö

Opinnäytetyön nimi: Emissiolaboratorion energiatehokkuuden parantaminen

Työn ohjaaja: Esa Väisänen, Janne Ilomäki

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: Kevät 2024

Sivumäärä: 62 + 14 liitettä

Opinnäytetyön tavoitteena oli suunnitella, miten polttomoottorien päästöjen hallintaan erikoistuneessa Proventia Oy:ssä voidaan parantaa kahden moottoritestisolun energiatehokkuutta. Vanhat pyörrevirtadynamometrit eivät kyenneet enää tuottamaan uusien päästölainsäädäntöjen testisyklien mukaisia valideja testaustuloksia. Työn päätavoite on uusien AC-dynamometrien valinta, sillä niiden vaikutus energiatehokkuuteen on testisolun laitteista suurin.

Työhön on koottu teoriaa moottoritestisolun energiavirtauksista sekä moottoridynamometreista. Polttoaineen, jäähdytinnesteen, pakokaasun sekä moottorista säteilevien ja johtuvien energiavirtojen ja dynamometriä vääntökäyrien sekä kiihtyvyyksien laskemisessa käytettävät kaavat ja menetelmät esitellään. Lisäksi perustellaan lakien, standardien sekä käytännön syiden avulla, miksi testisolussa täytyy olla pieni alipaine ja moottorin imuilmän lämpötilan on oltava 20–30 °C. Testisolun olosuhteiden määrittelyyn käytettäviä ratkaisuja ja kaavoja esitellään myös teoriaosuudessa.

Pienempään testisolun dynamometriä komponentit valittiin aikaisemmin testattujen moottoreiden vääntökäyrien perusteella. Isompaan testisolun valittiin komponentit niin, että sillä on tulevaisuudessa kapasiteettia testata tehokkaampiakin moottoreita. Vaihtamalla dynamometrit ilmajäähdytettymiin malleihin saatiin myös parannettua testisolun lämmöntalteenoton hyötysuhdetta. Valituilla AC-dynamometreilla saadaan työssä tehtyjen laskujen perusteella polttoaineen energiasta hyötykäyttöön 35 % enemmän energiaa vanhoihin pyörrevirtadynamometreihin verrattuna. Päästöjärjestelmien mittausdatasta sekä vuotuisesta polttoainekulutuksesta lasketujen tulosten perusteella sähkön ja lämmön ostosta muodostuvat hiilidioksidipäästöt vähenevät 31 %, kun molemmissa testisolussa otetaan käyttöön uudet dynamometrit. Energiansäästön sekä sähkön myynnin kasvun myötä saadaan myös huomattavia rahallisia säästöjä.

Työssä saatiin käytännössä testipenkissä ajamalla kerätyn mittausdatan avulla laskettua tuloksia, joiden perusteella arvioitiin, että isompaan moottoritestisolun riittää 60 kW:n ja pienempään moottoritestisolun 40 kW:n jäähdytysteho. Lisäksi laskettiin, että ilmanvaihdoilla 60 kW:n jäähdyttämiseen riittää 5,0 m³/s virtaus ja 40 kW:n jäähdyttämiseen riittää 3,4 m³/s virtaus. Lasketut dieselmoottorin energiavirtausten tulokset todennettiin paikkansa pitäviksi vertaamalla niitä yleisten olostusten ja vastaavien mittausten arvoihin.

Tulevaisuuden varalle pohdittiin testisolun jäähdytysratkaisuja sekä ehdotettiin käyttämättömäksi jääneiden energiavirtausten talteenoton sekä sähkön varastoinnin ja käytön optimointi-ideoita. Näitä ei kuitenkaan käsitellä opinnäytetyöraportissa tarkemmin oletettujen kustannushyötysuhteiden ja työn laajuuden vuoksi.

Asiasanat: Moottoritestisolun, dynamometri, moottoridynamometri, päästöt, energiatehokkuus

ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences
Degree Program in Mechanical Engineering, Option of Automotive Engineering

Author: Santeri Pöyskö

Title of thesis: Emission laboratory's energy efficiency improvement

Supervisors: Esa Väisänen, Janne Ilomäki

Term and year when the thesis was submitted: Spring 2024

Number of pages: 62 + 14 appendices

The purpose of this thesis was to improve energy efficiency of Proventia Oy's two engine test cells. Old eddy current dynamometers couldn't produce accurate test results anymore according to new emission standards. That caused the main objective of the thesis work to be selecting new dynamometers because they affect most on the test cells energy efficiency.

This thesis includes theory of test cells and combustion engines energy flows since they are important to know on energy efficiency's perspective. The needed formulas used to select optimal dynamometers torque and acceleration charts are introduced in the theory part. Basic working principles of dynamometers related to this thesis are also explained. The laws and standards that define the tested diesel engines' intake air temperature are taken into consideration and test cells new cooling solutions are suggested since new dynamometers produce more heat.

As the result of the thesis new AC-dynamometers parts were ordered that can produce electricity using tested engines shaft output power. Engines coolant fluid's heat can also be used more efficiently on heating of the house with these dynamometers. Compared to old eddy current dynamometers new dynamometers can collect 35 % more energy of the used fuels energy and carbon dioxide emissions formed by bought heating and electricity will be 31 % smaller according to calculations done in this thesis. Also, significant savings will be achieved by consuming less energy and selling more electricity to the grid.

In this thesis work is calculated test cells energy balance and turbocharged diesel engines different energy flows using in practice collected measurement data by running diesel engine in the test cell. This data is used to predict the needed air handling capacity for upcoming upgraded test cells. It was estimated that the bigger engine test cell will need 60 kW and the smaller engine test cell will need 40 kW of cooling power.

Keywords: Engine test cell, combustion engine, dynamometer, emission, energy efficiency

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	7
1.1	Proventia Oy.....	8
1.2	Emissio- ja moottorilaboratorio	9
2	DYNAMOMETRIEN TAUSTAA	11
2.1	Dynamometrin mitoituksessa tarvittavia kaavoja	11
2.2	Pyörrevirtadynamometri	12
2.3	AC- ja DC-dynamometrit	12
3	MOOTTORITESTISOLUN ENERGIATASAPAINO	14
3.1	Polttomoottorin energiavirtaukset	14
3.2	Muut säteilevän ja johtuvan lämpöenergian lähteet.....	17
3.3	Testisolun jäähdytys	18
3.3.1	Jäähdytys ilmanvaihdolla	19
3.3.2	Jäähdytys ilmastointikoneella.....	20
4	DYNAMOMETRIEN KOMPONENTTIEN VALINTA.....	21
4.1	Dynamometriä ominaisuuksien määrittely	21
4.1.1	TC2:n dynamometrin spesifikaatioiden määrittely.....	25
4.1.2	TC1:n dynamometrin spesifikaatioiden määrittely.....	26
4.2	Dynamometriä komponenttien tarjousten kysely	27
4.3	Valitut dynamometriä komponentit	29
4.3.1	TC2:n AC-dynamometri	30
4.3.2	TC1:n AC-dynamometri	33
4.4	Uusien dynamometriä ohjaus Horiban automaatiolla	35
4.4.1	Momentin mittaaminen.....	35
4.4.2	Pyörintänopeuden mittaaminen	37
4.4.3	Ohjauksen parametrien säätö	37
5	TILANKÄYTTÖ TESTISOLUJEN ULKOPUOLELLA	39
5.1	Taajuusmuuttajien sijoittelu	39
5.2	Erotusmuuntajien sijoittelu.....	40
6	MOOTTORITESTISOLUJEN JÄÄHDYTYKSEN SUUNNITTELU	41
6.1	Testisoluihin jäävän lämpöenergian laskeminen	41
6.1.1	Polttoaineen energia	42

6.1.2	Pakokaasun entalpia.....	43
6.1.3	Imuilman entalpia.....	43
6.1.4	Moottorista jäähdytinnesteeseen siirtyvä energia	43
6.1.5	Välijäähdyttimestä jäähdytinnesteeseen siirtyvä energia	44
6.1.6	Moottorista testisoluuun säteilevä ja johtuva lämpöenergia	44
6.1.7	Muut lämmönlähteet testisolussa	45
6.2	Testisolujen jäähdytyksen tarpeen laskeminen	45
6.3	Lämmöntalteenotto moottorin jäähdytinnesteestä	46
6.4	Testisolujen jäähdytyksen ratkaisuehdotukset	47
6.4.1	Jäähdytyksen 1. vaihtoehto.....	48
6.4.2	Jäähdytyksen 2. vaihtoehto.....	48
6.5	TC1:n polttoaineen jäähdytys	49
7	MOOTTORITESTISOLUJEN ENERGIA TEHO KUUDEN LASKENTA.....	51
7.1	Testisolujen tuottaman sähkön laskenta.....	52
7.2	Jäähdytinnesteen lämmöntalteenoton keräämän energian laskenta	53
7.3	Hiilidioksidipäästöjen laskenta	54
8	TOTEUTUKSEN AIKATAULU	55
9	POHDINTA.....	56
9.1	Tuloksien hyödyntäminen.....	57
9.2	Muut energiatehokkuuden parannusehdotukset.....	57
9.2.1	Hyödyntämättömät testisoluista poistuvat energiavirtaukset.....	57
9.2.2	Energian varastointi ja käytön optimointi.....	58
	LÄHTEET.....	59
	LIITTEET	63

1 JOHDANTO

Päästötestien suorittaminen on tärkeä osa pakokaasujen jälkikäsittelyjärjestelmien valmistusprosessia. Työn toimeksiantajalla Proventia Oy:llä näitä testejä suoritetaan Oulunsalon toimipisteen moottori- ja emissiolaboratoriossa neljässä eri moottoritestisolussa. Kaksi näistä moottoritestisoluista on Proventian valmistamia AC-dynamometreillä varustettuja testausyksiköitä, joilla testeissä moottorin akselitehosta saatava energia voidaan muuttaa suurimmaksi osaksi sähköksi. Opinnäytetyön kohteena olevat vanhemmat TC1- ja TC2-nimiset moottoritestisolut on varustettu pyörrevirtadynamometreillä. Pyörrevirtadynamometreillä saadaan tällä hetkellä uudempiin testausyksiköihin verrattuna huonommalla hyötysuhteella testeissä tuotettua energiaa käytettyä talon lämmittämiseen.

Proventialla tärkeänä arvona on päästöjen vähentäminen, jonka vuoksi opinnäytetyön tavoitteena on selvittää, miten näiden kahden vanhemman moottoritestisolun energiatehokkuutta voitaisiin parantaa. Tällä tapaa pyritään pienentämään yrityksen toiminnan aiheuttamaa hiilijalanjälkeä. Energian oston vähenemisen ja sen myynnin lisääntymisen myötä saadaan myös rahallisia säästöjä.

Opinnäytetyössä perehdytään dieselmootorin sekä testisolun energiavirtauksiin, joiden avulla voidaan lähteä pohtimaan, miten hukkaenergiaa voitaisiin hyödyntää paremmin. Lisäksi tarvittaville osille kysellään tarjoukset ja lasketaan arvioidut hiilidioksidipäästöjen vähenemät sekä vuotuiset rahalliset säästöt, jotka toteutuvat suunniteltujen toimenpiteiden ansiosta.

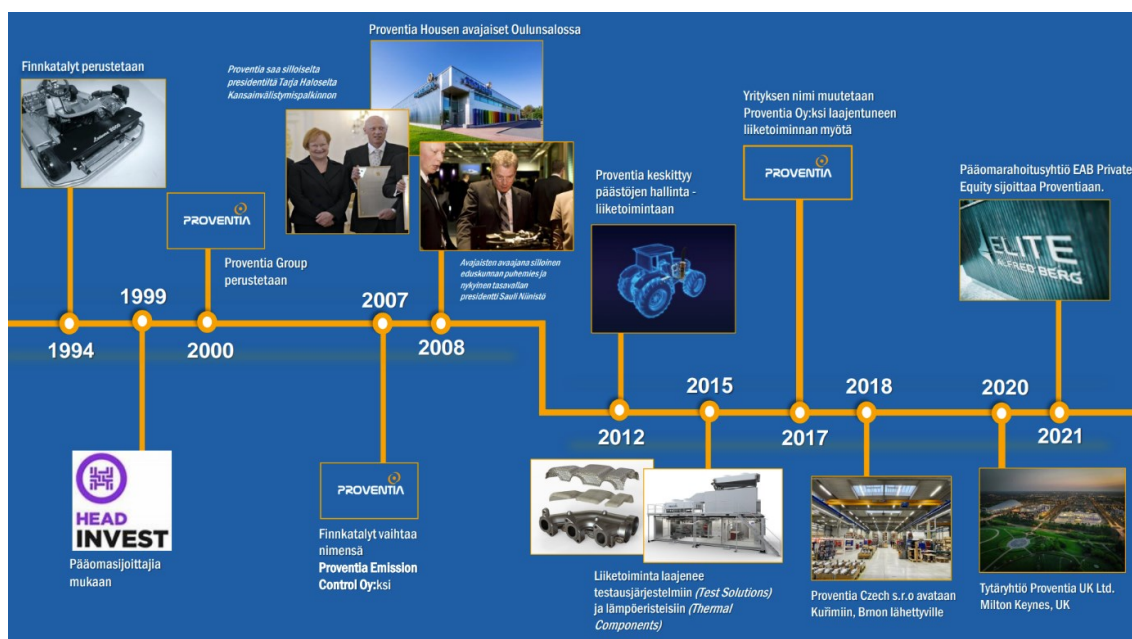
Työn päätavoitteeksi muodostui uusien moottoridynamometriä valitseminen, koska ne ovat tärkeimpiä komponentteja moottoritestisolussa energiatehokkuuden kannalta, ja nykyiset pyörrevirtadynamometrit eivät tuota enää luotettavaa mittadataa tiukentuvien päästötestien vaatimusten myötä. Tulevassa Tier 5 -tason kehityksessä moottorijarrutuksen simulointi tulee oletettavasti olemaan tarpeen. Pyörrevirtadynamometreillä moottorijarrutuksen simulointi ei ole mahdollista, koska siinä dynamometrin on kyettävä pyörittämään testattavaa moottoria. Dynamometriä valinnassa täytyy ottaa huomioon testattavien moottoreiden vääntökäyrät sekä itse dynamometrin fyysinen koko ja siitä testisoluuun säteilevä lämpö. Lisäksi valituille dynamometreille tavoitellaan 25 vuoden elinkaarta. Vähimmäisvaatimuksena elinkaarelle oli kymmenen vuotta.

Tarvittavat komponentit tulee olla tilattuna vuoden 2024 helmikuun loppuun mennessä. Suunniteltyön riittävän laajuuden ja osien pitkien toimitusaikojen vuoksi päätettiin, että testisolujen päivitysten asennusta ei sisällytetä opinnäytetyöhön.

Osa opinnäytetyön liitteistä ja tuloksista ei julkaista. Salattava osuus sisältää tietoja, jotka ovat liikesalaisuuksia tai niitä ei julkaista tekijänoikeuksien vuoksi.

1.1 Proventia Oy

Proventia Oy:n taustalla on vuonna 1994 perustettu Finnkatalyt, joka alkuaikoina keskittyi pienten bensiinimoottoreiden pakokaasun puhdistukseen. Vuonna 2000 perustettiin Proventia Group Oy, jonka tytäryhtiönä Finnkatalyt toimi. Vuonna 2007 Finnkatalyt muutti nimensä Proventia Emission Control Oy:ksi ja alkoi samalla keskittyä dieselmoottoreiden pakokaasujenpuhdistusjärjestelmiin. Myöhemmin vuonna 2017 liiketoiminnan laajentuessa nimi vaihtui vielä Proventia Oy:ksi. Lisäksi Proventia valmistaa myös nykyään akusto- ja lämpöeristeratkaisuja sekä modulaarisia testauskeskuksia moottorien, voimalinjojen, hybridijärjestelmien ja akustojen testaukseen. (1.) (Kuva 1.)



KUVA 1. Proventia Oy:n historia (2)

Nykyisin Proventia tarjoaa monipuolisesti ratkaisuja ja palveluita polttomoottoreiden päästöjen vähentämiseksi sekä uusiin että käytössä oleviin työkoneisiin ja ajoneuvoihin esimerkiksi eri puolille Eurooppaa, Amerikkaa ja Aasiaa. Proventia pyrkii huomioimaan kaikessa toiminnassaan ihmiset,

ympäristön ja tulevat sukupolvet pitäen visionaan nollapäästöisyyden. Yrityksen pääkonttori sijaitsee Oulussa, mutta sillä on useampia toimipisteitä Suomessa, Iso-Britanniassa ja Tšekissä. (1.)

Yhtiön liikevaihto vuonna 2022 oli 51,7 miljoonaa euroa. Se työllistää lähes 200 henkilöä. (3.)

1.2 Emissio- ja moottorilaboratorio

Proventialla on tällä hetkellä yhteensä neljä moottoritestisolua (kuva 2). Talon ulkopuolella sijaitsevat Watti 1 ja Watti 2 ovat Proventian suunnittelema modulaarisia testausyksiköitä, jotka on varustettu AC-dynamometreilla. Watti 1 on kytketty talon kanssa samaan sähköliittymään, jolloin testimoottorilta saatu energia voidaan käyttää talon sähkönkulutukseen. Watti 2 on akkujen testaukseen tarkoitettujen testisolun kanssa toisessa sähköliittymässä, josta moottorilta saatu ylimääräinen energia myydään suoraan eteenpäin. Watti 1 on rakennettu erityisesti pitkäkestoisille moottoreiden sekä pakolinjojen ikäytys- ja kestotestauksille. Watti 2:ssa on valmistauduttu enemmän hybridijärjestelmien testaukseen ja laajempaan pakolinjojen tuotekehitykseen. (4.)



KUVA 2. Proventian testausyksiköt (5)

Tässä työssä keskitytään talon sisällä sijaitseviin testisoluihin. TC1 on vuonna 2007 valmistunut moottoritestisolua, joka on varustettu Horiba WT470 -pyörrevirtajarrulla, jossa teho riittää 470 kW:iin

asti. TC2 on hieman pienempi vuonna 2010 valmistunut moottoritestisolu. TC2 on varustettu Horiba WT300 -pyörrevirtajarrulla, joka riittää 300 kW:n moottorien testaukseen. Molempia pyörrevirtajarruja ohjataan Horiban valmistamalla STARS-automaatiolla. (4.)

2 DYNAMOMETRIEN TAUSTAA

Moottoridynamometreille on olemassa monenlaisia jarrutyyppejä, joista yleisimpiä ovat

- hydraulijarru
- vesijarru
- pyörrevirtajarru
- DC- ja AC-moottorit (6, s. 248).

Edellä mainituista ainoastaan AC- ja DC-dynamometrit kykenevät pyörittämään moottoria ja lisäksi tuottamaan sähköä moottorin pyörimisenergiasta (7).

2.1 Dynamometrin mitoituksessa tarvittavia kaavoja

Tärkeimpiä parametrejä dynamometriä valittaessa ovat kierrosluku, vääntömomentti ja teho. Teho saadaan laskettua pyörintänopeudesta ja vääntömomentista kaavalla 1 (8, s. 46).

$$P = 2\pi NT \times 10^{-3} \quad (\text{KAAVA 1})$$

N = moottorin kierrosten määrä sekunnissa

T = vääntömomentti (Nm)

Dynamometrin kierrosnopeuden muutosnopeus voidaan laskea kaavalla 2 (9, s. 15).

$$\frac{n}{t} = \frac{T}{(J \cdot \frac{2\pi}{60})} \quad (\text{KAAVA 2})$$

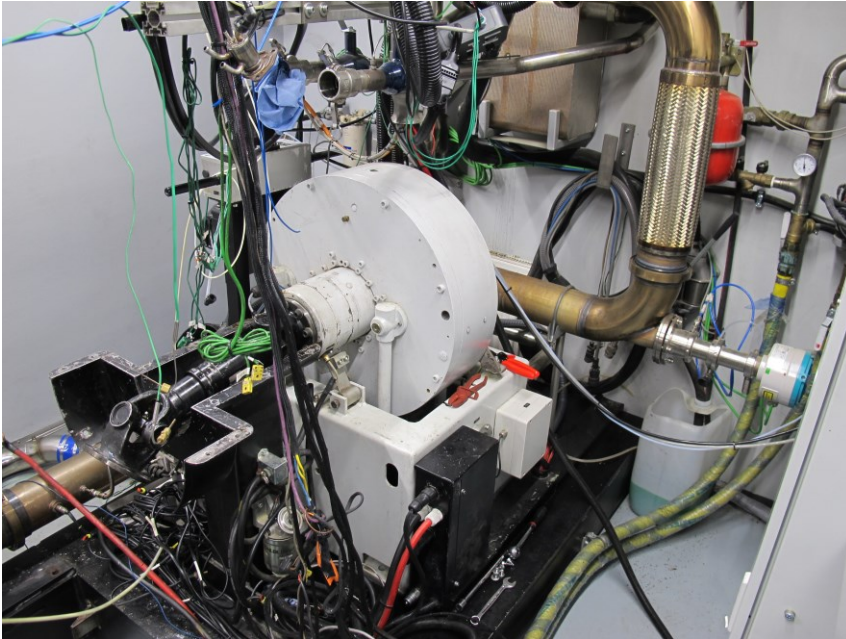
$\frac{n}{t}$ = kierrosnopeuden muutosnopeus (rpm/s)

T = vääntömomentti (Nm)

J = inertia (kgm^2)

2.2 Pyörrevirtadynamometri

Työn kohteena olevien TC1- ja TC2-testisolujen pyörrevirtadynamometrien (kuva 3) toiminta perustuu käämillä tuotettuun magneettikenttään, jonka sisällä pyörii hammastettu rautalevy. Dynamometria ohjataan muuttamalla käämin sähkötehoa. Tämä mahdollistaa nopeat kuormanmuutokset sekä korkean jarrutusvoiman myös suhteellisen matalilla kierrosnopeuksilla. Pyörrevirtajarrujen hyviä puolia on myös se, ettei siinä tapahdu suurempaa mekaanista kulumista muualla kuin navan laakereissa. (6, s. 256.)



KUVA 3. Proventian TC2:n Horiba WT300 -pyörrevirtadynamometri

Moottorin tuottama energia siirtyy lähes täysin pyörrevirtajarrun ulkolaipassa kiertävään jäähdytinnesteeseen lämpöenergiaksi. Jarrulta lähtevän jäähdytinnesteen lämpötila ei saa ylittää 60 °C:ta, koska tällöin jarrun osien lämpölaajeneminen voi aiheuttaa hammaslevyn törmäämisen sitä ympäröivään jäähdytyskammioon. (10.)

2.3 AC- ja DC-dynamometrit

AC- ja DC-dynamometreissä käytetään sähkömoottoria testattavan moottorin jarruttamiseen. Molemmilla AC- sekä DC-moottoreilla pystytään jarruttamaan ja lisäksi myös pyörittämään dynamometriin kiinnitettyä polttomoottoria. Nykyisin AC-moottorit ovat kuitenkin yleisempi vaihtoehto, koska ne pystyvät korkeampiin kierroksiin, nopeampiin kierrostenmuutoksiin ja niillä on myös matalampi inertia. (6, s. 253.)

Sähkömoottorin etuna on myös se, että niillä testattavalta moottorilta tuleva energia pystytään muuttamaan sähköksi. Tässä tilanteessa sähkömoottoria käytetään generaattorina. Pyörrevirtadynamometriin verrattuna etuna on se, ettei sähköä kulu dynamometrin jäähdyttämiseen. AC-dynamometrillä tuotettua sähköä voidaan käyttää talon sähkönkulutukseen tai se voidaan myydä sähköverkkoon. (7.)

AC-dynamometri kuluttaa testisolun ulkopuolelta tulevaa sähköä vain silloin, kun sillä pyöritetään testattavaa moottoria (6, s. 253). Tätä tapahtuu polttomoottorin käyntiin pyörittämisessä tai moottorijarrituksen simuloinnissa, jonka tarve on suhteellisen harvinaista ja lyhytaikaista.

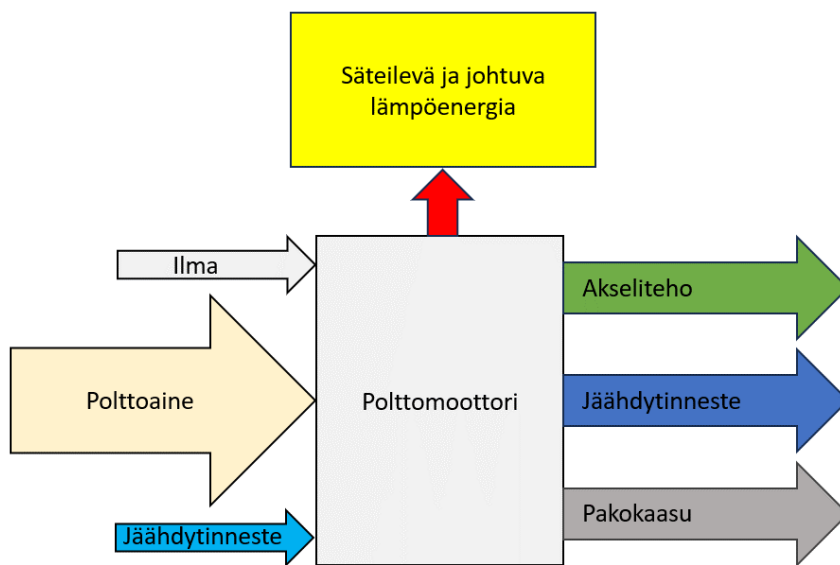
Vaihtovirta- eli AC-moottorin toiminta perustuu sähkömagneettiseen induktioon, jossa käämien vuon suuntaa vaihtamalla saadaan tuotettua pyörivä magneettikenttä. Tämä magneettikenttä saa moottorin pyörivän osan eli roottorin pyörimään. Moottorin pyörimisnopeutta voidaan säätää muuttamalla käämeissä kulkevan vaihtovirran ja -jännitteen taajuutta. AC-moottoreiden ohjaamiseen tarvitaankin erikseen taajuusmuuttajat. (11, s. 12.)

Tila voi tulla ongelmaksi, kun pyörrevirtajarruille suunniteltuja testisoluja aletaan muuttamaan AC-dynamometreille. Itse dynamometrin koko on huomattavasti suurempi ja lisäksi tarvitaan myös isokokoiset taajuusmuuttajat. Taajuusmuuttajien ja AC-moottoreiden välinen kaapelin pituus on myös kustannusten kannalta suotavaa pitää lyhyenä. (6, s. 254.)

Taajuusmuuttajista ja AC-moottoreista huoneeseen säteilevä lämpöenergia tulee ottaa huomioon ilmanvaihdon suunnittelussa. Tämä lämpöenergian määrä riippuu dynamometrin komponenttien jäähdytystavasta ja hyötysuhteesta. (6, s. 117.)

3 MOOTTORITESTISOLUN ENERGIATASAPAINO

Kun tutkitaan moottoritestisolun energiatehokkuuden parantamista, täytyy selvittää sen energiavirtauksia. Suurimmat energiat kulkevat polttomoottorin kautta, joten on järkevintä keskittyä sen virtauksiin. Energia voidaan jakaa moottorille meneviin ja poistuviin virtauksiin (kuva 4). Moottorille meneviä virtauksia ovat polttoaine, jäähdytinneste ja imuilma. Poistuvia virtauksia ovat pakokaasu, lämmin jäähdytinneste, moottorilta jarrulle kulkeva akseliteho sekä moottorista säteilevä ja johtuva lämpö. (6, s. 535.)



KUVA 4. Polttomoottorin energiavirtaukset (vrt. 6, s.535)

Energiatasapainon laskemisen lähtökohtana voidaan käyttää 30–30–30–10-sääntöä, jonka mukaan polttoaineen energiasta 30 % menee dynamometrille, 30 % pakojärjestelmään, 30 % moottorin nesteisiin ja 10 % on säteilevää sekä johtuvaa lämpöä (6, s. 44). Tämä on kuitenkin useamman vuoden vanha ja suuntaa antava sääntö. Polttomoottoritekniikan ja hyötysuhteen parantumisen myötä sitä voidaan pitää entistä epäluotettavampana erityisesti rajamomenttikäyrän läheisyydessä.

3.1 Polttomoottorin energiavirtaukset

Polttomoottorin energiavirtaukset voidaan laskea tarkemmin seuraavilla kaavoilla. Jotta saadaan laskettua tämän työn kannalta tärkein virtaus eli moottorista säteilevä ja johtuva lämpöenergia,

täytyy selvittää ensin, kuinka paljon energiaa moottorille menee ja mihin muualle energiaa poistuu moottorilta.

Polttoaineen energia lasketaan kaavalla 3 (6, s. 535).

$$H_1 = \dot{m}_f C_l \quad (\text{KAAVA 3})$$

H_1 = polttoaineen energia (kW)

\dot{m}_f = polttoaineen massavirta ($\frac{\text{kg}}{\text{h}}$)

C_l = polttoaineen alempi lämpöarvo ($\frac{\text{kWh}}{\text{kg}}$)

Pakokaasun entalpia lasketaan kaavalla 4 (6, s. 535).

$$H_2 = (\dot{m}_f + \dot{m}_a) C_p T_e \quad (\text{KAAVA 4})$$

H_2 = pakokaasun entalpia (kW)

\dot{m}_f = polttoaineen massavirta ($\frac{\text{kg}}{\text{s}}$)

\dot{m}_a = imuilman massavirta ($\frac{\text{kg}}{\text{s}}$)

C_p = ilman ominaislämpökapasiteetti vakiopaineessa ($\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \times \text{K}}$)

T_e = pakokaasun lämpötila (K)

Pakokaasun lämpöenergia on myös mahdollista mitata tarkemmin käyttämällä kalorimetriä. Tämä kalorimetri toimisi lämmönvaihtimena, jolla pakokaasua jäähdytetään nesteen avulla. Jäähdytinnesteen virtaus pitää määrittää niin, että pakokaasun lämpötila ei putoa alle 60 °C:seen. Tämä lämpötila on hieman pakokaasun kastepistettä korkeampi. Kastepistettä matalammalla lämpötilalla höyry alkaa kondensoitua ja luovuttaa sen latenttilämpöä. Kun pakokaasu pysyy höyrynä, voidaan pitää oletusta polttoaineen alemman lämpöarvon energiamäärästä oikeana. Kalorimetriä käytettäessä pakokaasun lämpöenergia voidaan laskea kaavalla 5. (6, s. 535.)

$$H_2 = \dot{m}_c C_w (T_{2c} - T_{1c}) + (\dot{m}_f + \dot{m}_a) C_p T_{co} \quad (\text{KAAVA 5})$$

H_2 = pakokaasun entalpia (kW)

\dot{m}_c = lämmönvaihtimen jäähdytinnesteen massavirta ($\frac{\text{kg}}{\text{s}}$)

C_w = jäähdytinnesteen ominaislämpökapasiteetti ($\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \times \text{K}}$)

T_{2c} = lämmönvaihtimelta poistuvan nesteen lämpötila (K)

T_{1c} = lämmönvaihtimelle virtaavan nesteen lämpötila (K)

\dot{m}_a = imuilman massavirta ($\frac{\text{kg}}{\text{s}}$)

C_p = ilman ominaislämpökapasiteetti vakiopaineessa ($\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \times \text{K}}$)

T_{co} = lämmönvaihtimelta poistuvan pakokaasun lämpötila (K)

Imuilman entalpia lasketaan kaavalla 6 (6, s. 535).

$$H_3 = \dot{m}_a C_p T_a \quad (\text{KAAVA 6})$$

H_3 = imuilman entalpia (kW)

\dot{m}_a = imuilman massavirta ($\frac{\text{kg}}{\text{s}}$)

C_p = ilman ominaislämpökapasiteetti vakiopaineessa ($\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \times \text{K}}$)

T_a = imuilman lämpötila (K)

Jäähdytinnesteeseen siirtyvän lämmön energia lasketaan kaavalla 7 (6, s. 535).

$$Q_1 = \dot{m}_w C_w (T_{2w} - T_{1w}) \quad (\text{KAAVA 7})$$

Q_1 = jäähdytinnesteeseen siirtyvän lämmön energia (kW)

\dot{m}_w = jäähdytinnesteen massavirta ($\frac{\text{kg}}{\text{s}}$)

C_w = jäähdytinnesteen ominaislämpökapasiteetti ($\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \times \text{K}}$)

T_{2w} = moottorilta poistuvan jäähdytinnesteen lämpötila (K)

T_{1w} = moottorille menevän jäähdytinnesteen lämpötila (K)

Kun tiedetään kaikkien edellä mainittujen energiavirtausten arvot, voidaan laskea moottorista säteilevä ja johtuva lämpöenergia kaavalla 8 (6, s. 535).

$$Q_2 = H_1 - (H_2 - H_3) - Q_1 - P_s \quad (\text{KAAVA 8})$$

Q_2 = moottorista säteilevä ja johtuva lämpöenergia (kW)

H_1 = polttoaineen energia (kW)

H_2 = pakokaasun entalpia (kW)

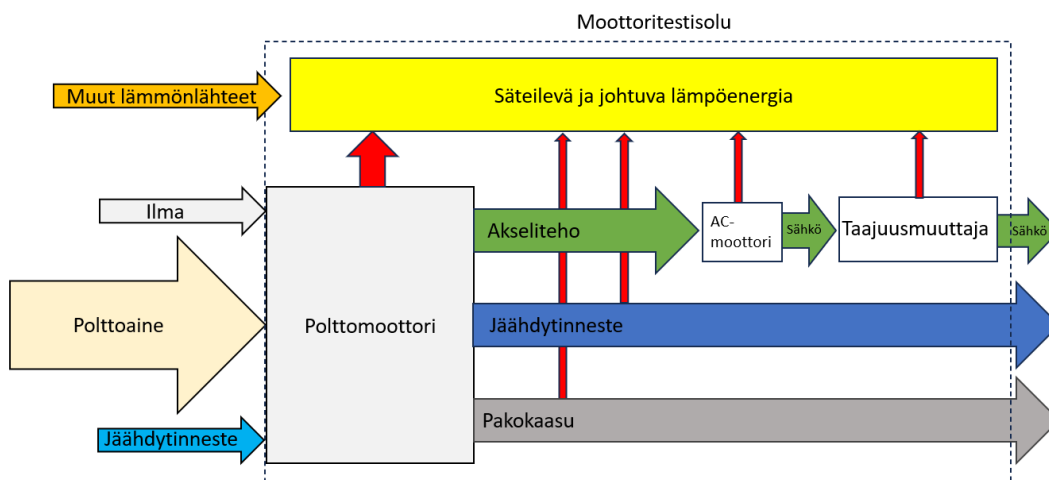
H_3 = imuilman entalpia (kW)

Q_1 = jäähdytinnesteeseen siirtyvän lämmön energia (kW)

P_s = akseliteho (kW)

3.2 Muut säteilevän ja johtuvan lämpöenergian lähteet

Kaavalla 8 lasketun moottorin tuottaman lämpöenergian lisäksi testisolun säteilee lämpöä myös jäähdytysputkista, dynamometrillä, valaistuksesta ja muista laitteista (6, s. 44). Kuvassa 5 on merkattu AC-dynamometrillä varustetun testisolun suurimmat lämmönlähteet punaisilla nuolilla ja muut vähemmän lämpöenergiaa tuottavat laitteet oranssilla nuolella, johon sisältyy esimerkiksi valaistus ja mittauskaluston tuottama lämpö.



KUVA 5. Laskuissa huomioon otettavat lämpöenergian lähteet testisolussa (ks. 6, s.44)

Laitteiden tuottama lämpöenergia voidaan laskea niiden hyötysuhteesta. Nykyisillä AC-moottoreilla hyötysuhde on noin 0,95, mikä tarkoittaa, että moottori tuottaa lämpöenergiaa 5 % testattavalta polttomoottorilta tulevasta tehosta. Nestejäähdytetyillä dynamometreillä suurin osa tästä lämpöenergiasta on mahdollista ohjata testisolun ulkopuolelle. AC-dynamometreillä taajuusmuuttaja voidaan myös sijoittaa testisolun sisälle, jolloin sen hyötysuhde täytyy ottaa huomioon testisolun energiatasapainoa laskettaessa. Taajuusmuuttajien hyötysuhde on myös noin 0,95. (6, s. 117.)

Osa testisolun lämmöstä poistuu seinien kautta. Yleensä testisolujen seinät ovat kuitenkin hyvin eristettyjä, joten laskentojen kannalta tätä häviävän pientä energiamäärää ei kannata ottaa huomioon. (6, s. 118.)

3.3 Testisolun jäähdytys

Testisoluun jäävän lämpöenergian määrä on tarpeellista tietää huoneen jäähdytyksen kannalta. Testistandardit ja määräykset asettavat imuilmalle tietyt lämpötilat, joita tulee noudattaa. Proventian emissiolaboratoriossa on pyritty pitämään testisolun lämpötila 25 °C:ssa.

ISO 8178-1 -standardissa imuilman olosuhteet turboahdetulle moottorille määritellään kaavalla 9 saatavan parametrin avulla (12, s. 7).

$$f_a = \left(\frac{99}{p_s}\right)^{0,7} \times \left(\frac{T_a}{298}\right)^{1,5} \quad (\text{KAAVA 9})$$

p_s = ilmanpaine (kPa)

T_a = imuilman lämpötila (K)

Jotta testi olisi validi, täytyy parametrin f_a olla vähintään 0,93 ja enintään 1,07 (12, s. 7). Kaavaa 9 käyttämällä voidaan laskea, että normaalissa ilmanpaineessa 101,325 kPa täytyisi imuilman lämpötilan pysyä 14 °C:n ja 42 °C:n välissä.

Yhdysvaltojen lainsäädännön mukaan imuilman lämpötila alle 560 kW:n moottoreilla täytyy pystyä pitämään testin ajan 25 ± 5 °C:ssa. Yli 560 kW:n moottoreilla voidaan käyttää testeissä 35 °C:n ylärajaa, mutta järjestelmän on silti kyettävä laskemaan imuilman lämpötila 25 °C:seen stabiileilla kierroksilla ja väännöllä, joilla käytetään vähintään 30 % moottorin nimellistehosta. (13.)

Testisolun ilmanpaine täytyy myös ottaa huomioon ilmanvaihdon suunnittelussa. Jos testaustilaan ei saada tarpeeksi korvausilmaa, siellä olisi suuri alipaine, koska moottori imee paljon ilmaa huoneesta. Ilmanpaine testisolussa saisi silti olla noin 50 Pa pienempi kuin ulkoilman paine. Pieni alipaine estää esimerkiksi pakokaasun ja polttoainehöyryjen pääsyn muihin huoneisiin. (6, s. 111.)

Ilmanpaineen tarkkailu on myös tärkeää työturvallisuuden näkökulmasta. Liian suurella paineella ovet lentäisivät auki avatessa ja liian pienellä paineella niitä olisi mahdotonta aukaista hätätilanteissa (6, s. 64).

Moottorin ilmansuodatin sijaitsee yleensä testisolussa. Tästä syystä täytyy testisolun lämpötila saada pidettyä mahdollisimman stabiilina joko ilmanvaihdolla tai ilmastointikoneilla. Ilmansuodattimen sijoittamisella testisoluun voidaan kuitenkin vaikuttaa, sillä lainsäädännön mukaan juuri imuilman ominaisuudet ennen suodatinta ovat merkitseviä.

3.3.1 Jäähdytys ilmanvaihdolla

Yksinkertaisin tapa hallita testisolun olosuhteita on asentaa huoneeseen tuloilmalle ja poistoilmalle ilmanvaihtoputket, joilla kummallakin on omat puhaltimet. Testisolun läpi kulkeva ilmanmäärän tarve lasketaan kaavalla 10. (6, s. 118.)

$$Q_A = 0,84 \frac{H_L}{\Delta T} m^3/s \quad (\text{KAAVA 10})$$

$$Q_A = \text{ilmavirta} \left(\frac{m^3}{s} \right)$$

$$H_L = \text{testisoluun säteilevä ja johtuva lämpökuorma (kW)}$$

$$\Delta T = \text{soluun tulevan ja poistuvan ilman lämpötilaero (K)}$$

Kun tiedetään ilman jäähdytykseen tarvittava ilmavirran määrä, täytyy siihen vielä lisätä testattavan moottorin imemän ilman määrä (6, s. 131).

Molemmat puhaltimet tarvitsevat taajuusmuuttajat, joilla niiden pyörimisnopeutta voidaan säätää. Yleisin tapa säätää testisolun paine ja lämpötila sopivaksi on asettaa poistopuhallin seuraamaan testisolun lämpötilaa, jolloin puhallin pyörii nopeammin lämpötilan kasvaessa ja hitaammin

lämpötilan laskiessa. Tuloilmapuhallin asetetaan puolestaan seuraamaan testisolun painetta. Kun testisolun lämpötila kasvaa ja solusta imetään enemmän ilmaa ulos, huomaa tuloilmapuhaltimen paineanturi paineen alenemisen ja kasvattaa tuloilman massavirtaa pitäen testisolun paineen optimaalisena. (6, s. 126.)

3.3.2 Jäähdytys ilmastointikoneella

Testisolun jäähdytys on myös mahdollista toteuttaa ilmastointikoneella, jonka etuina ovat jäähdytyksen lisäksi myös lämmitys ja kosteuden säätö (6, s. 133–134). Ilmastointikoneisiin on lisäksi mahdollista asentaa lämmöntalteenotto-ominaisuuksia, joilla testiajoissa vapautuva lämpöenergia voidaan käyttää talon muiden tilojen lämmittämiseen. Huonoihin puoliin voidaan luetella hinta ja järjestelmän monimutkaisuuden aiheuttamat suuremmat huoltokustannukset. Ilmastointikoneet vaativat lisäksi paljon tilaa. Myös ilmastointikoneetta käyttäessä täytyy testisoluun saada korvausilmaa moottorin imemän ilman kompensoimiseksi.

4 DYNAMOMETRIEN KOMPONENTTIEN VALINTA

Komponenttien valintaan täytyi selvittää erilaisia vaatimuksia ja tavoitteita dynamometreille. Kun nämä spesifikaatiot oli selvitetty, niistä kasattiin tietopaketti, jonka avulla tarvittavista komponenteista kyseltiin tarjouksia eri valmistajilta sekä jälleenmyyjiltä.

Näistä tiedoista laadittiin myös alustava vertailutaulukko, johon listattiin eri arvostelukriteereitä ja painoarvoja niille (taulukko 1). Taulukon avulla eri tarjouksia pystyttiin vertaamaan helposti toisiinsa ja tämän avulla valitsemaan paras vaihtoehto.

TAULUKKO 1. Dynamometrien tarjousten vertailutaulukko

Arvostelukriteeri		esimerkki vaihtoehto 1.		esimerkki vaihtoehto 2.	
	Painoarvo	Pisteet	Painotetut pisteet	Pisteet	Painotetut pisteet
Hinta	0,25	5	1,25	0	0
TC2 pituus	0,25	5	1,25	0	0
vääntökäyrä	0,2	5	1	0	0
max rpm	0,2	5	1	0	0
Huoltopalvelut	0,1	5	0,5	0	0
Yhteensä	1	25	5	0	0

4.1 Dynamometrien ominaisuuksien määritteleminen

Dynamometrejä lähdettiin valitsemaan määrittelemällä niille molemmille omat vääntökäyrät ja ko-koa rajoittavat tekijät. TC1 tulee olemaan tehoiltaan suurempi kuin TC2, niin kuin ne ovat tälläkin hetkellä. Nykyisin käytössä olevien dynamometrien ominaisuuksien perusteella muodostettiin vääntö- ja tehokuvaajat, joita käytettiin apuna tulevien jarrujen mitoittamisessa (kuva 6).



KUVA 6. TC1:n ja TC2:n pyörrevirtadynamometrienväntö- ja tehokäyrät (vrt. 14, s. 57)

TC2:n pyörrevirtadynamometri saavuttaa huipputehonsa 300 kW vasta 2400 rpm:llä. Väntökäyrä on testattaviin moottoreihin nähden väärän muotoinen, sillä yleensä enimmäisteho saavutetaan testattavilla moottoreilla hieman alle 2000 rpm:llä ja suurin väntö noin 1200–1600 rpm:llä. TC1:n pyörrevirtadynamometrin kaltainen väntökäyrä on jo paljon parempi Proventialla yleensä testattavien raskaiden dieselmoottoreiden testaamiseen. (Kuva 6.)

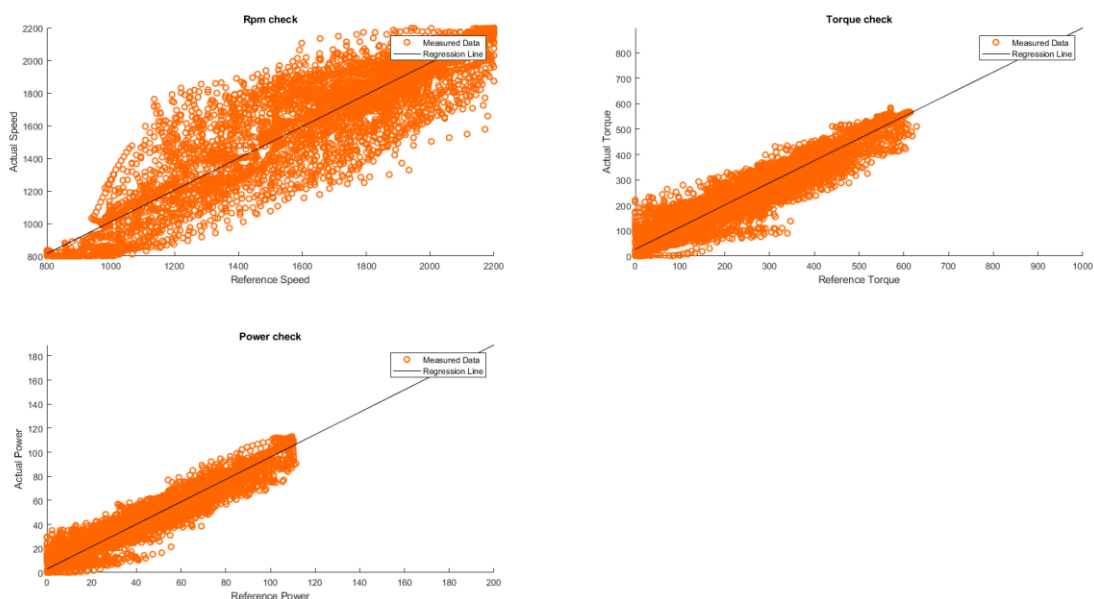
Uusien dynamometrienväntö- ja tehokäyrät tulisi olla AC- tai DC-dynamometrejä. Pyörrevirtajarruilla ei voida pitää tarkasti testisykleissä väntöä asetusarvossa kierroksia nostaessa, koska pyörrevirtajarrulla ainoa pyörimisnopeutta nostava väntö tulee testattavasta moottorista. AC- ja DC-dynamometrit

kykenevät pitämään pyörimisnopeuden asetetussa arvossa, jolloin vääntömomentin toteutuminen riippuu vain moottorin kuormanottokyvystä.

Koska pyörrevirtajarrulla vain testattava moottori tuottaa vääntöä, on sen kierrosnopeuden kiihtyvyys kaavan 1 mukaisesti riippuvainen pelkästään testimoottorin väännöstä. AC- ja DC-dynamometreillä voidaan lisäksi tuottaa momenttia, jolloin kierrosnopeuden kiihtyvyys on kaavalla 1 perusteltuna suurempi.

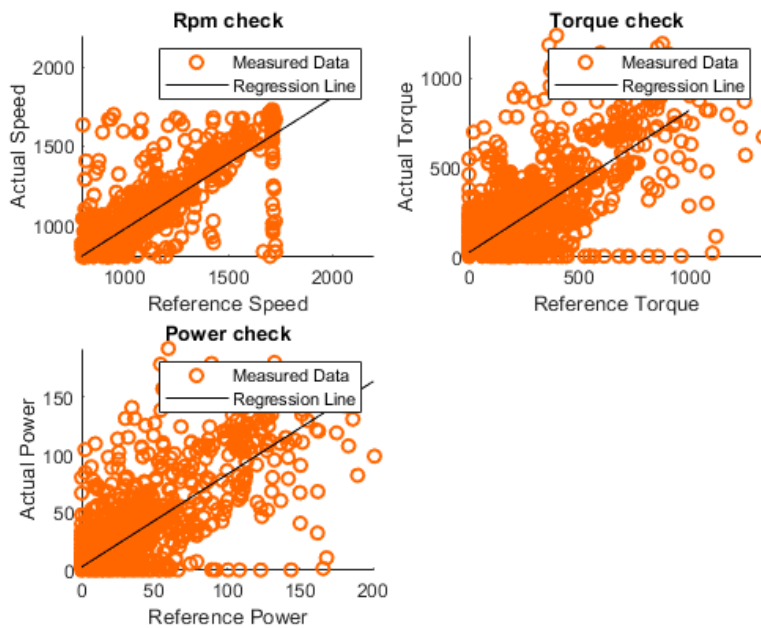
Tulevassa Tier 5 -päästöstandardissa tulee työkonoiden oma päästöjenvalvonta pakolliseksi, jonka myötä emissiolaboratoriossa täytyy moottorilla pystyä toistamaan OBD:llä luettua kenttädataa ja tässä hyvin todennäköisesti tulee olemaan moottorijarrutusta (15). Moottorijarrutuksen simulointi laboratoriossa edellyttää, että dynamometrillä pystytään pyörittämään testattavaa moottoria. Tämä myös asettaa AC- tai DC-dynamometrin pakolliseksi kriteeriksi testauslaitteiston valintaan, jos moottoritestisolussa halutaan pystyä suorittamaan kaikki tarpeelliset testisyklit.

Kuvassa 7 on TC2:ssa pyörrevirtadynamometrillä ajettu Stage V- ja Tier 5 -päästölainsäädäntöjen mukainen NRTC-sykli, joka täytti kymmenen arvostelukriteeriä 12:sta. Y-akselilla on toteutunut moottorin pyörintänopeus, vääntömomentti ja teho. X-akselilla on arvot, jotka näissä mittapisteissä olisi täytynyt toteutua. Mitä kauempana mitattu oranssi piste on taulukon poikki menevästä mustasta viivasta, sitä epätarkempi on tulos. (Kuva 7.)



KUVA 7. TC2:ssa Horiba WT300 -pyörrevirtadynamometrillä ajettun NRTC-syklin tulokset (4)

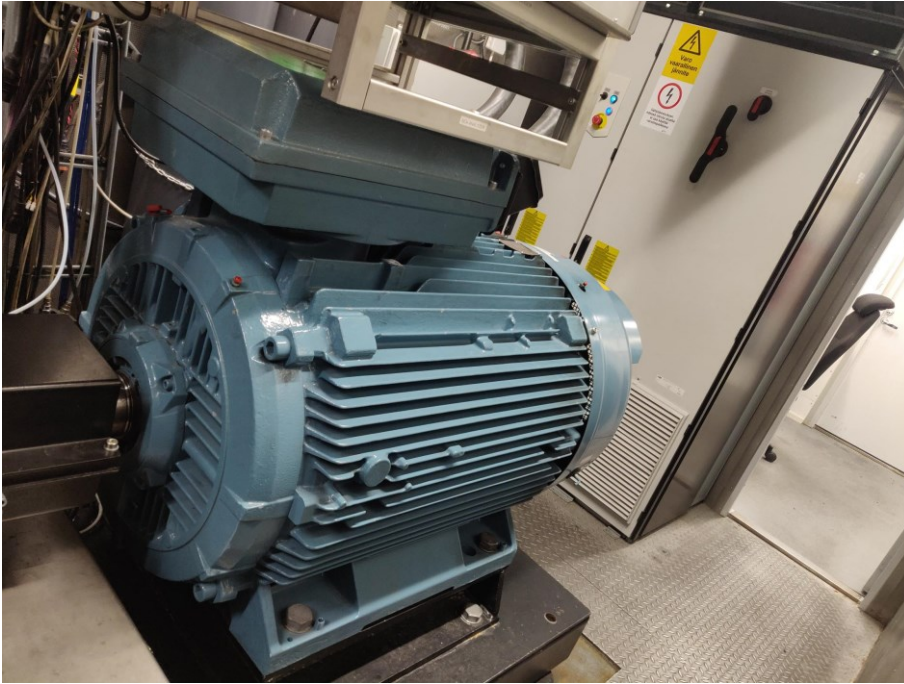
TC1:ssä oli testattu Tier 5 -päästölainsäädännön mukainen uusi LLC-sykli. Tämä testisykli täytti enää vain neljä arvostelukriteeriä 12:sta. (Kuva 8.)



KUVA 8. TC1:ssä Horiba WT470 -pyörrevirtadynamometrillä ajetun LLC-syklin tulokset (4)

Jotta testisyklin tuloksia voidaan pitää validina, täytyy toteutua kaikki 12 arvostelukriteeriä. TC1:n ja TC2:n testisykliä säätöparametrejä optimoimalla tuloksia voisi vielä parantaa, mutta tässä tilanteessa saavutettaviin hyötyihin nähden sitä ei ole pidetty tarpeellisena (15).

Watti 1 -testausyksikössä on suoritettu vastaavia testisyklejä ABB:n M3BP 355SMB 4 AC-moottorilla ja ACS880-taajuusmuuttajalla (kuva 9). Tällä kokoonpanolla voidaan testata enimmillään 315 kW:n moottoreita. Testisykliä vääntömomentit, tehot ja kierrosnopeudet ovat täyttyneet Watti 1:ssä lähes täydellisesti toteuttaen kaikki arvostelukriteerit (15).

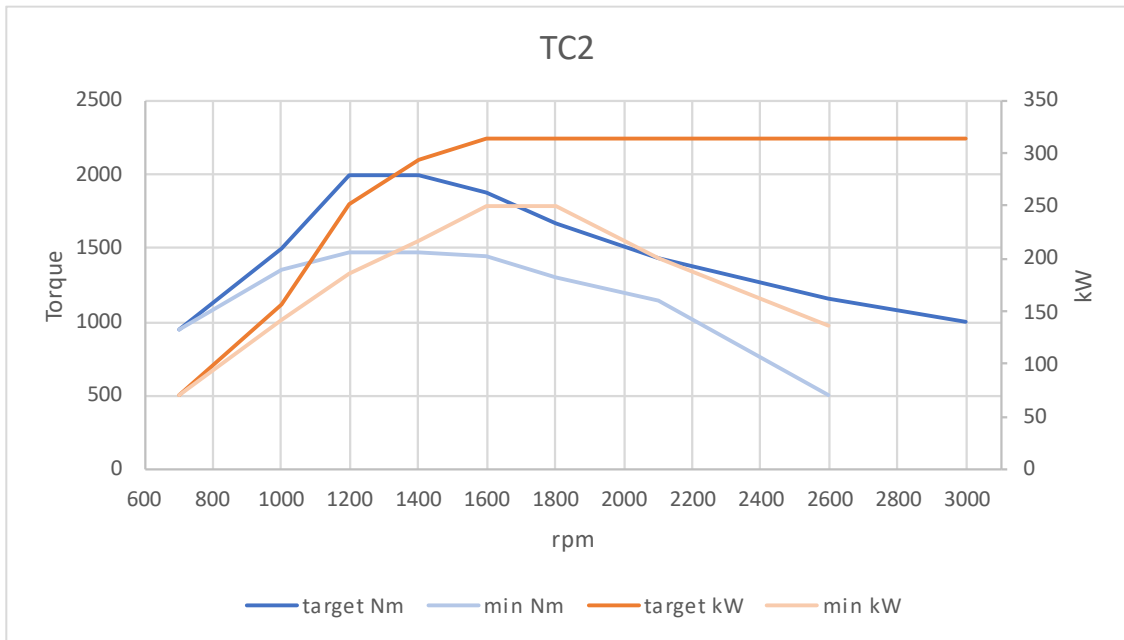


KUVA 9. Watti 1 -testausyksikön moottoridynamometri

Dynamometrien jäähdytyksessä päädyttiin suosimaan ilmajäähdytettyjä malleja niiden yksinkertaisuuden vuoksi. Nestejäähdytettyihin verrattuna etuina on esimerkiksi nesteputkien poisjättäminen ja täten vuotojen mahdollisuuden poistaminen. Tämänhetkisille pyörrevirtadynamometreille on olemassa jäähdytinnestelinjat. Näitä voitaisiin käyttää uusilla nestejäähdytetyillä dynamometreillä, mutta niillekin on olemassa energiatehokkuuden parantamiseen liittyen parempaa käyttöä, josta kerrotaan tarkemmin luvussa 6.3.

4.1.1 TC2:n dynamometrin spesifikaatioiden määrittäminen

TC2-moottoritestisolun dynamometrin vähimmäisvaatimusten mitoituksessa käytettiin pienemmillä nelisynterisillä moottoreilla ajettua mittausdataa. Lisäksi mitoitettiin toivottu vääntökäyrä, jonka enimmäisväännön perusteena käytettiin hieman isompien moottoreiden dataa. Suurin kierrosnopeus täytyi olla vähintään 2600 rpm, mutta tarvittaessa ei ole haittaa, jos se on korkeampi. Proventialla ei ole kuitenkaan ollut tarvetta testata moottoreita, joiden maksimi kierrosnopeus olisi enemmän kuin 2600 rpm. Horiban WT300 -pyörrevirtadynamometriin verrattuna tulevan dynamometrin enimmäisnopeus sekä kierrosalueet enimmäisväännölle ja -teholle olisivat optimaalisemmat testattaviin moottoreihin nähden. Näillä tiedoilla muodostettiin vääntökäyrät (kuva 10).



KUVA 10. TC2:n dynamometrin suunnitellut vääntökäyrät

TC2-moottoritestisolun ollessa hyvin pieni, tulee siellä myös rajoituksia dynamometrin mittoihin. Testattavalta moottorilta dynamometrille tulevan kardanin paikka pyritään pitämään samana, koska moottorin asennukseen ei haluta tehdä muutoksia. Suurin rajoitus TC2:ssa on dynamometrin pituus, joka saa olla seinästä kardanin laippaan mitattuna enintään 1400 mm. 1400 mm:n mitassa oli myös huomioitu jarrun navan ja kardanin väliin tulevan momentinmittauslaipan pituus (ks. luku 4.4.1 momentin mittaaminen). Tiloja mitatessa huomattiin, että testisolua olisi mahdollista jatkaa noin yhden metrin verran, mutta tämä aiheuttaisi pidemmän käyttökatkon testeille ja kasvattaisi huomattavasti projektin hintaa.

4.1.2 TC1:n dynamometrin spesifikaatioiden määrittäminen

TC1-moottoritestisolun dynamometrin vähimmäisvaatimusten vääntökäyrä mitoitettiin mahdollisesti tulevaisuudessa tulevien moottorien mukaisesti, joita ei ole vielä tarvinnut Proventialla testata. Tällä vääntökäyrällä on mahdollista myös testata kaikista tehokkaimpia moottoreita, joita Proventialla on ollut. Lisäksi jos tulevaisuudessa tulee vielä tehokkaampia tai korkeampaan kierrosnopeuteen kykeneviä moottoreita, suunniteltiin myös hieman suuremmilla väännöillä ja kierrosnopeuksilla oleva käyrä. Horiba WT470 -pyörrevirtajarruun verrattuna olisi tulevan dynamometrin nimellisvääntö hieman pienempi, mutta tehojen puolesta tavoitteena on sama 470 kW. Myös TC1:n dynamometrin vääntökäyristä muodostettiin kuvaaja (kuva 11).



KUVA 11. TC1:n dynamometrin suunnitellut vääntökäyrät

Dynamometrin koon puolesta TC1:een ei asetettu rajoituksia, koska siellä on erittäin paljon tilaa asennukselle. Ainoa dynamometrin mittoihin liittyvä tavoite TC1:ssä oli saada kardaania alemmas, mikä tarkoittaa sitä, että dynamometrin akselin pitää olla alempana kuin nykyisessä pyörrevirtajarrussa. Kardaania täytyy saada alemmas testattavan moottorin vaihdon helpottamiseksi. Testattava moottori tulee nykyisellä pyörrevirtajarrulla lähelle testisolun kattoa, jonka takia moottorin paikalleen nosto trukilla on vaikeaa.

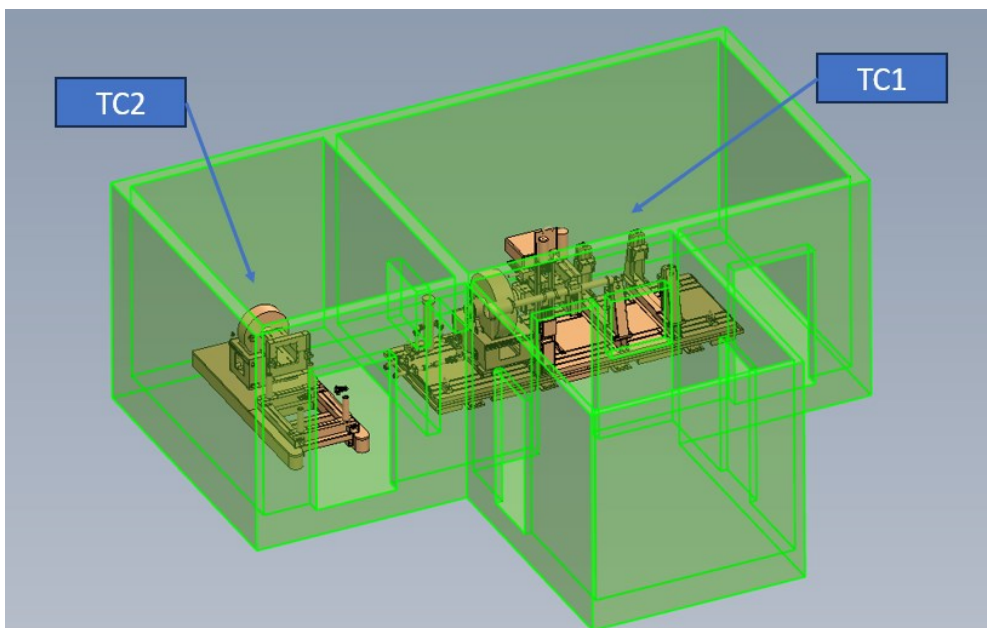
4.2 Dynamometrien komponenttien tarjousten kysely

Tarvittavia dynamometriä komponentteja eli AC-moottoreita ja taajuusmuuttajia kyseltiin sekä virallisilta dynamometriä valmistajilta, esimerkiksi AVL tai Horiba, että yrityksiltä ja jälleenmyyjiltä, jotka eivät mainosta suoraan näiden komponenttien käyttöä dynamometritarkoituksessa, mutta jotka joko jälleenmyyvät tai valmistavat sähkömoottoreita ja taajuusmuuttajia. Tarjouspyyntöjä lähetettiin sähköpostilla yhteensä 12:een eri paikkaan sekä kotimaisille että ulkomaisille toimijoille. Tarjouspyyntöjen lähettämistä helpotti viestipohja, jota aina muokattiin sen mukaan, minne viestiä lähetettiin.

Sopivien AC-moottoreiden ja taajuusmuuttajien mitoitus jätettiin pääasiassa tarjouspyynnön saaneille yrityksille. Tarjouksia kysellessä saatettiin kuitenkin ehdottaa sopivan näköistä mallia katalogista semmoisen löytyessä. Ei myöskään ollut täysin poissuljettu vaihtoehto, että AC-moottorit olisi

tilattu eri valmistajalta kuin taajuusmuuttajat. Pidettiin myös vaihtoehtona, että TC1:ssä ja TC2:ssa voisi olla eri valmistajien komponentit. Nämä ovat kuitenkin järkevintä valita samalta valmistajalta, koska tällöin asennukset onnistuisivat samanlaisilla kytkennöillä ja ohjeilla. Myös testisolujen käyttö voisi olla tällöin helpompaa, koska molemmat toimisivat samankaltaisilla järjestelmillä.

Lähetetyissä tarjouspyynnöissä oli kerrottu, mihin käyttöön tarvittavat komponentit tulisivat ja min-kälaisia ominaisuuksia niiltä vaaditaan. Lisäksi liitteenä oli kuvia sekä yksinkertainen 3D-malli tes-tisoluista pyörrevirtajarruilla, joiden avulla selvitettiin, mikä kokoinen tuleva AC-moottori saisi olla (kuva 12).



KUVA 12. 3D-malli testisoluista pyörrevirtajarruilla (16)

Suurempien tarkalleen dynamometrikäyttöön myyvien yritysten AC-moottorit ja taajuusmuuttajat eivät eroa mitenkään merkittävästi esim. ABB:n valmistamista komponenteista. Työtä tehdessä pyrittiin selvittämään, onko esimerkiksi Horiban dynamometreissä mitään ominaisuutta, minkä ansiosta ne olisivat parempia kuin muut AC-moottorit ja taajuusmuuttajat. Ainoa vähemmän merkitsevä etu oli Horiban taajuusmuuttajien helpompi kytkentä Horiban valmistamaan SPARC dynamometrin ohjauslaitteeseen, joka onnistuu CANbus-liitännällä. Ohjauslaitteesta löytyy kuitenkin myös analogisia sekä digitaalisia tuloja ja lähtöjä, joiden avulla taajuusmuuttajia voidaan ohjata. Proven-tialla on myös aikaisempaa kokemusta ohjausautomaation kytkemisestä muun valmistajan taajuusmuuttajalle. Esimerkiksi Watti 1 -testausyksikössä on käytössä AVL:n valmistama automaatio, joka on kytketty ABB:n valmistamaan taajuusmuuttajaan. Lopulta päädyttiin tulokseen, ettei erityisesti

dynamometreiksi myytävillä järjestelmillä ole määritellyssä käytössä eroa muihin AC-moottoreihin ja taajuusmuuttajiin kuin 2–4 kertaa suurempi hinta. Myös dynamometrien tarkempi tehojen määrittely oli vaikeaa dynamometrien myyjien kanssa, koska heillä oli vain tietyt vakiomallit, jotka olivat tehoiltaan joko yli- tai alimitoitettuja. TC2:n pituusrajan puolesta ei myöskään löytynyt sopivan kokoista dynamometriä, joka mahtuisi testisoluun.

Yleinen väärinkäsitys, joka komponenttien myyjillä oli, että he mitoittivat AC-moottorit sillä teholla mikä saadaan, kun moottoria pyöritetään. Koska AC-moottoria käytetään suurimmaksi osaksi testattavan moottorin jarruttamiseen, on todellinen kardanille aiheutuva jarruttava vääntö AC-moottorille ilmoitettu vääntömomentti jaettuna AC-moottorin hyötysuhteella. Moottorijarrutuksen simuloinnissa ei tarvita yhtä paljon vääntöä kuin jarruttamisessa ja tämän takia myyjien ehdottamat vaihtoehdot olivat yleensä hieman ylimitoitettuja.

4.3 Valitut dynamometrien komponentit

Tarjouksien perusteella täytetty taulukko 1:n mukainen vertailutaulukko on liitteessä 1. Saatujen tarjousten perusteella päädyttiin valitsemaan ABB:n high dynamic performance -malliston AC-moottorit ja ACS880-taajuusmuuttajat. Vaikka eri myyjien tarjoamat vaihtoehdot olivat erittäin kilpailukykyisiä sekä hinnoiltaan että teknisiltä ominaisuuksiltaan, oli ABB:n valintaan silti useampia ratkaisevia tekijöitä.

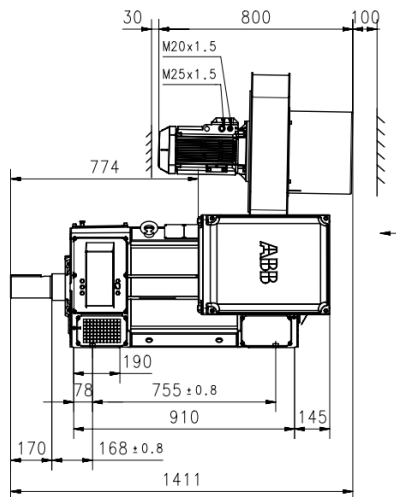
Perusteluina ABB:n komponenttien valintaan oli

- erillinen jäähdytyspuhallin jarruna toimivalle moottorille, joka kykenee jäähdyttämään jarrua, vaikka se pysähtyisi
- TC2:n pituus saatiin kustomoitua kaikista vaihtoehdoista lyhyimmäksi
- suurin kierrosnopeus 4000 rpm TC1:ssä osoittautui haasteelliseksi monilla valmistajilla, mutta ABB:llä tämäkin onnistui
- pieni inertia, joka mahdollistaa nopeat kierrosnopeudenmuutokset
- kotimaisuus
 - moottoreiden valmistus Vaasassa
 - taajuusmuuttajien valmistus Helsingissä ja Virossa
- edullisin hinta
- 2 vuoden takuu

- Oulusta löytyy tarvittaessa huoltopalvelu
- neuvotteluissa huomioitu ammattitaitoinen ja nopea tuki
- Watti 1 -testausyksiköstä tuttu taajuusmuuttajien säätämiseen käytettävä ABB drive composer -ohjelma.

4.3.1 TC2:n AC-dynamometri

ABB:ltä ehdotettiin TC2:een M3FT 250 A4 B3 AC-moottoria. Moottorin pituus sai olla seinästä akselin päähän mitattuna noin 1400 mm, mutta pituus oli 1511 mm, jos huomioidaan myös jäähdytyspuhaltimen vaatima 100 mm:n ilmarako (kuva 13).

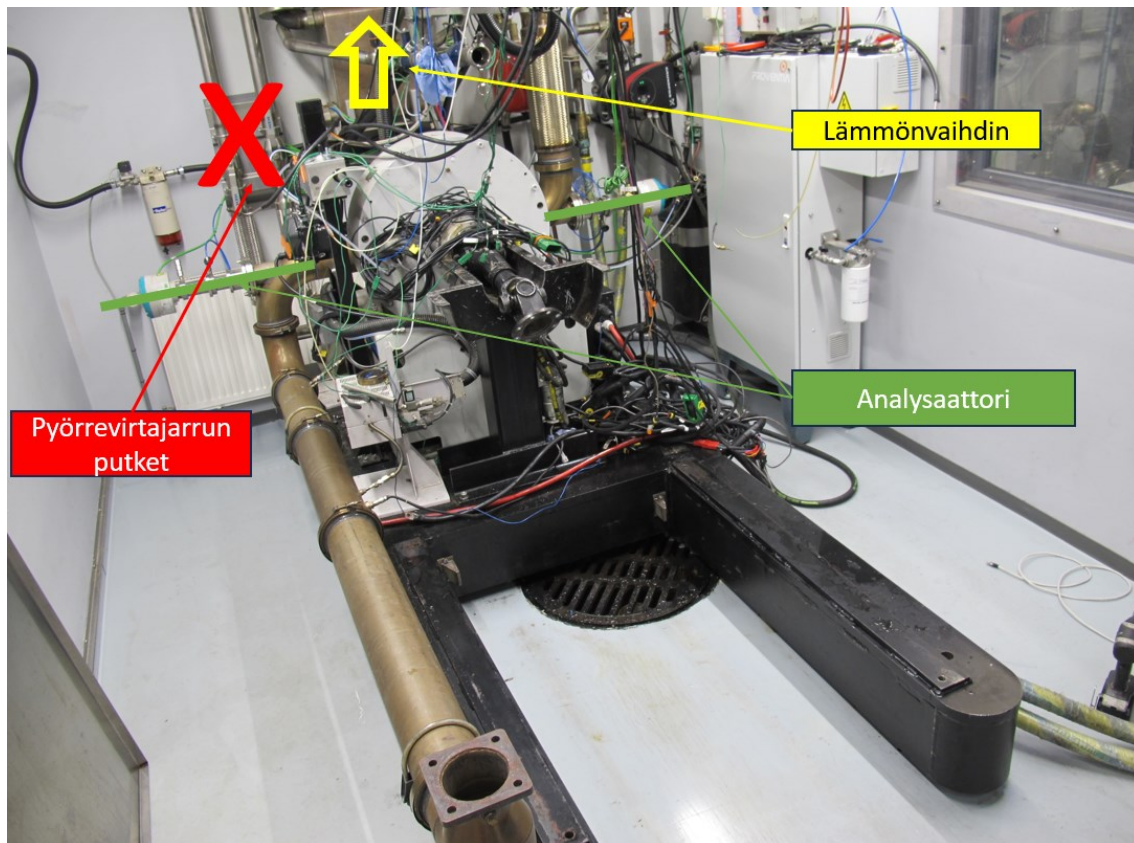


KUVA 13. M3FT 250 A4 B3 mittakuva (17)

Proventian suunnittelusta varmistettiin, kuinka pitkä kiilaura riittää AC-moottorin akselin ja kardaanin väliseen kiinnityspalaan. ABB:n kanssa yhteistyössä selvitettiin, voiko jäähdytyspuhaltimen siirtää moottorin etuosaan, jossa se imisi jäähdytysilman takaapäin ja puhaltaisi sen ulos moottorin takapäältä. Myös moottorin kaapeleiden liitäntää ehdotettiin siirrettäväksi moottorin etuosaan. Näillä muutoksilla ja riittäväällä 60 mm akselin kiilauralla saatiin AC-moottorin perän ja akselinpään etäisyys lyhennettyä 1119 mm:iin. TC2:n AC-moottorin mittakuva edellä mainituilla muutoksilla on liitteessä 2.

Jotta AC-moottori saadaan mahtumaan testipenkkiin, täytyy testisoluun tehdä silti pieniä muutoksia. Kuvassa 14 punaisella rastilla merkatut pyörrevirtajarrun jäähdytysnesteen putket tullaan poistamaan, keltaisella nuolella merkattu moottorinjäähdytysnesteen lämmönvaihdin sekä siitä lähteviä

putkia siirretään ylöspäin ja vihreällä viivalla merkattu ammoniakianalysointilinjaa voidaan kääntää pystyyn kuvasta katsottuna testipedin vasempaan reunaan. Analysointilinjän päiden välinen suoran putken pituus täytyy pitää entisessä mitassa ja pakoputki voidaan ohjata katosta entisestä läpivientistään ulos.

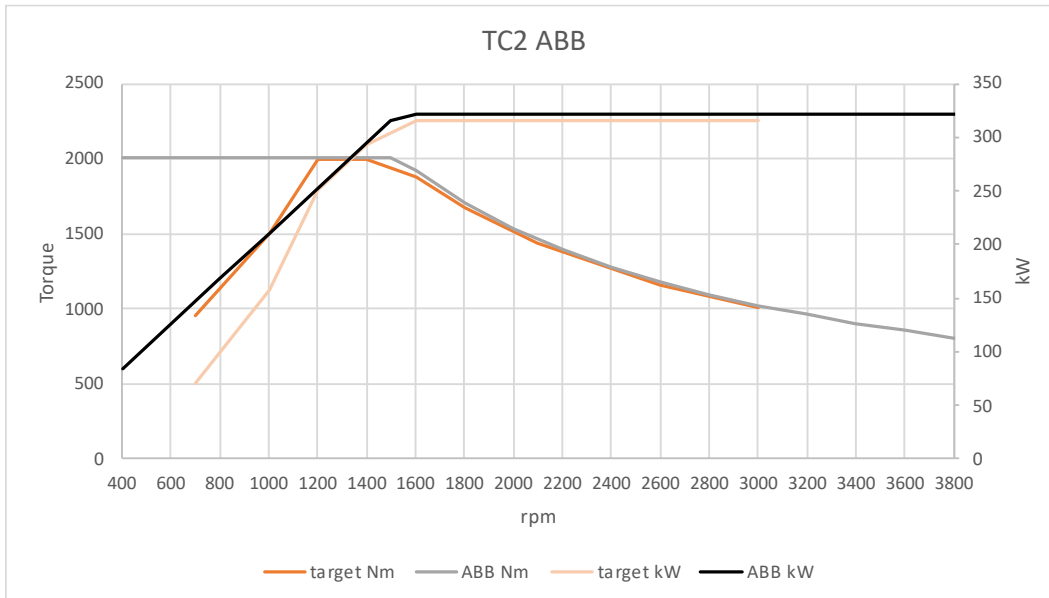


KUVA 14. TC2:n muutokset AC-dynamometrille

AC-moottorille täytyy rakentaa sopiva teline, jolla moottori voidaan kiinnittää testipetiin sekä akselin korkeutta saadaan nostettua. Nykyisen akselin korkeuden ollessa 700 mm testipedin yläreunasta mitattuna tarvitaan liitteen 2 mittakuvan perusteella 450 mm korkea teline. Telineen suunnittelu ja valmistus tullaan toteuttamaan Proventialla.

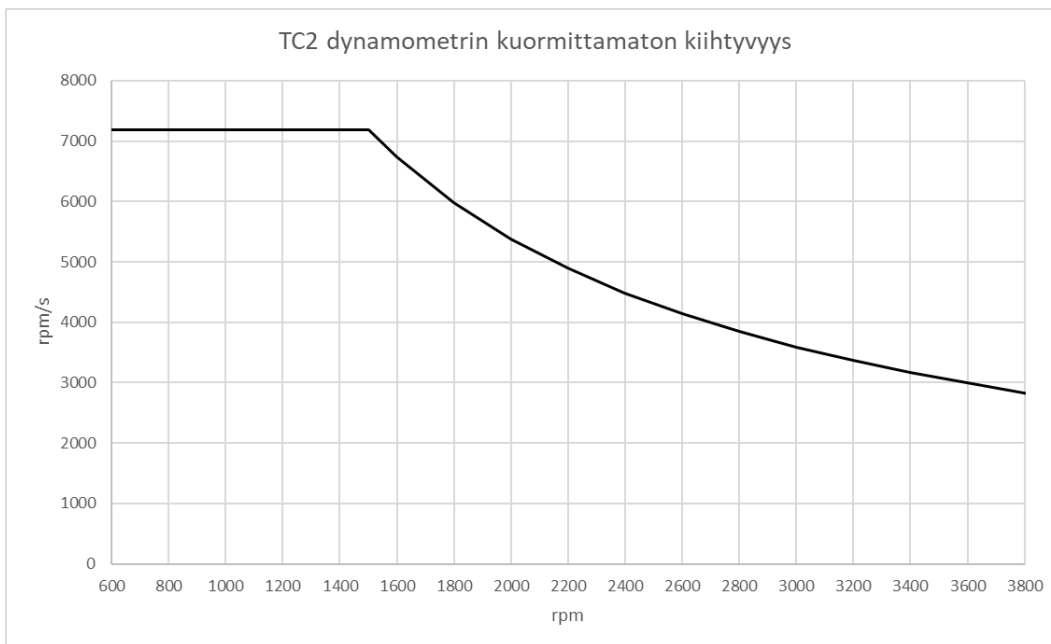
Vääntökäyrän puolesta TC2:ssa ABB:n komponentit riittivät kaikkiin asetettuihin vaatimuksiin, joilla saadaan jo testattua suurempiakin moottoreita. Suurin kierrosnopeus on 3800 rpm, jota olisi vielä voinut saada korkeammaksi päivittämällä siihen erilaiset laakerit. Tämä kuitenkin ylittää vaatimukset jo 800 rpm:llä. Liitteessä 3 on ilmoitettu TC2:n AC-moottorin vääntömomentiksi 1910 Nm 0–1500 rpm kierrosnopeudella. 1500 rpm:n jälkeen on AC-moottorin teho 300 kW (liite 3). Kaavaa 1 käyttämällä saadaan muodostettua näistä arvoista moottorille vääntökäyrä. AC-moottorin

hyötysuhde on liitteen 3 mukaisesti 0–1500 rpm:n välillä 0,95 ja 1500–3800 rpm:n välillä 0,933. Kun aikaisemmin muodostettu vääntökäyrä kerrottiin näillä hyötysuhteilla, saatiin piirrettyä kuvaajat siitä, kuinka paljon AC-moottorilla pystytään kuormittamaan testattavaa polttomoottoria (kuva 15).



KUVA 15. ABB:n komponenteilla saavutettava vääntökäyrä TC2:een

Inertiaksi oli ilmoitettu 2,54 kgm² (liite 3). Jos ei huomioida testattavan moottorin sekä kardaanin inertiaa, voidaan tehdä moottorin kiihtyvyydelle kuvaaja kaavan 2 avulla. Kuvaajasta nähdään, kuinka nopeasti moottori voi kiihtyä eri kierroksilla kuormittamattomana (kuva 16).

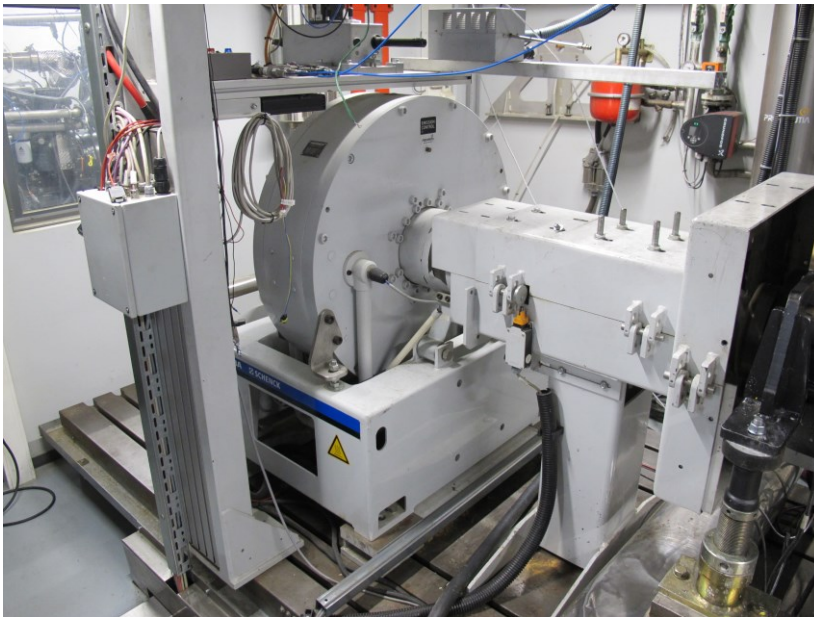


KUVA 16. ABB:n AC-moottorin kuormittamaton kiihtyvyys TC2:ssa

Watti 1 -testausyksikön dynamometrin inertia on $7,3 \text{ kgm}^2$ ja enimmäisvääntömomentti 2021 Nm (18). Kaavan 2 perusteella olisi suurin kierrosnopeuden muutosnopeus tällöin 2640 rpm/s. Koska Watti 1:n dynamometrin kierrosnopeuden muutosnopeudet ovat olleet tähän mennessä riittäviä, voidaan olettaa uuden ABB:n dynamometrin muutosnopeuden olevan enemmän kuin riittävä.

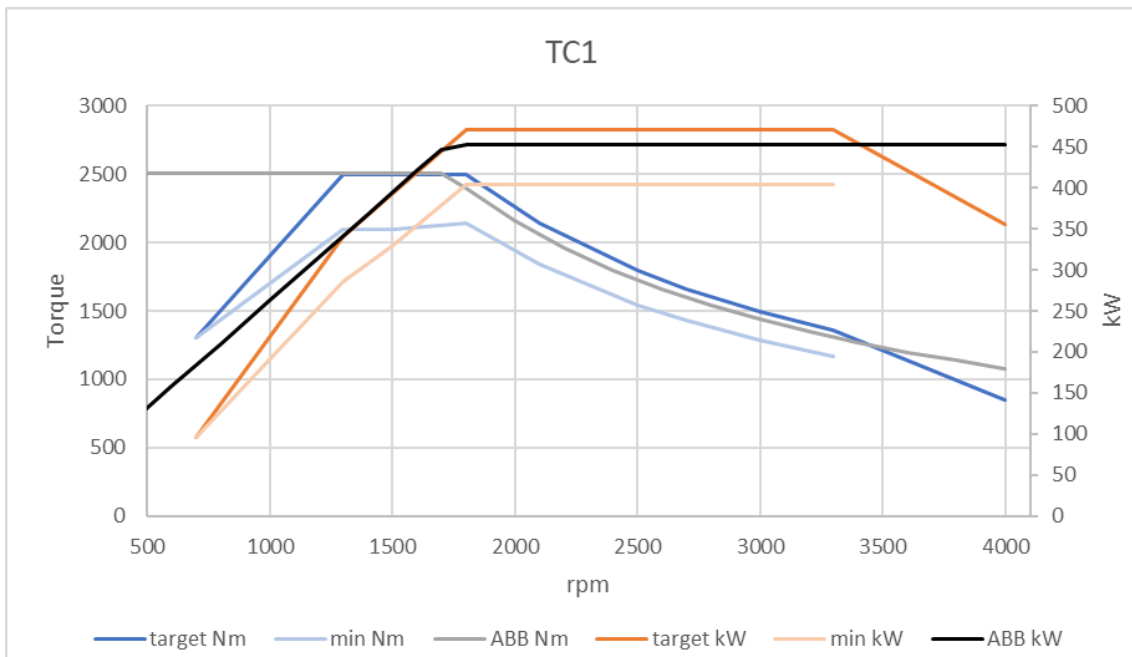
4.3.2 TC1:n AC-dynamometri

TC1:n AC-moottoriksi valittiin ABB:n M3FT 250 B4 B3. Mittojen puolesta tämä mahtuu testisoluuun. Kardaania saadaan laskettua alemmas tällä moottorilla, koska sen akselin korkeus on vain 250 mm. Myös TC1:n dynamometrille täytyy rakentaa teline, jolla akselin korkeutta saadaan nostettua. Lisäksi nykyistä kardaania suojan jalkaa täytyy leikata lyhyemmäksi (kuva 17). AC-moottorin mitakuva on liitteessä 4.



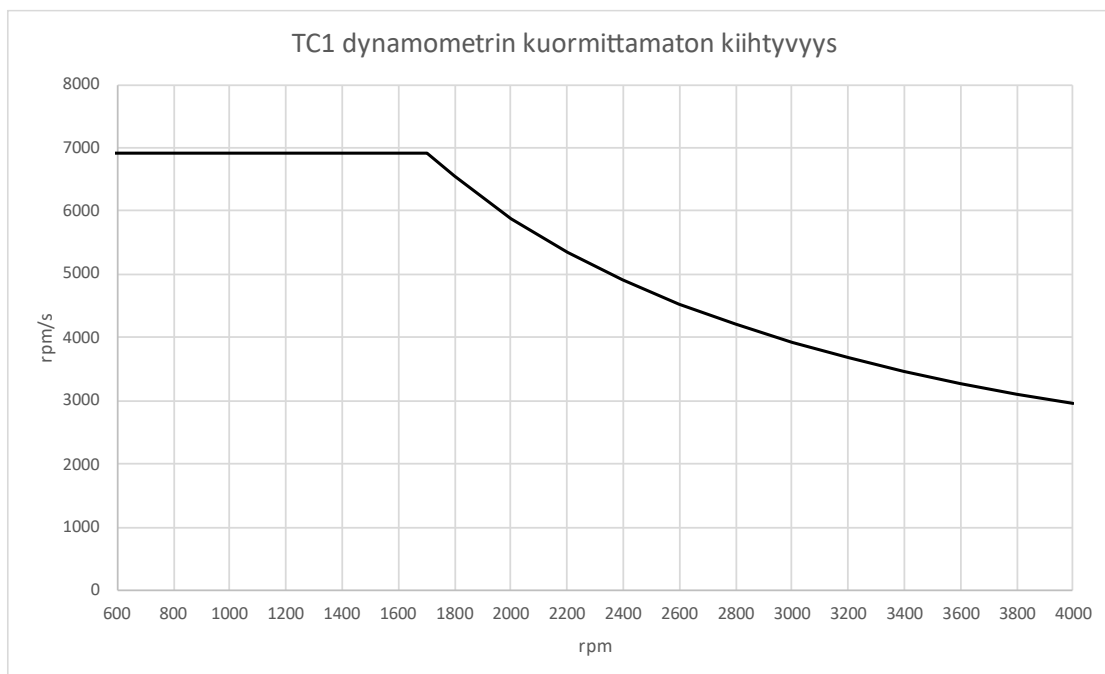
KUVA 17. TC1:n kardaania suoja ja nykyinen pyörrevirtadynamometri

AC-moottoriin täytyi valita paremmat laakerit, jotta sen enimmäiskierrosnopeus saatiin nostettua 4000 rpm:ään. Alkuperäisillä laakereilla kierrosnopeus olisi jäänyt enimmillään 3800 rpm:ään. TC1:n dynamometrille muodostettiin vääntökäyrä samalla menetelmällä kuin TC2:n vääntökäyrä liitteen 5 tiedoilla. Tehoiltaan ABB:n komponentit ei ole aivan tavoitellussa 1600–3400 rpm:ssä, mutta tämä tavoite perusteltiin vain nykyisen pyörrevirtajarrun 470 kW tehosta. Vääntökäyrää voidaan pitää riittävänä sen ollessa yli asetetun vähimmäisvaatimuksen. (Kuva 18.)



KUVA 18. ABB:n komponenteilla saavutettava vääntökäyrä TC1:een

TC1:n AC-moottorin inertia oli 3,29 kgm² (liite 5). Myös tällä kierrosnopeuden muutosnopeus on tarpeeksi suuri (kuva 19).



KUVA 19. ABB:n AC-moottorin kuormittamaton kiihtyvyys TC1:ssä

4.4 Uusien dynamometrien ohjaus Horiban automaatiolla

Proventialla on jo aikaisemmin kytketty AVL:n valmistama automaatio ABB:n ACS880-taajuusmuuttajaan Watti 1 -testausyksikössä. Tilattaviin taajuusmuuttajiin valittiin vastaavat I/O-liitännät kuin aikaisempaankin Watti 1:n taajuusmuuttajaan.

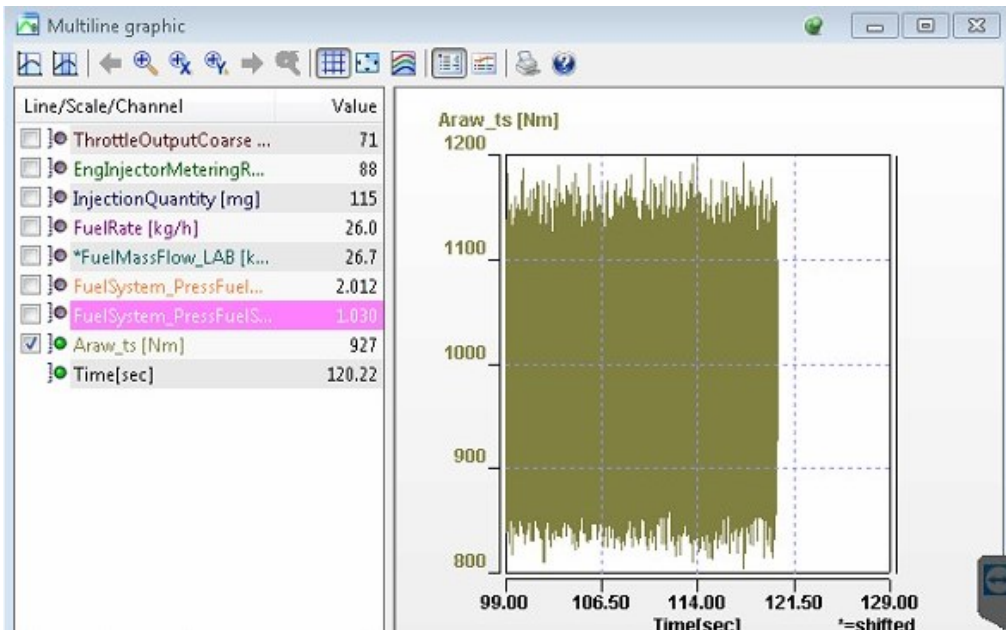
Horiban SPARC-ohjainlaitteen kytkeminen taajuusmuuttajiin ei ole vielä täysin selvää ja tästä täytyy vielä käydä tulevaisuudessa keskusteluja ABB:n kanssa. Liitteessä 6 on SPARC:n analogiset sekä digitaaliset tulo ja lähdöt. Liitteessä 7 on ABB:n analogiset sekä digitaaliset tulo ja lähdöt. Näiden avulla voitiin jo alustavasti suunnitella liitteessä 8 miten ohjaus toteutettaisiin.

4.4.1 Momentin mittaaminen

Dynamometreihin tarvitaan erilliset momentinmittausanturit. Momentinmittausanturi on laippa, joka sijoitetaan AC-moottorin ja kardaanin väliin. Tältä anturilta saadaan tarkempi tieto todellisesta väännöstä kuin taajuusmuuttajalta pyydetystä momentista. Tämä pyydetty vääntö ei välttämättä pidä paikkaansa, koska itse jarrulla ei ole minkäänlaista muuta momentinmittausta kuin virta, jolla momentti määritellään.

Proventialla on Watti 1- ja Watti 2- testausyksiköissä käytössä HBM:n valmistamat momenttilaipat. Myös Horiba käyttää DYNAS3-sarjan AC-dynamometreissään HBM:n antureita momentin mittamiseen (19, s. 5). Koska tämä anturi on toimivaksi havaittu ratkaisu, tilataan uusiin AC-dynamometreihin myös vastaavat komponentit.

Momenttilaipan mitoittamisessa täytyy ottaa huomioon dynamometrin suurimman momentin lisäksi testattavan moottorin momentin vaihtelu. Koska polttomoottorilta tuleva vääntö ei ole tasaista, täytyy anturi mitoittaa hieman yli dynamometrin suurimman väännön. Esimerkiksi kuvassa 20 on vaa-dittu Watti 1:n dynamometrillä 1000 Nm:n vääntömomenttia, mutta se aaltoilee noin ± 200 Nm. Jos anturin suurin mitattava momentti olisi 1100 Nm, olisi tällöin mitattu keskiarvo paljon alle todellisen momentin.



KUVA 20. Mitattu momentti 1000 Nm:llä

Horiban SPARC-ohjainlaiteessa on mitatulle momentille taajuussyöttö. Tämä taajuus ei saa ylittää 500 kHz:n arvoa (20, s. 51.)

HBM:llä on antureita, joiden momentti on nolla joko 5, 60 tai 240 kHz:n taajuudella. Samassa järjestyksessä taajuuden vaihteluväli suurimman ja pienimmän momentin välillä on ± 5 , ± 30 ja ± 120 kHz. Esimerkiksi 60 kHz:n ja 3000 Nm:n anturilla 30 kHz olisi -3000 Nm, 60 kHz olisi 0 Nm ja 90 kHz olisi 3000 Nm. (21, s. 2–3.)

Kuvien 15 ja 18 ABB:n AC-moottoreiden vääntökäyrien perusteella valittiin molempiin testisoluihin HBM:n T40B-anturit, jotka kykenevät 3000 Nm:n momentinmittaukseen ja joissa on 60 kHz:n nol-lataajuus. Kardaaniin pulttijakoiksi valittiin 8x130. Perusteluina tähän valintaan oli, että Proventialla käytetään tätä samaa pulttijakoa TC2:ssa sekä Watti 1 -testausyksikössä. TC1:n nykyinen kardaani on eri jaolla, mutta sinne on tarkoitus tilata dynamometrien päivityksen yhteydessä uusi kardaani, jossa on 8x130 pulttijako. 60 kHz mittaustaajuuden valintaan perusteluina oli, että myös Watti 1:ssä ja 2:ssa on momentiantureilla käytössä sama taajuus ja vääntö. Tämän ansiosta voidaan anturirikon tapahtuessa tarvittaessa helposti lainata momentinmittauslaippaa toisesta dynamometristä ilman suurempia parametrien muutoksia ohjainlaitteisiin.

4.4.2 Pyörintänopeuden mittaaminen

ABB:n moottoreihin tilattiin lisävarusteena L&L RHI 593 -pulssianturi, jolla taajuusmuuttaja saa tiedon AC-moottorilta mitatusta todellisesta pyörintänopeudesta ja pystyy käyttämään tätä tietoa pyörintänopeuden korjaamisen. Tämä anturi tuottaa 1024 pulssia yhdelle moottorin kierrokselle (22).

SPARC:ssa on mitatulle pyörintänopeudelle taajuussyöttö, joka ei saa ylittää 500 kHz:n arvoa. Suurin taajuus saadaan laskettua pulsseista ja pyörintänopeudesta kaavalla 11. (20, s. 100.)

$$f = \frac{p \cdot n_{max}}{60} \quad (\text{KAAVA 11})$$

f = taajuus (Hz)

p = pulssien määrä yhdelle kierrokselle

n_{max} = suurin pyörintänopeus (*rpm*)

Kaavaa 11 ja TC1:n suurempaa 4000 rpm:n kierrosnopeutta käyttämällä saadaan vastaukseksi 1024 pulssilla 68,27 kHz.

Taajuusmuuttajalla on kierrosnopeudelle vain 0–20 mA:n analogilähtö, mutta nopeuden tieto saadaan haaroitettua suoraan pulssianturilta Horiban SPARC-ohjainlaitteelle. Toinen vaihtoehto nopeuden taajuuden signaalin saamiseen automaatiolle olisi ollut momentin mittaamiseen käytettävä laippa, johon olisi saanut lisähinnasta myös pyörimisnopeuden mittauksen.

4.4.3 Ohjauksen parametrien säätö

Tällä hetkellä Proventian sähköliittymän ulos lähtevä sähköteho voi olla enimmillään 1 MW (15). Jos kaikki dynamometrit ja akkujen testausyksikkö tuottaisivat niin paljon sähköä kuin komponenttien puolesta mahdollista, olisi tuotanto yli 1 MW. Vaikka tuotannon raja on epätodennäköistä saavuttaa käytännössä, koska myös talo kuluttaa jatkuvasti paljon sähköä ja kaikkien moottoreiden käyttäminen täydellä teholla samanaikaisesti on harvinaista, täytyy sähköliittymän sekä muuntajan ylikuormituksen mahdollisuuden pois sulkemiseksi dynamometrien tehoa pystyä rajoittamaan. Testausyksiköiden enimmäistehon summa täytyy rajoittaa niin, ettei se ole yhtä megawattia enempää.

Tehojen rajoittaminen onnistuu uusissa taajuusmuuttajissa sekä Watti 1:ssä ABB drive composer -ohjelmalla.

Uusilla AC-dynamometreilla ei tarvitse kytkeä testattavaan moottoriin starttimoottoria, koska AC-dynamometrillä on mahdollista käynnistää polttomoottori pyörittämällä sitä. Tällöin moottorin käynnistäminen on myös luotettavampaa kuin 12 V:n starttimoottorilla. SPARC-ohjainlaitteella on mahdollista simuloida starttimoottoria. Tähän täytyy tietää tyhjäkäyntinopeus sekä vääntö, joka riittää moottorin pyörittämiseen. Lisäksi ohjainlaitteeseen täytyy asettaa aika, jonka verran dynamometri enintään pyrkii pyörittämään moottoria käyntiin. (20, s. 91.)

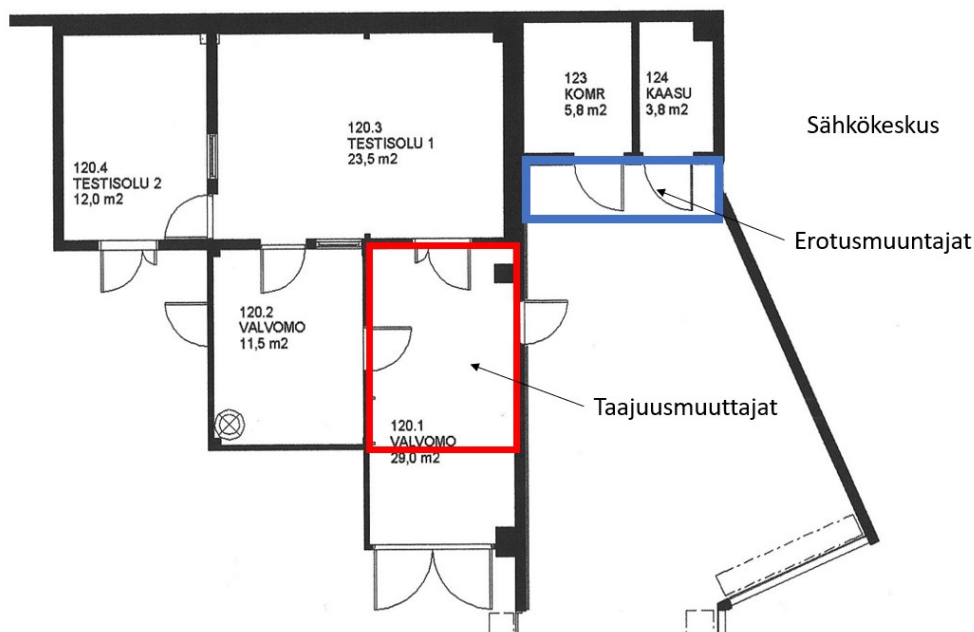
SPARC-ohjainlaitteeseen täytyy asettaa myös esimerkiksi moottorin tyhjäkäyntinopeus sekä enimmäiskierrosnopeus. Näillä arvoilla rajataan kierrosnopeudet polttomoottorin suunnitelluille käyttöalueille. (20, s. 167.)

5 TILANKÄYTTÖ TESTISOLUJEN ULKOPUOLELLA

Taajuusmuuttajat ja erotusmuuntajat päätettiin sijoittaa testisolujen ulkopuolelle, koska ne vievät paljon tilaa ja tuottaisivat lämpöä testisoluun. Näiden sijoittelussa on kuitenkin tärkeää, että ne ovat matkan varrella dynamometriltä talon sähkökeskukseen, jotta voidaan säästää sähkökaapelin pituudessa ja täten myös hinnassa.

5.1 Taajuusmuuttajien sijoittelu

Taajuusmuuttajat tuottavat lämpöä ja noin 75 dB ääntä, joka voi häiritä työskentelyä. Niitä ei saa myöskään sijoittaa ulkotiloihin, joten ne päätettiin sijoittaa kuvassa 21 punaisella neliöllä merkattuun huoneeseen, johon on tarkoitus rakennuttaa terästaso. Tämä tila toimii varastotilana, jossa on jo valmiiksi mittauskalustoa, joka tuottaa melua ja lämpöä.



KUVA 21. Taajuusmuuttajien, erotusmuuntajien ja sähkökeskuksen sijoittelu

Tasolle kriteereinä oli, että se kestää taajuusmuuttajien sekä tarvittaessa väliaikaisesti tasolla siirrettävien tavaroiden ja ihmisen painon. Taajuusmuuttajille täytyy saada aidattu alue, johon ulkopuoliset eivät pääse ilman avaimia. Lisäksi tasolle täytyy jäädä tila, josta voidaan nostaa

taajuusmuuttajat paikalleen ja tarvittaessa tason kautta täytyy myös pystyä nostamaan muita raskaita esineitä yläkertaan.

Tason suunnittelijaksi ja valmistajaksi valittiin R-taso Oy. Tason asennus jää kuitenkin Proventian vastuulle. R-tasolta saadaan myös 3D-mallinus tilasta, jonka avulla on helppo suunnitella, miten taajuusmuuttajat saisi parhaiten aseteltua paikalleen. 3D-mallia voidaan myös käyttää kuvan 12 testisolujen mallin kanssa yhdessä apuna taajuusmuuttajien ja jarrujen välisen sähkökaapelin pituuden mitoittamisessa.

Taajuusmuuttajille valittiin lähtökaapeleiden lähtö alta ja tulokaapeleiden lähtö päältä. AC-moottoreille lähtevä kaapeli voidaan viedä tason läpi ja tästä testisolujen kattoa pitkin AC-moottoreille. Tulokaapelit viedään kaappien päältä seinää pitkin ulos lastauslaiturille.

5.2 Erotusmuuntajien sijoittelu

Tämänhetkisten tietojen mukaan talon sähkökeskus, johon dynamometrit olisi tarkoitus kytkeä, tulee sijaitsemaan rakennuksen nurkalla. Tällöin nähtiin järkevimmäksi sijoittaa erotusmuuttajat lastauslaiturin päätyyn, jossa ne ovat katoksessa suojassa ja kaapelin pituus saadaan pidettyä mahdollisimman lyhyenä niiden ollessa suoraan sähkökeskuksen ja taajuusmuuttajien välissä. (Kuva 21.)

Erotusmuuttajille voidaan rakentaa taso, jossa ne olisivat lastauslaiturin päässä sijaitsevien kompressor- ja kaasuhuoneiden ovien yläpuolella. Tason mahdollinen paikka on merkattu kuvaan 21 sinisellä neliöllä. Koska erotusmuuttajien tarjouskysely ja sähkökeskuksen sijainnin määrittely on vielä kesken, ei ole tasollekaan vielä kysely tarjousta. Tason suunnittelua ja valmistusta voidaan kuitenkin kysyä esimerkiksi R-tasolta, kun sen vaatimuksista tiedetään enemmän.

6 MOOTTORITESTISOLUJEN JÄÄHDYTYKSEN SUUNNITTELU

Nykyisten TC1- ja TC2-testisolujen ilmanvaihdon ongelmana on

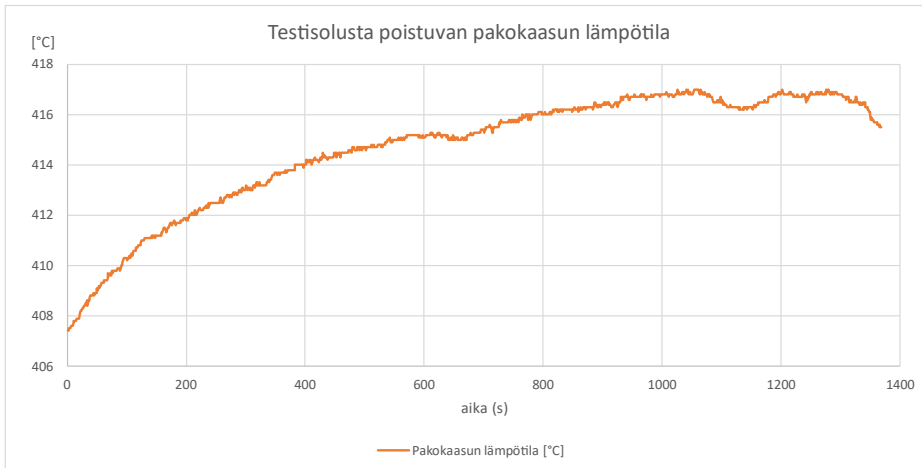
- jäähdytyksen riittämättömyys helteillä
- alipaine
- suodattimien puute soluun tulevalle ilmalle, minkä vuoksi testisoluun pääsee ulkoa siitepölyä ja lehtiä.

Lisäksi pyörrevirtajarrujen tilalle tulevat AC-jarrut tuottavat enemmän lämpöenergiaa. AC-dynamometriiden vaatimien taajuusmuuttajien tuottamaa lämpöä ei tarvitse testisolun jäähdytyksessä ottaa huomioon, koska ne sijoitetaan testisolujen ulkopuolelle rajallisen tilan vuoksi.

6.1 Testisoluihin jäävän lämpöenergian laskeminen

Tarvittavaa jäähdytystehoa lähdettiin laskemaan keräämällä mittausdataa moottorin energiavirroista Watti 2 -testausyksikössä. Datan kerääminen pystyttiin suorittamaan päällekkäin toisen testiajan kanssa, jossa täytyi ajaa moottoria suurilla tehoilla. Lisäksi tämä oli suuritehoisin moottori, joka oli työn suoritushetkellä testauksessa. Myös mittausdatan keräämisen kannalta Watti 2 oli optimaalisin tarvittavan tiedon keräämiseen, koska siellä voidaan mitata tarkasti testisoluun tulevan ja lähtevän moottorin jäähdytinnesteen ja pakokaasun lämpötilaa testisolun seinien läpiviennin kohdalta. Näiden antureiden sijoittelun ansiosta laskuissa voidaan myös ottaa huomioon putkista säteilevä lämpöenergia.

Testissä moottoria rasitettiin niin, että se tuotti 280 kW akselitehon. Tämän jälkeen moottorin annettiin käydä tässä testauspisteessä niin kauan, että jäähdytinnesteen, öljyn ja pakokaasun lämpötilat olivat stabiloituneet. Mittausdatan kerääminen suoritettiin 1 Hz:n taajuudella. Kuvassa 22 on havainnollistettu pakokaasun lämpötilan stabiloituminen suoritetussa testissä.



KUVA 22. Pakokaasun lämpötilä mittauksen aikana

Kuvasta 22 voidaan huomata, että 900-1300 sekunnin kohdalla lämpötilä vaihtelee enää vain $\pm 0,5$ °C:ta, joten lämpöjä voidaan tässä kohdin pitää stabiileina. Mittausdatasta leikattiin tämä kyseinen kohta ja siitä kerättiin laskuissa tarvittavien arvojen keskiarvot (taulukko 2).

TAULUKKO 2. Mittaustulokset 280 kW:n teholla

Mittaustulokset 280 kW:n teholla	
polttoaineen massavirta	59,87 [kg/h]
imuilman massavirta	0,34 [kg/s]
pakokaasun lämpötilä	416,56 [°C]
imuilman lämpötilä	24,69 [°C]
moottorin jäähdytinnesteen tilavuusvirta	8,61 [l/s]
moottorilta poistuvan jäähdytinnesteen lämpötilä	96,78 [°C]
moottorille menevän jäähdytinnesteen lämpötilä	90,78 [°C]
akseliteho	280,82 [kW]
ilman lämpötilä välijäähdyttimen jälkeen	53,19 [°C]
ilman lämpötilä ennen välijäähdytintä	200,36 [°C]

6.1.1 Polttoaineen energia

Polttoaineen massavirtaa saatiin mitattua tarkasti laboratoriossa sijaitsevalla virtausanturilla. Toinen vaihtoehto mittaukseen olisi ollut moottorinohjausyksikön teoreettinen polttoaineen massa- virta, jonka se laskee polttoainesuuttimien aukioloajan perusteella.

Proventialla käytetään kesälaatuista EN590 -standardin mukaista dieseliä, jonka alempi lämpöarvo on litraa kohden 35,7 MJ/l ja tiheys 835 kg/m³ (23, s. 5). Näillä tiedoilla voidaan laskea polttoaineelle käytettäväksi lämpöarvoksi 11,876 kWh/kg. Liitteessä 9/1 on laskettu kaavalla 3 polttoaineen energiaksi 711,1 kW.

6.1.2 Pakokaasun entalpia

Lämpötila-anturi oli sijoitettu pakoputkeen seinän läpiviennin kohdalle. Tällöin saadaan huomioitua myös pakoputkesta testisolun säteilevä lämpöenergia. Ilmanmassavirran mittaukseen käytettiin AVL:n valmistamaa ilmanmassavirta-anturia, joka on erityisesti suunniteltu moottoridynamometri-käyttöön.

Laskussa käytettiin ilman ominaislämpökapasiteettia 1,01 kJ/kgK (6, s.113). Pakokaasun entalpia laskettiin käyttämällä kaavaa 4, jolloin vastaukseksi liitteessä 9/1 saatiin 245,3 kW.

6.1.3 Imuilman entalpia

Imuilman lämpötilaa mitattiin turbon ja ilmansuodattimen välisestä putkesta. Liitteessä 9/1 kaavaa 6 käyttämällä laskettiin imuilman entalpiaksi 100,9 kW.

6.1.4 Moottorista jäähdytinnesteeseen siirtyvä energia

Moottorin jäähdytinnesteen lämpötilat mitattiin putken läpiviennin vierestä. Jäähdytysputkista säteilevä lämpö saatiin myös huomioitua laskuissa samoin kuin pakoputken entalpien laskuissa.

Poistuvalla jäähdytinnesteelle oli myös käytössä virtausanturi, joka ilmoitti virtauksen cm/s muodossa. Tämän takia täytyi liitteessä 9/2 myös laskea putken pinta-alan ja jäähdytinnesteen tiheyden avulla virtaus muotoon kg/s. Liitteessä 9/2 kaavaa 7 käyttämällä saatiin vastaukseksi 59,9 kW, joka on vain 8,4 % polttoaineen energiasta. Aikaisemmin mainitun 30–30–30–10-säännön mukaan siirtyvän energian tulisi olla noin 30 % polttoaineen energiasta.

Aiempien testien datan ja moottorin valmistajan mukaan jäähdytinnesteen massavirran tulisi olla noin 8,95 kg/s. Virtausanturin perusteella olisi jäähdytinnesteen massavirta ollut vain 2,9 kg/s.

Mitatun arvon heittäessä näin paljon ilmoitetusta massavirrasta tultiin tulokseen, että anturi on virallinen.

Kun jäähdytinnesteeseen siirtyvä energia laskettiin uudelleen liitteessä 9/2 käyttämällä 8,95 kg/s massavirtaa, saatiin tulokseksi 181,6 kW. Tämä arvo on 25,5 % moottorille saapuvasta polttoaineen energiasta ja täten paljon realistisempi luku.

6.1.5 Välijäähdyttimestä jäähdytinnesteeseen siirtyvä energia

Osa polttoaineen energiasta siirtyi myös nestekiertoisen välijäähdyttimen kautta jäähdytinnesteeseen. Testisolussa tämä nestepiiri on erillään moottorin jäähdytinnesteenpiiristä ja molemmilla on ulkona omat jäähdyttimet.

Myös välijäähdyttimellä tapahtuva energiansiirros voidaan laskea pakokaasun entalpien laskussa käytettyä kaavaa 4 vastaavalla tavalla. Lämpöantureilla mitattiin välijäähdyttimeltä turbolle ja imu-sarjaan kulkevan ilman lämpötilaa. Laskussa olisi voinut myös käyttää välijäähdyttimen nesteen lämpötiloja, mutta tällöin olisi myös täytynyt tietää jäähdytinnesteen massavirta, jolle ei testisolussa ollut mittaushetkellä mahdollisuutta. Ilman massavirtana voidaan käyttää imuilman massavirtaa.

Välijäähdyttimessä siirtyvä energia on laskettu liitteessä 9/3, jossa arvoksi saatiin 49,9 kW. Tässä laskussa ei huomioitu jäähdytinnesteputkista säteilevää lämpöenergiaa. Prosentuaalisesti sen voidaan olettaa olevan pieni määrä testisolun jäävään kokonaisenergiaan verrattuna. Jäähdytinnesteen lämpötilaero testisolun lämpötilaan on myös pieni, joten lämpöä ei pääse siirtymään suurella teholla.

6.1.6 Moottorista testisolun säteilevä ja johtuva lämpöenergia

Kun on selvitetty kaikki muut testisolusta pois virtaavien energioiden arvot, voidaan laskea testisolun säteileväksi ja johtuvaksi lämpöenergiaksi jäävä osuus polttoaineen energiasta kaavalla 8. Liitteessä 9/3 saatiin tämän arvoksi 280 kW:n akseliteholla 54,4 kW.

Tulosta voidaan pitää luotettavana, koska asiaa käsittelevässä kirjassa oli laskettu 250 kW:n turboahdetun dieselmoottorille säteilevän ja johtuvan lämpöenergian määräksi 40 kW (ks. 6, s. 540).

Teoksessa tutkitussa moottorissa oli öljynjäähdytin, jonne siirtyi 15 kW:n energiavirta. Watti 2:n testimoottorissa ei tätä kuitenkaan ollut, jolloin öljyn lämpöenergia jää myös testisoluun. Tämän takia kirjan vertailumoottorin johtuvaan ja säteilevään lämpöenergiaan voidaan lisätä öljynjäähdytimelle siirtyvä energian määrä, jolloin saadaan vertailukelpoinen tulos 55 kW.

Vertailukohteen lähteenä käytetty kirja on julkaistu vuonna 2012, mutta ensimmäinen painos on vuodelta 1995. Ei ole tarkkaa tietoa kirjan laskuissa käytetyn moottorin mallista, mutta se on vähintään 11 vuotta vanha. Polttomoottoritekniikan ja hyötysuhteen parantumisen vuoksi voidaan laske-
ttaa 54,4 kW:n lämpöenergiaa pitää luotettavana, vaikka testipisteen akseliteho oli hieman suurempi.

6.1.7 Muut lämmönlähteet testisolussa

AC-moottorin hyötysuhde on noin 0,95. Kun moottorin akselitehosta jää testisoluun 5 %, saadaan AC-moottorista säteilevän ja johtuvan energian määräksi laskettua liitteessä 9/3 14 kW.

Valaistuksena testisoluissa toimivat led loisteputket, joista säteilee erittäin vähän lämpöenergiaa. Muita mahdollisia lämmönlähteitä ovat esimerkiksi pakokaasuanalysointoreiden linjat ja suodattimet. Todettiin, että näiden säteilemä energiamäärä on kuitenkin niin pientä, etteivät ne ole merkittävissä laskujen kannalta.

6.2 Testisolujen jäähdytyksen tarpeen laskeminen

280 kW:n akseliteholla saatiin laskettua testisoluun säteileväksi ja johtuvaksi lämpöenergian määräksi 68,4 kW. Jos jäähdytys toteutetaan ilmanvaihdolla, olisi tarvittava vaihtuvan ilman määrä tällöin liitteessä 9/3 kaavalla 10 laskettuna 5,7 m³/s. Laskussa käytettiin 10 °C:n lämpötilaeroa, joka on järkevä pohja suunnittelulle (6, s. 118).

Tällä hetkellä TC1- ja TC2-testisoluissa on käytössä huippuimurit, jotka kykenevät 2,0 m³/s virtaukseen (taulukko 3). Tämä virtaus riittää liitteessä 9/4 laskettuna vain 23,8 kW:n lämpötehon jäähdyttämiseen.

TAULUKKO 3. Testisolujen huippuimureiden virtausnopeudet (24)

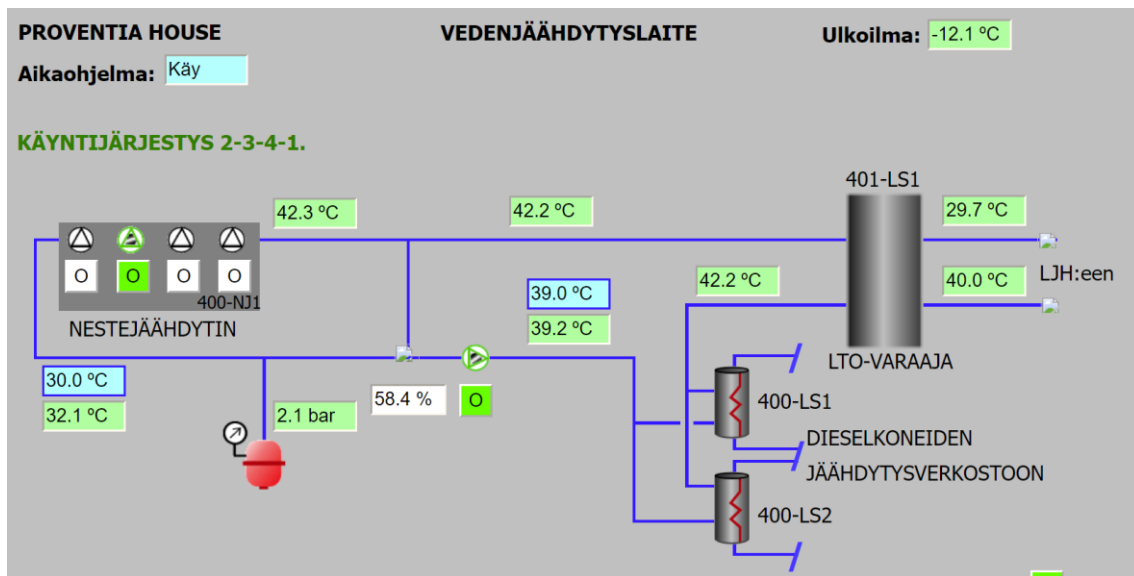
N/O	TUNNUS	KOJE	UR	SIJAINTI	VAIKUTUSALUE	kg/h	
						l/s	Pa
						m ³ /s	Pa
102							
103							
104					TESTITILAT		
105							
106	306-PF01	HUIPPUIMURI	IU	VESIKATTO	TESTITILA / TUULETUS	2000	200Pa
107	306-SC01	TAAJUUSMUUTTAJA	IU	VESIKATTO	306-PF01 / PYÖR.N.S.		
108	306-FZ01	SULKUPELTI	IU	TESTITILA 2 KRS.	RAITISILMA/SULKU	2000	10Pa
109	306-FZ31	SULKUPELTI	IU	TESTITILA 2 KRS.	POISTOILMA/SULKU	2000	10Pa
110							
111							
112	307-PF01	HUIPPUIMURI	IU	VESIKATTO	TESTITILA / TUULETUS	2000	200Pa
113	307-SC01	TAAJUUSMUUTTAJA	IU	VESIKATTO	307-PF01 / PYÖR.N.S.		
114	307-FZ01	SULKUPELTI	IU	TESTITILA 2 KRS.	RAITISILMA/SULKU	2000	10Pa
115	307-FZ31	SULKUPELTI	IU	TESTITILA 2 KRS.	POISTOILMA/SULKU	2000	10Pa

Nykyinen testitilojen ilmanvaihto on toteutettu niin, että vain poistoilmalle on huippuimuri, joka toimii joko puolella tai täydellä teholla. Koska huoneeseen tuleva ilma tulee vapaavirtauksella, syntyy testisoluun merkittävä alipaine.

Moottorin ajaminen korkealla teholla on kuitenkin vähäisempää ja lyhytaikaista. Nykyisilläkin huippuimureilla lämpötilat ovat pysyneet riittävän hyvin asetetuissa rajoissa suuren osan vuodesta ja esimerkiksi TC2:ssa tyypillinen testattava moottori on pienempi kuin 300 kW. Tämän vuoksi päätettiin, että TC1:een riittää 60 kW:n ja TC2:een 40 kW:n jäähdysteho. Liitteessä 9/4 laskettiin näillä tehoilla riittäväksi ilmavirran määräksi TC1:ssä 5,0 m³/s ja TC2:ssa 3,4 m³/s.

6.3 Lämmöntalteenotto moottorin jäähdytinnesteestä

TC1- ja TC2-moottoritestisolujen pyörrevirtadynamometrit vaativat toimiakseen jäähdytynestettä, jonka lämpötila on alle 40 °C. Proventialla molempien testisolujen moottorien ja pyörrevirtajarrujen jäähdytys tapahtuu samalla jäähdytyspiirillä. Jäähdytyksessä käytettävä lämmennyt neste ohjataan lämmöntalteenottovaraajaan, jossa on lämmönvaihdin. Lämmönvaihtimella kiertävä vesi ohjataan talon lämmönjakeluhuoneeseen. Tällä tapaa saadaan vähennettyä ostettavan kaukolämmön määrää ja hyödynnettyä testisoluissa tuotettua energiaa. Koska testisolujen jäähdytinneste ei jäähdy tarpeeksi LTO-varaajassa, täytyy sitä myös jäähdyttää katolla olevalla jäähdytinkoneella, jossa on kahdeksan 3,2 kW:n puhallinta. Automaatio käynnistää näitä puhallimia kaksi kerrallaan jäähdytyksen tarpeen mukaisesti. Kuvassa 23 on kuvankaappaus lämmöntalteenoton ohjauksesta, josta näkee piirin toimintaa.



KUVA 23. TC1- ja TC2-moottoritestisolujen LTO- ja jäähdytyspiiri

Lämmöntalteenoton hyötysuhdetta on vaikea laskea, koska nesteiden virtausnopeuksia ei pystytä mittaamaan helposti. Myöskään LTO:n komponenteista ei löytynyt minkäänlaista tarkempaa teknistä esitettä.

Koska uudet AC-dynamometrit olisivat ilmajäähdytteisiä, voisi LTO-piirin lämpötilaa nostaa lähelle 80 °C:ta. LTO-piirin nesteellä jäähdytettäisiin uusilla dynamometreillä pelkästään moottorin jäähdytinnestettä lämmönvaihtimien kautta. Tällöin jäähdytyskoneen puhaltimien käytön tarve vähenisi huomattavasti ja LTO-varaajassa kiertävän testisolun ja talon lämmitysveden lämpötilaero olisi paljon suurempi, jolloin saataisiin myös siirrettyä enemmän energiaa talon lämmittämiseen.

6.4 Testisolujen jäähdytyksen ratkaisuehdotukset

Testisolujen jäähdytyksen ratkaisu ei ole vielä täysin selvillä. Tarjouksia ongelmaan kyseltiin alan yrityksiltä, mutta ne olivat hyvin kalliita ja rakennustöiden puolesta aikaa vieviä. Tultiin tulokseen, että jäähdytystä olisi järkevintä suunnitella aluksi itse, ja siihen keksittiin jo alustavia vaihtoehtoja.

Päätettiin, että jäähdytys on tarkoitus toteuttaa luvun 3.3.1 mukaisesti. Ilmanvaihdon tehoa säädeltäisiin tällöin testisolujen paineen ja lämpötilan perusteella. Ilmanvaihdon ohjaus on tällä hetkellä toteutettu talon Fidelix-automaatiolla. Puhaltimet olisi tarkoitus siirtää testisolujen STARS-automaation kautta ohjattavaksi.

Testisolujen jäähdytinnesteputkien sekä pakoputkien osat, jotka ovat kiinteästi asennettuja testisoluihin, eristetään säteilevän lämpöenergian vähentämiseksi. Proventialla suunnitellaan ja valmistetaan myös lämpöeristeitä, joten on järkevintä käyttää yrityksen omia tuotteita ja ammattitaitoa tähän.

6.4.1 Jäähdytyksen 1. vaihtoehto

ABB:ltä kysyttiin AC-moottorin jäähdytysilman virtausta ja lupaa asentaa jarrun poistoilma-aukkoihin putket, joilla moottorilta poistuva lämmin ilma voidaan ohjata pois testisolusta. ABB:ltä vastattiin, että ilmavirta on 0,625 m³/s ja putket voi laittaa, kunhan ne eivät tuota paljoa vastapainetta (25).

Tällä tapaa olisi mahdollista päästä lämpötilan puolesta takaisin nykytilanteeseen, koska dynamometrin tuottama lämpöenergia saataisiin ohjattua pois testisolusta. Dynamometrin poistoputkeen olisi myös mahdollista laittaa automaatiolla säädettävä pelti, jolla voitaisiin tarvittaessa ohjata dynamometriltä tuleva lämmin ilma takaisin huoneeseen, kun testisolun ilma on liian viileää.

Alipaine kasvaa tällä ratkaisulla hieman lisää, joten tarvittaisiin lisäksi suurempi tuloilmanputki tai puhallin putkeen, jolla ilmaa pakotetaan testisoluun. Tällä ratkaisulla olisi puhaltimien testisolusta poistama ilmavirta 2,625 m³/s. Kun tähän lisätään vielä moottorin imemä ilmamäärä enimmillään 0,33 m³/s, saadaan testisolusta poistuvan ilmavirran arvoksi yhteensä 2,96 m³/s. Tuloilmalle pitäisi silloin riittää 3,0 m³/s ilmavirran saavuttava puhallin.

6.4.2 Jäähdytyksen 2. vaihtoehto

Dynamometriltä ohjattaisiin myös toisessa vaihtoehdossa 1. vaihtoehdon mukaisesti lämmin ilma ulos testisolusta. TC1:n tuloilmaputkeen voitaisiin siirtää TC2:n huippuimuri, jolloin testisolussa olisi kaksi poistoilmaputkea huoneen nurkassa (kuva 24). Tällöin testisolusta poistuva ilmavirta olisi yhteensä 4,96 m³/s.



KUVA 24. TC1:n nykyiset tulo- ja poistoilmapiput

Testisolun vastakkaiseen nurkkaan voidaan rakentaa uusi tuloilmapiputki ja siihen asentaa kanavapuhallin, jolla saavutettaisiin noin 5,0 m³/s ilmavirta. Tällä tapaa ilmavirta kulkisi paremmin testisolun läpi ja tasoittaisi huoneen lämpötilaa tehokkaammin kuin nykyinen ratkaisu.

TC2:een asennettaisiin vanhan huippuimurin tilalle noin 3 m³/s ilmavirtaan kykenevä huippuimuri, jolloin testisolusta poistuva ilmavirta olisi noin 3,96 m³/s. Tuloilmapiputkeen täytyisi tällöin asentaa noin 4,0 m³/s ilmavirran saavuttava kanavapuhallin.

6.5 TC1:n polttoaineen jäähdytys

TC1:ssä polttoaineen jäähdytys toimii tällä hetkellä vesijohtovedellä. Polttoaine ja vesi kulkevat lämmönvaihtimen kautta, josta vesi ohjataan suoraan viemäriin (kuva 25). Kuluvan veden määrästä ei ole tarkkaa tietoa, koska sillä ei ole minkäänlaista virtausanturia.



KUVA 25. TC1:n polttoaineen jäähdytyksen lämmönvaihdin

Proventialla on muissa moottoritestisoluissa tällä hetkellä käytössä polttoaineen jäähdytys ja mittausyksiköt (kuva 26). Yksiköt käyttävät jäähdytykseen välijäähdyttimen piirissä kulkevaa jäähdytinnestettä. Nämä yksiköt on havaittu Proventialla toimivaksi ja tarkaksi ratkaisuksi, joten myös TC1:een päätettiin asentaa vastaava, jotta hanaveden käytöstä päästään eroon.



KUVA 26. TC2:n polttoaineen jäähdytys ja mittausyksikkö

7 MOOTTORITESTISOLUJEN ENERGIATEHOKKUUDEN LASKENTA

Helpoin tapa lähteä laskemaan vuodessa sähköksi saatavaa energiaa on selvittää molemmille testisoluille testattavien moottoreiden keskimääräinen ominaiskulutus eli bsfc. Lyhenne bsfc tulee sanoista brake specific fuel consumption. Bsfc kertoo, kuinka paljon polttoainetta kuluu moottorin akselilta mitattuna yhden kilowattitunnin tuottamiseen (26). Proventialla pidetään tarkkaa seuranta, kuinka monta litraa polttoainetta on kulunut jokaista testisolua kohden. Ominaiskulutus lasketaan kaavalla 12 (8, s. 51–52).

$$bsfc = \frac{\dot{m}_f}{P} \quad (\text{KAAVA 12})$$

$bsfc$ = moottorin ominaiskulutus (g/kWh)

\dot{m}_f = polttoaineen massavirta (g/h)

P = moottorin akseliteho (kW)

Lisäksi täytyy myös arvioida, kuinka paljon energiaa saadaan talteen moottorin jäähdytinnesteestä. Tämän kautta saadaan selvitettyä lämmöntalteenottovaraajalla kerättävä energia talon lämmittämiseen.

Kun tiedetään hyödyksi saatavan energian määrä, voidaan laskea vähennettävien hiilidioksidipäästöjen määrä. Hiilidioksidipäästöjen laskemisessa täytyy huomioida kaukolämmön ja sähkön päästökertoimet.

Laskuille tehtiin Excelissä laskupohja. Tämän avulla laskettiin tuloksia erilaisissa tilanteissa. Esimerkiksi talolle ja myyntiin menevän sähkön prosenttimääriä, laitteiden hyötysuhteita, mittausdataa tai päästökertoimia pystyi muuttamaan nopeasti. Tulokset laskettiin myös eri skenaarioissa, joita ovat nykytilanne, TC1 AC-dynamometrillä ja TC2 pyörrevirtadynamometrillä, TC2 AC-dynamometrillä ja TC1 pyörrevirtadynamometrillä sekä molemmat TC1 ja TC2 AC-dynamometreillä. Kuva Excel-pohjasta ja lasketut tulokset ovat liitteessä 10.

7.1 Testisolujen tuottaman sähkön laskenta

Laskuissa käytettiin pakokaasunpuhdistusjärjestelmien testauksessa tuotettua mittausdataa. Testit, joita laskuissa oli käytetty, ovat hyvin yleisiä ja näistä koostuu suurin osa testisolujen työajasta. Moottorit, jotka olivat testien aikana käytössä, ovat myös tehoiltaan lähellä keskiarvoa, joka testisoluuissa on yleensä käytössä. Testisolu- ja testikohtaiset tulokset ovat liitteissä 11 ja 12.

Akselitehon keskiarvo testeissä saatiin mittausdatasta, mutta polttoaineen massavirtaa ei löytynyt kaikista tiedostoista. Mittausdatasta löytyi kuitenkin polttoaineen ruiskutusmäärä milligrammoissa työtahtia kohden. Nelitahtisella polttomoottorilla kuluu kaksi kampiakselin kierosta yhden sylinterin työtahtin suorittamiseen. Esimerkiksi nelisynterisellä moottorilla tapahtuu kaksi ruiskutusta kierosta kohden. Tästä voidaan johtaa kaava 13.

$$\dot{m}_f = \frac{I_q * x * rpm * 60}{1 * 10^6} \quad (\text{KAAVA 13})$$

\dot{m}_f = polttoaineen massavirta (kg/h)

I_q = ruiskutettavan polttoaineen määrä (mg)

x = työtahtien määrä kierrosta kohden

rpm = moottorin kierrosnopeus

Kun eri testien keskimääräinen akseliteho ja polttoaineen kulutus tiedettiin, saatiin siitä laskettua moottorin ominaiskulutus kaavan 12 avulla. Lopuksi käytettiin testeihin kulunutta tuntimäärää painoarvona ja laskettiin koko järjestelmän testauksen ominaiskulutuksen keskiarvo. Jotta voidaan laskea, kuinka paljon polttoainetta kuluu sähkön tuottamiseen, tulos täytyy vielä jakaa AC-moottorin ja taajuusmuuttajan hyötysuhteella.

Kun tiedettiin yhden kWh:n tuottamiseen kuluva polttoainemäärä grammoissa, selvitettiin vuonna 2023 testisoluuissa kulunut polttoaineen määrä. Koska polttoainelukemat on ilmoitettu litroissa, täytyi litramäärä kertoa kevyen polttoöljyn tiheydellä, jolloin vastaukseksi saatiin vuonna 2023 kulunut polttoaineen massa. Proventian käyttämän polttoaineen tiheys on tyypillisesti 0,835 kg/l (23, s.5). Näillä tiedoilla saatiin laskettua arvio, kuinka paljon testisolut tuottavat sähköä vuodessa.

Laskuissa arvioitiin nykyisen Watti 1:n ja 2:n sähköntuotannon perusteella, että 80 % sähköstä saadaan talon käyttöön ja 20 % myydään. Kaikkea sähköä ei voi saada talolle, koska tähän tarvittaisiin esimerkiksi akusto, johon testeistä tuotettu sähkö voitaisiin väliaikaisesti varastoida. Sähkön osto tapahtuu Proventialla kiinteällä hinnalla, jotenka talon sähkön ostosta säästettävät eurot laskettiin sähkön kWh-hinnalla, johon lisättiin sähkön siirtohintaa.

Myytävän sähköhinnan arviointi oli haastavampaa, koska myyntihinta määräytyy pörssisähkön spot-hinnan perusteella. Koska Watti 2 -testausyksikön testit ja käyttöajankohdat ovat hyvin lähellä TC1- ja TC2-testisolujen käyttöä, pyydettiin sähköyhtiöltä vuoden 2023 tuntikohtaista tuotantoa Watti 2:n sähköliittymästä. 2023 vuoden tuotannon Excel-tiedosto muutettiin CSV-tiedostoksi, joka ladattiin netistä liukuri.fi-sivustolta löytyvään laskuriin. Laskurilla saatiin tulos, josta näki tuotannon keskipot-hinnan valitulle ajalle. Tästä keskihinnasta vähennettiin 10 % ja sähkönmyynnin siirtohintaa, jolloin saatiin sähkönmyynnin kWh-hinta.

7.2 Jäähdytinnesteen lämmöntalteenoton keräämän energian laskenta

Aikaisempien energiavirtausten laskujen perusteella voidaan olettaa, että moottorin jäähdytinnesteseen siirtyy noin 65 % energiaa moottorin akselitehoon verrattuna. Pyörrevirtadynamometreillä noin 95 % moottorin akselitehosta siirtyy dynamometrin jäähdytinnesteseen. Nykytilanteessa pyörrevirtajarruista lämmöntalteenottoon siirtyvä energia saatiin laskettua aikaisemmissa sähkön-tuotannon laskuissa käytetyn vuotuisen kWh-tuotannon mukaan.

LTO:n hyötysuhdetta on vaikea arvioida, mutta oletettiin, että lähtötilanteessa hyötysuhde on 0,2. Koska TC2:n pyörrevirtajarru vaatii viileämpää jäähdytinnestettä kuin TC1:n pyörrevirtajarru, voitaisiin piirin lämpötilaa nostaa hieman, jos pelkästään TC2:n dynamometri päivitetäisiin. Tässä tilanteessa LTO:n hyötysuhteeksi arvioitiin 0,4. Kun molemmat dynamometrit päivitetään, voidaan olettaa hyötysuhteen olevan 0,65 luvun 6.3 perusteilla. Jos jäähdytinnesteestä saataisiin kaikki energia talteen lämmityskauden aikana, joka kestää noin kahdeksan kuukautta, voisi LTO:n hyötysuhde olla enintään 0,67. Tämä arvo saadaan jakamalla lämmityskauden kahdeksan kuukautta yhden vuoden 12 kuukaudella. Lämmityskauden ulkopuolella hyötysuhteen voidaan olettaa olevan nolla, koska tällöin lämpöä ei saada käytettyä kiinteistön lämmitykseen, jolloin se on pakko jäähdyttää ulkoilmaan.

Kun LTO-piiriin menevä energia kerrottiin arvioidulla hyötysuhteella, saatiin laskettua hyödyksi saatava lämmitysenergia. Tämä energian määrä kerrottiin kaukolämmön kWh-hinnalla, josta saatiin arvioitua vuotuinen säästö eri tilanteissa lämmöntalteenoton kannalta.

7.3 Hiilidioksidipäästöjen laskenta

Hiilidioksidipäästöjen laskentaan täytyi tietää kaukolämmön ja sähkön päästökertoimet. Koska ostettavan energian määrä vähenee, voitiin päästöjen vähenemä eri skenaarioissa laskea kertomalla talolle säästyvä kWh-määrä päästökertoimella. Proventialla kaukolämmön CO₂-päästökerroin vuonna 2023 oli 91,3 g/kWh (27). Sähköntuotannon keskimääräinen CO₂-päästökerroin vuonna 2022 oli 471,27 g/kWh (28).

Tuloksien perusteella talon sähkön ja kaukolämmön ostosta syntyvät hiilidioksidipäästöt vähenevät 31 %. Eniten hiilidioksidipäästöihin vaikuttaa sähkönoston väheneminen, koska sähkön päästökerroin oli huomattavasti korkeampi kuin kaukolämmön päästökerroin ja moottorilta saatavasta energiasta suurin osa muutetaan sähköksi.

GHG-protokolla on maailmanlaajuinen standardi, jonka avulla raportoidaan päästöjä. GHG-protokollassa on päästöt luokiteltu kolmeen päästöluokkaan eli scopeen. Scope 1:een kuuluvat yrityksen tuottamat suorat päästöt. Scope 2 sisältää epäsuoria päästöjä, jotka liittyvät ostettuun energiaan, esimerkiksi sähkö tai lämpö. Scope 3:een kuuluvat kaikki muut epäsuorat päästöt, jotka syntyvät yrityksen toiminnasta, esimerkiksi ostettujen tuotteiden tai kuljetusten päästövaikutukset. (29)

Suurin osa Proventian päästöistä kuuluu scope 1:een, koska pakojärjestelmien testaamiseen kuluu paljon polttoainetta (30). Tämän takia scope 1:n päästöjä on vaikea vähentää. Testisolujen päivityksellä saadaan kuitenkin vähennettyä huomattavasti scope 2:n päästöjä, jotka syntyvät ostetusta energiasta.

8 TOTEUTUKSEN AIKATAULU

Vuonna 2024 tullaan ensin päivittämään vain toinen testisolusta, jolloin toinen moottoritestisolu pysyisi käytössä ja tarvittavat päästöjärjestelmien testit pystyttäisiin suorittamaan. Toisen testisolun taajuusmuuttajat, erotusmuuntaja ja AC-moottori olisi tarkoitus tilata ja asentaa vuonna 2025. Muutokset toteutettaisiin kuitenkin niin, että kaikki tarvittavat muut asennukset, esimerkiksi kaapeleiden vienti sähkökeskukseen ja tasojen rakennukset, jotka eivät aiheuta käyttökatoa testisolujen käytössä, toteutettaisiin vuonna 2024. Liitteessä 13 on listattu osien sekä töiden tarjouksien ja arvioiden perusteella hinnat, joista on laskettu vuosikohtaiset kustannukset eri skenaarioissa.

Koska TC2:n pyörrevirtadynamometrissä on ollut ongelmia pyörrevirtajarrun lämpenemisen kanssa sekä testauskapasiteetti kasvaa huomattavasti tilattavien komponenttien myötä, päätettiin se päivittää ensin, vaikka liitteen 10 laskujen perusteella TC1:n päivittämisellä ensin saataisiin hieman suurempia säästöjä. Koska TC2:n komponentit ovat myös edullisempia, saadaan tällä ratkaisulla tasattua vuosikohtaisia kustannuksia. Lisäksi laskettiin kuukausikohtaiset kulut tilattavien osien sekä töiden maksuaikojen perusteella vuodelle 2024 (liite 14).

Taajuusmuuttajien toimitusaika on kahdeksan viikkoa ja AC-moottoreiden toimitusaika 14 viikkoa (31). Näiden toimitusaikojen perusteella voitaisiin kaikki testisolujen ulkopuolelle tehtävät rakennustyöt suorittaa vuoden 2024 toukokuun loppuun mennessä. Kun AC-moottorit saapuvat, olisivat kaikki kaapelit ja muut komponentit paikoillaan. Tällöin jäljelle jää vain AC-dynamometrin asennus ja solun muut muutostyöt, jotka aiheuttavat pakollisen käyttökaton testisolulle. Tällä tapaa uudistettu TC2 voisi olla käytössä jo vuoden 2024 kesän lopussa. TC1:n polttoaineen jäähdytys- ja mitausyksikön tulisi olla käytössä vuoden 2024 kevään aikana sen osien toimitusaikojen puolesta.

9 POHDINTA

Olen saanut työlle hyvän pohjakokemuksen työskentelystä Proventia Oy:n emissio- ja moottorilaboratoriossa insinööriopintojeni ohella vuoden 2022 toukokuusta lähtien. Työssä olen päässyt teuttamaan päästöttestauksia sekä myös ikäytys- ja kestotestauksia erilaisille raskaan kaluston dieselmoottoreille ja päästöjärjestelmille. Työ on antanut mahdollisuuden tutustua moottoreiden kehityksen sekä tiukentuvien päästörajoitusten asettamiin vaatimuksiin mittauksissa käytettävälle laitteistolle. Lisäksi työssä olen päässyt tutustumaan kaikkiin Proventian neljään moottoritestisoluun ennen opinnäytetyön aloitusta, sekä suunnitellut, rakentanut ja huoltanut mittauksissa käytettävää kalustoa. Työskentely Proventialla on tarjonnut laajan ja monipuolisen katsauksen laboratorioinsinöörin työtehtäviin ja antanut mahdollisuuden seurata tuotannon eri vaiheita.

Opinnäytetyön aihetta pidän erinomaisena, koska sillä on suora yhteys nykyiseen työkuvaani, jotenka pystyin hyödyntämään siinä sekä työssä että koulussa kerättyä tietoa. Oli erittäin kiinnostavaa päästä tutkimaan, miten moottoritestisolut käytännössä toimivat ja mihin laitteiden mitoitukset perustuvat. Työelämän ammatillisen asiantuntijuuden kasvun osalta pidän kehitystä todella merkityksellisenä. Aikaisemman taidon perusteella osasinkin enimmäkseen esimerkiksi käyttää moottoridynamometriä, mutta nyt tiedän tarkemmin, miten se toimii. Tästä voi olla paljon hyötyä esimerkiksi mahdollisessa vianetsinnässä. Yllätyksenä tulikin, kuinka monipuolinen aihe on ja kuinka monta asiaa testisolujen suunnittelussa täytyy ottaa huomioon esimerkiksi tilankäytön sekä energivirtausten näkökulmasta. Aiheesta löytyi erittäin vähän tietoa suoraan netistä, mutta Proventian insinöörien sekä lähteenä 6 olleen Engine testing -kirjan avustuksella pääsi jo erittäin pitkälle. Opinnäytetyö opetti myös tiimityöskentelyä sekä projektinhallintaa useampien Proventian eri organisaatioiden sekä ulkopuolisten yritysten kanssa.

Tehdyt komponenttivalinnat ja oletetut tulokset pyrittiin perustelevaan mahdollisimman hyvin laskeusten avulla. Kaikkea ei ollut kuitenkaan mahdollista laskea käytännössä kerätyn mittadatan perusteella, koska arvojen mittaaminen ei ollut mahdollista. Tällöin oletukset pyrittiin perustelevaan mahdollisuuksien ja taitojen mukaan niin hyvin kuin mahdollista.

Ongelmia, joita työn aikana kohdattiin, oli esimerkiksi viallinen jäähdynnesteeseen virtausanturi, joka ei kuitenkaan tuottanut suurempia hankaluuksia. Aikataulujen puolesta yllätyksenä tuli, kuinka hidadasta eri yritysten kanssa keskustelu on sähköpostiviesteillä ja satunnaisilla Teams-palavereilla.

Dynamometrien komponentit saatiin kuitenkin tilattua suunnitelmien mukaisesti helmikuun loppuun mennessä.

9.1 Tuloksien hyödyntäminen

Työn tuloksista muodostettiin Powerpoint-esitys, jonka avulla tulokset sekä investoinnin tarve ja kustannukset esiteltiin Proventian johtoryhmälle. Tämän myötä saatiin lupa aloittaa testisolujen päivitys suunnitelmien pohjalta käytännössä. Työn laajuuden ja rakennustöihin kuluvan ajan takia päätettiin, että suunnitteluosuus riittää opinnäytetyöraporttiin.

Dynamometrit saatiin valittua siten, että niiden vääntökäyrät ja tarkkuudet tulisi olla aikaisemman käytännökokemuksen sekä teorian puolesta sopivia käyttötarkoitukseen. TC2:n päivittämisellä ensin onkin hyvä aluksi testata, mitä jäi huomioimatta tai olisi pitänyt tutkia tarkemmin. TC1:n päivitys AC-dynamometrille tulisi onnistua TC2:n uudistuksen myötä kerätyn kokemuksen ansiosta vielä sujuvammin.

TC2:ssa voidaan myös testata nykyisen testisolun jäähtymisen riittävyyttä AC-dynamometreillä. Tällä tapaa voidaan testata laskujen paikkansapitävyys ja pohtia tarkemmin käytännössä, kuinka paljon ilmavirtaa testisolun läpi tarvitaan.

9.2 Muut energiatehokkuuden parannusehdotukset

Tähän on vielä kerätty ideoita ja ajatuksia, joita työn aikana tuli esille. Näihin ei ajankäytön ja oletettujen kustannushyötysuhteiden vuoksi kuitenkaan perehdytty työtä tehdessä tarkemmin. Ideat vaatisivat vielä tarkempaa pohdiskelua ja dataa, jonka pohjalta niiden kannattavuutta voitaisiin läheteä tulevaisuudessa laskemaan.

9.2.1 Hyödyntämättömät testisoluista poistuvat energiavirtaukset

Pakokaasun sekä välijäähdyttimen nesteen virtauksista ei kerätä vielä energiaa millään tavalla talteen. Näitä voisi käyttää myös talon lämmittämiseen lämmönvaihtimien avulla samaan tapaan kuin moottorin jäähdytinnesteen LTO-piirin on tarkoitus tulla toimimaan. Välijäähdyttimen nesteeseen siirtyvä energiamäärä on kuitenkin niin pieni, ettei työssä nähty järkeväksi keskittyä siihen.

Esimerkiksi Bowman valmistaa pakokaasulle lämmönvaihtimia, mutta dieselmoottorilla ei pakokaasun lämpötila saa näissä laskea 180 °C alemmaksi (32). Lämpötilan asettaman rajan vuoksi ei myöskään pakokaasusta saisi kovin paljoa energiaa talteen.

Tulevaisuudessa on tarkoitus myös seurata, olisiko testisoluun tulevan ilman lämmityksestä hyötyä kylmällä säällä. Tähän on jo suunniteltu kanavapatterin asentamista tuloilmaputkeen, jossa kierrätettäisiin myös moottorin jäähdytinnestettä. Lämmityksen tarpeen mukaisesti jäähdytinneste voitaisiin venttiilillä joko ohjata LTO-piiriin tai kanavapatterille.

Testisolusta ulos virtaavalle lämpimälle ilmalle olisi myös mahdollista toteuttaa jonkinlaista lämmöntalteenottoa. Watti 2 -testausyksikössä on jo olemassa järjestelmä, jonka avulla testisolusta poistuvaa ilmaa käytetään tuloilman lämmittämiseen. Tätä voitaisiin käyttää vertailupohjana laskuille.

9.2.2 Energian varastointi ja käytön optimointi

Koska sähkön ja lämmön ostaminen on yleensä kalliimpaa kuin sen myymisestä saatava voitto, olisi parempi, jos kaikki testisoluista tuotettu energia saataisiin talon käyttöön. Jos kaikki sähkö menisi talolle, vähenisivät scope 2:n hiilidioksidipäästöt myös huomattavasti. Sähköä saataisiin enemmän talon käyttöön esimerkiksi akuston avulla, mutta nämä olisivat erittäin kalliita. Toinen vaihtoehto voisi olla sähkövastus lämminvesivaraajaan, jonka avulla lämmitetään talon vettä ja tätä kautta ylimääräinen sähkö käytettäisiin talon lämmittämiseen. Näillä voisi myös osittain ratkaista sähköliittymän tuotannon asettaman yhden MW:n rajan, koska tällöin verkkoon myytävän sähkön teho pienenesi.

Jonkinlaisella automaatiolla voisi myös seurata sähkön spot-hintaa. Kun myytävän sähkön hinta ylittää talon kiinteähintaisen sähkösopimuksen hinnan, myytäisiin sähköä ennemmin kuin ladataan akkuja tai lämmitetään vettä. Jos ylimääräinen sähkö käytettäisiin talon veden lämmittämiseen, voisi automaatio myös seurata sähkön hintaa ja verrata sitä kaukolämmön hintaan. Tämän perusteella se voisi päättää, minne tuotettu energia ohjataan.

LÄHTEET

1. Proventia 2019. Innovatiivista teknologiaa tavoitteena nollapäästöisyys. Hakupäivä 15.9.2023. <https://www.proventia.com/yritys>.
2. Proventia 2021. Valokuva. Artikkelissa Proventia. Historia. Hakupäivä 15.9.2023. Proventian sisäverkko. Tiedostoa ei julkaista yrityssalauksen takia.
3. Proventia 2023. Proventia group OYJ:n tilipääöstiedote tammi-joulukuu 2022. Hakupäivä 20.9.2023. https://www.proventia.com/index.php?id=409&news_id=203&start=5&archive=.
4. Väisänen, Esa 2023. Proventia Engine & Emission laboratory. Hakupäivä 11.10.2023. Proventian sisäverkko. Tiedostoa ei julkaista yrityssalauksen takia.
5. Väisänen, Esa 2023. Valokuva. Proventia Engine & Emission laboratory. Hakupäivä 11.10.2023. Proventian sisäverkko. Tiedostoa ei julkaista yrityssalauksen takia.
6. Martyr, A. J. & Plint, M. A. 2012. Engine Testing. The Design, Building, Modification and Use of Powertrain Test Facilities. Fourth edition. Oxford: Butterworth-Heinemann.
7. PowerLink 2021. AC dynamometers, transient electric dynamometer. Hakupäivä 20.9.2023. <https://www.powerlinkpt.com/ac-dynamometer-en/>.
8. Heywood, John B. 1988. Internal Combustion Engine Fundamentals. International edition. Singapore: McGraw-Hill Book Co.
9. ABB 2001. Tekninen opas nro 7. Sähkökäytön mitoitus. Hakupäivä 15.12.2023. https://library.e.abb.com/public/b11d4fe92973be93c1256d2800415027/Tekninen_opasnro7.pdf.
10. Coxon, John 2011. The eddy-current dyno. High Power Media. Hakupäivä 20.9.2023. <https://www.highpowermedia.com/Archive/the-eddy-current-dyno>.

11. ABB 2001. Tekninen opas nro 4. Nopeussäädettyjen käyttöjen opas. Hakupäivä 1.12.2023. https://library.e.abb.com/public/32f0404329db7689c1256d2800411f0a/Tekninen_opas_nro4.pdf.
12. ISO 8178-1 2006. Reciprocating internal combustion engines – Exhaust emission measurement –. Part 1: Test-bed measurement of gaseous and particulate exhaust emissions. Sveitsi: ISO copyright office.
13. The Electrical Code of Federal Regulations 40 CFR 1065.125. Engine intake air. Hakupäivä 15.11.2023. <https://www.ecfr.gov/current/title-40/section-1065.125>.
14. Horiba 2007. Käyttöohjekirja. Eddy Current Dynamometers of the WT Series. Saksa: Horiba ATS.
15. Väisänen, Esa 2023. Laboratorioinsinööri. Proventia Oy. Haastattelu 18.9.2023.
16. Proventia 2010. Kuvankaappaus. Testcell 2. 3D-malli. Hakupäivä 6.10.2023. Proventian sisäverkko. Tiedostoa ei julkaista yrityssalauksen takia.
17. Yi, Simon-Fucheng 2022. Kuvankaappaus. Mittakuva. 3GZC500625-26 A. ABB 11.5.2022. Hakupäivä 20.11.2023. https://library.e.abb.com/public/ec95fb4c8f484ed5a679f4924cbf9116/3GZC500625-26_A.pdf.
18. ABB 2024. Tuote-esite. 3GBP352220-ADG. IE2 Prosessimoottorit (valurauta), 315 kW, 400V (3GBP352220-ADG). Hakupäivä 26.2.2024. <https://new.abb.com/products/fi/3GBP352220-ADG?printout>.
19. Horiba 2011. TITAN Powertrain. Advanced Powertrain Testing For Heavy-Duty Applications. Hakupäivä 20.1.2024. https://static.horiba.com/fileadmin/Horiba/Products/Automotive/Mechatronics/TITAN_Powertrain/TITAN-Powertrain_Brochure_ENG.pdf.
20. Horiba 2009. Digital test stand controller SPARC. Commissioning Manual. Proventian sisäverkko. Tiedostoa ei julkaista yrityssalauksen takia.

21. HBK 2023. Data sheet. T40B Torque Flange. Hakupäivä 20.1.2024. <https://www.hbm.com/fileadmin/mediapool/hbmdoc/technical/B03406.pdf>.
22. ABB 2024. ABB tarjonta testipenkkeihin. Sähköpostiviesti 29.1.2024. Vastaanottaja: Santeri Pöyskö.
23. Nuottimäki, Jukka 2015. NEXBTL:n käyttö varavoimalähteenä. Polttomoottori- ja turboteknologian seminaari 7.5.2015. Pdf-tiedosto. Teknologiateollisuus. Hakupäivä 1.12.2023. https://teknologiateollisuus.fi/sites/default/files/file_attachments/nexbtln_kaytto_varavoimanlah-teena_j_nuottimaki.pdf.
24. Proventia 2007. Proventia House kojeluettelo. Hakupäivä 14.10.2023. Proventian sisäverkko. Tiedostoa ei julkaista yrityssalauksen takia.
25. ABB 2024. AC-moottorin jäähdytys. Sähköpostiviesti 19.2.2024. Vastaanottaja: Santeri Pöyskö.
26. Wärtsilä 2024. Wärtsilä Encyclopedia of Marine and Energy Technology. Brake specific fuel consumption (BSFC). Hakupäivä 20.2.2024. [https://www.wartsila.com/encyclopedia/term/brake-specific-fuel-consumption-\(bsfc\)](https://www.wartsila.com/encyclopedia/term/brake-specific-fuel-consumption-(bsfc)).
27. Oulun Energia 2023. Lämmön alkuperä. Hakupäivä 22.2.2024. <https://www.ouluenergia.fi/oulu-energia/energiantuotanto/lammon-alkupera/>.
28. Oomi 2022. Sähkön alkuperäjakaumat 2020–2022. Hakupäivä 22.2.2024. <https://oomi.fi/sahkon-alkuperajakaumat/sahkon-alkuperajakaumat-historia/>.
29. NGS Finland 2023. GHG-protokolla päästölaskennassa. Hakupäivä 23.2.2024. <https://ngsfinland.fi/ghg-protokolla-paastolaskennassa/>.
30. Greenstep 2022. Proventia hiilijalanjälkilaskenta 2022. Scope 1&2&3 FIN, CZ, UK. Hakupäivä 10.1.2024. Proventian sisäverkko. Tiedostoa ei julkaista yrityssalauksen takia.
31. ABB 2024. Tarjous TC1 ja TC2. Sähköpostiviesti 26.1.2024. Vastaanottaja: Santeri Pöyskö.

32. Bowman 2024. What is an exhaust gas heat exchanger? Hakupäivä 26.2.2024. <https://ej-bowman.com/knowledge-centre/what-is-an-exhaust-gas-heat-exchanger/>.

LIITTEET

Salassa pidettävä liite 1

Salassa pidettävä liite 2

Salassa pidettävä liite 3

Salassa pidettävä liite 4

Salassa pidettävä liite 5

Salassa pidettävä liite 6

Salassa pidettävä liite 7

Salassa pidettävä liite 8

Salassa pidettävä liite 9

Salassa pidettävä liite 10

Salassa pidettävä liite 11

Salassa pidettävä liite 12

Salassa pidettävä liite 13

Salassa pidettävä liite 14