



Vaasan yliopisto
UNIVERSITY OF VAASA

Jyrki Sorsa

Ruiskutussuuttimen mittauspenkin suunnittelu ja kokoontyö

Tekniikan- ja innovaatiojohtamisen yksikkö
Diplomi-insinöörin tutkinto
Energiatekniikka

Vaasa 2021

Alkusanat

Tämän diplomityön tarkoituksena oli saattaa toimintakuntoon aikaisemmissa diplomitöissä pääperiaatteiltaan suunniteltu ruiskutussuuttimen mittauspenkki. Mittauspenkillä voidaan tutkia polttoaineen virtausta ruiskutussuuttimessa. Ruiskutussuuttimen ominaisuuksia parantamalla kyetään vaikuttamaan moottorin hyötysuhteeseen ja päästöihin.

Periaatesuunnitelmat ja pääkomponenttihankinnat mittauspenkille tekivät Pekka Isola ja Mikko Salminen diplomitöidensä puitteissa. Heidän työnsä kuuluivat FLEXe-tutkimusohjelmaan ja Hercules-2 projektiin. Näiden ohjelmien tavoitteena oli kehittää joustavia ja kestäviä energiateknologioita sekä parantaa laivojen moottoreiden tehokkuutta ja vähentää moottoreiden päästöjä.

Kiitän professori Seppo Niemeä monitahoisesta ja mielenkiintoisesta diplomityön aiheesta. Työn ohjaajana toimi tekniikan tohtori Jukka Kiijärvi ja kiitän häntä asiantuntevista neuvoista ja kommentteista työni edetessä. Kiitän myös Michael Klemtiä Robert Bosch Oy: ltä sekä Antti Kiikeriä ja Olav Nilssonia monista käytännön toimista ja neuvoista. Kiitokset myös Wärtsilän laboratorion henkilöille sekä Tommy Hjerpelle, joilta sain apua mittauksiin liittyvissä asioissa.

Vaasa 28.4.2021

VAASAN YLIOPISTO**Tekniikan- ja innovaatiojohtamisen yksikkö**

Tekijä:	Jyrki Sorsa		
Tutkielman nimi:	Ruiskutussuuttimen mittauspenkin suunnittelu ja kokoonpano		
Tutkinto:	Diplomi-insinöörin tutkinto		
Oppiaine:	Energiatekniikka		
Työn valvoja:	Seppo Niemi		
Työn ohjaaja	Jukka Kijjärvi		
Valmistumisvuosi:	2021	Sivumäärä:	80

TIIVISTELMÄ:

Puristussytytteisessä diesel- ja monipolttoainemoottorissa nestemäinen polttoaine ruiskutetaan palotilaan. Palotilassa suihku hajoaa ja leviää virtauksen sekä aerodynaamisten voimien vaikutuksesta. Ruiskutuksella on merkittävä vaikutus palamiseen ja siten moottorin päästöihin. Ruiskutustapahtuman kaikkia ilmiöitä ei tunneta aukottomasti. Ruiskutusta tutkimalla kyetään kehittämään ruiskutussuuttimen ominaisuuksia päästöjen vähentämiseksi.

Tämän diplomityön tarkoitus oli tehdä tarkat suunnitelmat ruiskutussuuttimen mittauspenkkiä varten ja koota mittauspenkki käyttövalmiiksi. Mittauspenkki koostuu tukevasta teräspöydästä, johon on kiinnitetty ruiskutuslaitteisto, voimansiirto sekä sähkö- ja ohjausjärjestelmät. Mittauspenkin ruiskutustapahtumassa dieselpolttoainetta ruiskutetaan yhden ruiskutussuuttimen läpi maksimissaan 200 MPa paineella jatkuvana virtauksena. Ruiskutuksesta mitataan massavirta ja suihkun aiheuttama voima.

Tarkat suunnitelmat tehtiin ruiskutuksen ohjausjärjestelmän, ruiskutuskammion sekä mittaus-tietojen tallennusjärjestelmän toteuttamiseksi. Ruiskutusaine voidaan säätää ohjausjärjestelmällä portaattomasti. Voima-anturi tulee kohdistaa suihkuun tarkasti. Tätä varten suunniteltiin useaan suuntaan säädettävä ruiskutuskammio. Tulosten jälkikäsitteilyä varten tehtiin mittaus-tietojen tallennusjärjestelmä, joka hankittiin valmiina ulkopuoliselta toimittajalta.

Kun mittauspenkki saatiin käyttövalmiiksi, tehtiin koeruiskutuksia. Näin kyettiin varmistamaan mittauspenkin toimivuus. Saadut mittaus tulokset olivat samansuuntaisia aikaisempien tutkimusten kanssa. Mittauspenkki toimii pääpiirteittäin suunnitellusti. Jatkotoimenpiteinä teknisillä parannuksilla sekä taajuusmuuttajan parametrien optimoinnilla on mahdollista saavuttaa laitteiston entistä vakaampi toiminta mittaus tilanteessa.

AVAINSANAT: Korkeapaineruiskutus, mittauspenkki, puristussytytteinen moottori, ruiskutussuutin, yhteispaineruiskutus.

UNIVERSITY OF VAASA**School of Technology and Innovations**

Author:	Jyrki Sorsa		
Title of the Thesis:	Design and assembly of an injector test rig		
Degree:	Master of science in technology		
Programme:	Energy technology		
Supervisor	Seppo Niemi		
Instructor:	Jukka Kijjärvi		
Year:	2021	Pages:	80

ABSTRACT:

In a compression ignited diesel or dual fuel engine, liquid fuel oil is injected into a combustion chamber. In the combustion chamber the fuel oil spray is atomized and spread further by the effects of flow and aerodynamical forces. The injection process has a significant effect to the combustion thus to the engine emissions. All the phenomena in the injection process are not completely known. Researching the injection event, injector performance can be improved resulting in less emissions from the engine.

The purpose of this thesis was to make accurate plans for the injector test rig functions and accomplish the practical construction project. The injector test rig consists of injection equipment, drivetrain, electrical- and control units assembled on a solid table of steel. In an injection test session diesel fuel oil is injected through one injector as a constant flow with the maximum pressure of 200 MPa. At the injection test session, the fuel oil mass flow and the force resulted from fuel oil spray are measured.

The accurate plans were made for creating an injection control system, an injection chamber, and a data acquisition system. The injection pressure can be steplessly adjusted by the injection control system. The force sensor needs to be aligned accurately to the fuel oil spray. For this purpose an injection chamber was developed. The injection chamber can be adjusted in several directions. For post-processing the measured data, data acquisition system was defined. The actual data acquisition system was acquired from a local supplier as a turn-key solution.

After the test rig construction work was accomplished, test run sessions were held. This way the planned features of the test rig were confirmed to be functioning as expected. The recorded parameter values during the test session were aligned with the results of previous studies in the field. In broad outline the injector test rig is functioning as expected. As further development, technical improvements and frequency converter parameter optimization may result in even better equipment operational stability during the test sessions.

KEYWORDS: Common rail injection, compression ignited engine, high pressure injection, injector nozzle, injector test rig.

Sisällys

Alkusanat	2
1 Johdanto	11
2 Suunnittelu	13
2.1 Lähtötilanne ja tavoite	14
2.2 Turvallisuusnäkökohdat	14
2.3 Suunnittelun eteneminen	17
2.4 Lisätoimet	17
3 Mittauspenkin kokoonpano	19
3.1 Mittauspenkin komponenttien asettelu	19
3.2 Mittauspenkin pöytätaso	20
3.3 Sähkömoottorin asennus	21
3.4 Korkeapainepiiri	22
3.4.1 Korkeapainepumppu	23
3.4.2 Painevaraajat	26
3.4.3 Korkeapaineputket	27
3.4.4 Ruiskutusventtiili	29
3.4.5 Ruiskutusventtiilin adapteri	30
3.5 Matalapainepiiri	31
3.5.1 Ruiskutuskammio	32
3.5.2 Ruiskutuskammion telakointiasema	35
3.5.3 Ruiskutetun polttoaineen mittaussäiliö	38
3.5.4 Polttoainesäiliö	38
3.5.5 Polttoaineen siirto- ja syöttöpumppu	39
3.5.6 Polttoaineen suodatusjärjestelmä	41
3.6 Jäähdytysjärjestelmä	44
3.6.1 Jäähdytystase	45
3.7 Sähkömoottori	47
3.8 Voimansiirto	48

3.8.1	Hihnapyörät	50
3.8.2	Kiilahihnat	51
3.9	Sähköjärjestelmä	52
3.9.1	Taajuusmuuttaja	53
3.9.2	Kytkenäkaappi	55
3.9.3	Teholähteet	56
3.9.4	Magneettiventtiilit	58
3.10	Ruiskutuksen ohjausjärjestelmä	59
3.11	Mitta-anturit	61
3.12	Signaalivahvistimet	63
3.13	Mittaustiedon tallennusjärjestelmä	64
4	Testaus	65
4.1	Testausjärjestelyt	65
4.2	Testaussuunnitelma	66
4.3	Polttoaineanalyysi	67
4.4	Tulokset	67
5	Pohdinta	70
6	Johtopäätökset	74
7	Yhteenveto	76
8	Lähdeluettelo	77

Kuvat

Kuva 1. Suunnittelun vaiheet.	13
Kuva 2. Mittauspenkin pääkomponenttien sijoittelu.	19
Kuva 3. Mittauspenkki ilman laitteistoja.	20
Kuva 4. Sähkömoottorin kiinnikkeet.	21
Kuva 5. 1 korkeapainepumppu, 2 painevaraajat.	23
Kuva 6. Bosch CP4 korkeapainepumppu: 1 nokka-akseli, 2 työsylinterit, 3 MPROP-venttiili (Bosch, 2021).	24
Kuva 7. Ensimmäinen painevaraaja: 1 Tuloportit. 2 Suljetut lähtöportit. 3 Lähtöportti jälkimmäiselle painevaraajalle.	27
Kuva 8. Korkeapaineputkien kiinnityspäriate: Kartio 60°, M14x1,5 sisäkierteinen pyörömutteri.	28
Kuva 9. Ruiskutusventtiili.	29
Kuva 10. Ruiskutusventtiilin adapteri (Isola, 2017).	31
Kuva 11. Ruiskutuskammio, voima-anturin mittapää sijoitettuna ruiskutuskammion sisään.	34
Kuva 12. Ruiskutuskammio, voima-anturin mittapää ruiskutuskammion ulkopuolella. 1 O-rengas, pidin. 2 O-rengas, ovaali. 3 O-rengas, ruiskutusventtiili. 4 Päätytiiviste, voima-anturin pidin. 5 O-rengas, työntötanko. 6 O-rengas, voima-anturin pidin. 7 Usit-tiiviste, poistoaukko. 8 Korotuskiila. 9 Voima-anturi.	36
Kuva 13. Telakointiasema: 1 Ruiskutuskammio. 2 Kammion pidin. 3 Poistokanava. 4 Paineanturi.	37
Kuva 14. Polttoaineen siirtopumppu.	40
Kuva 15. Bosch CP4: 1 polttoaineen syöttöpumppu, 2 korkeapainepumppu.	41
Kuva 16. Polttoaineensuodatus: 1 Esisuodatin. 2 Pääsuodatin. 3 Kiristinrengas. 4 Käsipumppu. 5 Syöttöpumpun painemittari.	43
Kuva 17. Jäähdytysjärjestelmän yksinkertaistettu kaavio.	45
Kuva 18. Voimansiirto: 1 Hihnapyörä 71 mm. 2 Taper Lock 1108–20. 3 Kiilahihnat. 4 Hihnankiristimet. 5 Hihnapyörä 100 mm. 6 Taper Lock 1610–42.	49

Kuva 19. Vacon 100 Industrial taajuusmuuttaja.	55
Kuva 20. KytKentäkaappi: 1 Ohjausvirtojen säätö. 2 Teholähteet. 3 Signaalivahvistimet. 4 Tiedonkeruumuoduuli.	61
Kuva 21. Koemittauksissa mitatut massavirta- ja voima-arvot.	69

Taulukot

Taulukko 1. Bosch CP4N2 korkeapainepumpun pääominaisuudet (Klemt, 2021); (Salminen, 2019).	26
Taulukko 2. Polttoaineen suodattimien ominaisuuksia (Mann-Filter, 2021).	42
Taulukko 3. Korkeapainepumpun tuottama laskennallinen maksimilämpövirta.	47
Taulukko 4. Jäähdytysteho lämmönvaihtimessa ja ruiskutusventtiilin adapterilla.	47
Taulukko 5. Mittauspenkin kytKentäkaapin teholähteiden tärkeimmät ominaisuudet (Yleiselektroniikka, 2021).	57
Taulukko 6. MPROP-venttiilin ja paineenrajoitusventtiilien viitteelliset ohjausvirrat ja vastaavat paineet painevaraajissa (Klemt, 2021).	58
Taulukko 7. Mitta-anturit ja mittausketjun komponentit.	62
Taulukko 8. Polttoaineanalyysin pääkohdat (ASG, 2020).	67
Taulukko 9. Mittaustulokset eri painetasoilla.	69

Lyhenteet ja symbolit

Lyhenteet

3D tulostus	Esineen valmistaminen kolmiulotteisella tulostimella
CR	Common rail. Yhteispaineruiskutusjärjestelmä
DIN-kisko	Standardoitu kiinnitin sähkö- ja asennuskoteloissa
MPROP	Magnetically controlled proportional valve. Magneettiohjattu säätöventtiili
OL	Open loop. Ei takaisinkytkentää
PCV	Pressure control valve. Paineensäätöventtiili
PWM	Pulse width modulation. Pulssin leveys modulaatio
SLS	Selective laser sintering. Laser sintraus
TEDS	The electronic data sheet. Elektroninen määrittystiedosto
VAC	Voltage alternative current. Jännite, vaihtosähkö
VDC	Voltage direct current. Jännite, tasasähkö

Symbolit

A_c	Sulkutulpan leikkautuva pinta-ala
A_r	Reiän poikkipinta-ala
c_v	Veden ominaislämpökapasiteetti
D_r	Reiän halkaisija
F	Sulkutulppaan kohdistuva voima
F_{suihku}	Suihkun tuottama voima
\dot{m}	Massavirta
p	Ylipaine
P_{axle}	Korkeapainepumpun akseliteho
q_v	Polttoaineen tilavuusvirta
Q	Lämpövirta
T_1	Jäähdytysnesteen sisäänvirtauslämpötila
T_2	Jäähdytysnesteen ulosvirtauslämpötila
V_{suihku}	Suihkun virtausnopeus

Δp_p	Paine-ero suutinreiän sisä- ja ulkopuolella
η	Korkeapainepumpun hyötysuhde
τ	Sulkutulppaan kohdistuva leikkausvoima

1 Johdanto

Maailman kaikesta rahtiliikenteestä kolme neljännessä kuljetetaan meriteitse. Meriliikenne on kaikkein energiatehokkain kuljetusmuoto mitattaessa energian kulutusta suhteessa kuljetettuun massaan per kilometri. Meriliikenteen päästöjä täytyy kuitenkin edelleen saada vähennettyä päästötavoitteiden saavuttamiseksi (IEA, 2021).

Laivoissa yleisesti käytössä olevissa keskinopeissa- ja hidaskäyntisissä diesel- ja monipolttoainemoottoreissa pääpalotapahtuma sytytetään joko suoraan tai välillisesti ruiskuttamalla nestemäistä polttoainetta sylinteriin. Polttoaine syttyy puristuspaineen vaikutuksesta. Ruiskutustapahtuman hallinta on ratkaisevassa osassa pyrittäessä parempaan moottoreiden hyötysuhteeseen ja päästöjen vähentämiseen. Moottoreiden kehitystyössä etsitään jatkuvasti uusia mahdollisuuksia parantaa tehokkuutta ja vähentää päästöjä (Wärtsilä, 2021).

FLEXe-ohjelma, jonka tavoitteena oli kehittää joustavia ja kestäviä energiaratkaisuja sekä Hercules-2 projekti, jonka tavoitteena oli parantaa laivanmoottoreiden tehokkuutta ja vähentää päästöjä, olivat Isolan (Isola, 2017) ja Salmisen (Salminen, 2019) diplomitöiden perustana. He tekivät diplomitöissään periaatesuunnitelmat ja pääkomponenttihankinnat ruiskutussuuttimen mittauspenkin rakentamiseksi (FLEXe, 2021); (Hercules-2 Project, 2021).

Tämän diplomityön tavoite oli saattaa ruiskutussuuttimen mittauspenkki käyttövalmiiksi Isolan ja Salmisen suunnitelmien pohjalta sekä suorittaa koeruiskutuksia mittauspenkin käytännön toimivuuden varmistamiseksi. Ruiskutustapahtuman tutkiminen määritettiin alkuperäisen suunnitelman mukaisesti suoritettavaksi mittaamalla suihkun aiheuttama voima sekä ruiskutettavan nesteen massavirta. Mittaustuloksia analysoimalla on mahdollista kehittää ruiskutussuuttimen ominaisuuksia paremmiksi (Kiijärvi, 2020).

Olemassa olevista periaatesuunnitelmista huolimatta tähän työhön liittyi huomattavan paljon yksityiskohtien suunnittelua, joita ei ollut voitu ottaa huomioon

periaatesuunnittelussa. Työn eteneminen on kuvattu vaiheittain pääluvuissa alkaen suunnittelun kuvauksesta luvussa kaksi. Suunnittelu on jaettu neljään aliotsikkoon, jotka sisältävät kokoonpanon ja mittaustapahtuman suunnittelun vaiheet.

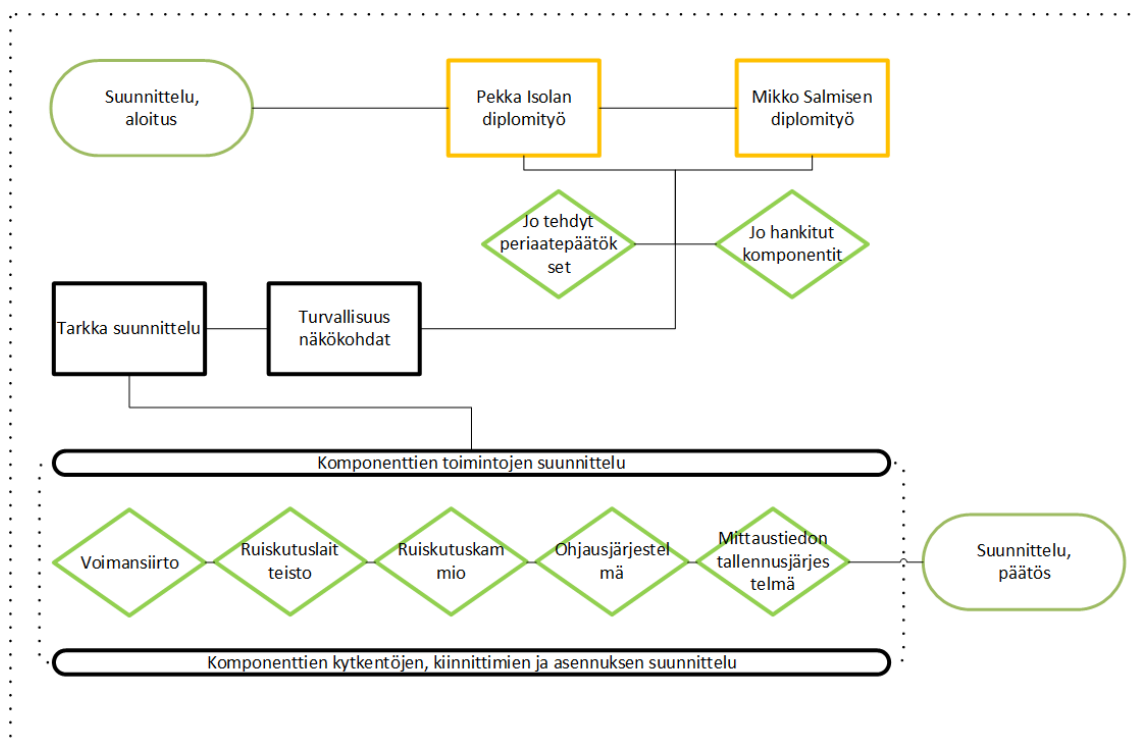
Kolmannessa luvussa kerrotaan kokoonpanon käytännön vaiheet sekä kuhunkin osa-alueeseen liittyviä täydentäviä tietoja. Täydentävinä tietoina kerrotaan valittujen ratkaisujen perusteista sekä käytetyistä materiaaleista ja menetelmistä soveltuvin osin.

Neljännessä luvussa esitetään ruiskutuksen mittauksen edellyttämät käytännön järjestelyt, jotka on suoritettava ennen mittaustapahtumaa. Luvussa neljä esitetään lisäksi mittaushjelma, jonka mukaan testimittaukset suoritettiin. Tämän työn tarkoituksena ei ollut suorittaa virallisia mittauksia, vaan ainoastaan osoittaa, että laitteisto mahdollistaa ruiskutustapahtuman mittaamisen. Mittaustulokset on sisällytetty lukuun neljä.

2 Suunnittelu

Tämän diplomityön tarkoituksena oli tehdä tarkat suunnitelmat ja suorittaa käytännön kokoonpano mittauspenkin saattamiseksi toimintakuntoon. Käytännössä suunnittelu tehtiin lomittain kokoonpanon kanssa edeten yksi osakokonaisuus kerrallaan.

Työhön liittyi suuri määrä yksityiskohtia, joita ei ollut mahdollista suunnitella valmiiksi, ennen kuin edeltävät vaiheet oli todettu käytännössä toimiviksi. Kulloinkin valmistunut osasuunnitelma testattiin käytännössä, ja sitten siirryttiin suunnittelun seuraavaan vaiheeseen. Suunnittelun haasteena oli huomioida alikokoonpanojen vaikutus mittauspenkin kokonaiskäytettävyyteen, kun ainoastaan osa suunnitelmista oli valmiina. Suunnittelun periaatteellinen kulku on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1. Suunnittelun vaiheet.

2.1 Lähtötilanne ja tavoite

Aikaisempien diplomitöiden tuotoksina periaatesuunnitelmat mittauspenkin toiminta-periaatteesta ja pääkomponenteista olivat olemassa. Kaikki tarvittavat pääkomponentit oli hankittu. Lähtötilanne ja tavoite tähän työhön olivat selkeästi tuotu esille, mikä oli hyvänä pohjana tarkalle suunnittelulle. Tarkan suunnittelun lähtökohta oli aikaisempien diplomitöiden periaatepäätökset sekä luettelo hankituista komponenteista ja tarvikkeista.

2.2 Turvallisuusnäkökohdat

Korkeapainepumpun tuottama maksimipaine nousee 200 MPa:iin, mikä oli otettava huomioon suunnittelussa. Vuodot tai komponenttien rikkoutuminen voivat aiheuttaa korkeapaineisen dieselöljyn suihkun tai irronneiden komponenttien sinkoutumisen mittauspenkkiä käyttävien henkilöiden päälle.

Esimerkiksi pieni vuoto korkeapainepiirissä saattaa olla huomaamaton, mutta aiheuttaa suuren vaaran. Pienestä reiästä vuotavan korkeapaineisen ruiskutusvirtauksen nopeus on suuri ja aiheuttaa vahinkoa, kun virtaus osuu johonkin kappaleeseen (Salminen, 2019). Korkeapainepiirin tärkeimpiä kohtia turvallisuuden kannalta ovat korkeapaineputkien liitokset sekä painevaraajien ylimääräisiin tulo- ja lähtöporttien sulkemiseen käytetyt sulkutulpat. Sulkutulppiin kohdistuu korkean paineen vaikutuksesta suuri voima, ja tulpat voivat irrota sekä sinkoutua kierteiltään. Tulppaan kohdistuva voima F lasketaan lausekkeella

$$F = pA_r = p \frac{\pi D_r^2}{4}, \quad (1)$$

missä p on ylipaine, A_r reiän poikkipinta-ala ja D_r reiän halkaisija.

Lausekkeella 1 laskemalla saadaan 200 MPa paineella ja 9,00 mm reiän halkaisijalla sulkutulppaan kohdistuvan voiman tulokseksi 12,7 kN. Sulkutulppaan kohdistuva leikkausjännitys τ ratkaistaan yhtälöstä

$$\tau = \frac{F}{A_c}, \quad (2)$$

missä F merkitsee sulkutulppaan vaikuttavaa voimaa, ja A_c sulkutulpan leikkautuvaa pinta-alaa (Salminen, 2019, ss. 51-52).

Sulkutulpan leikkautuva pinta-ala saadaan kertomalla pyörömutterin vastinseinämän paksuus 7,3 mm seinämän kehän pituudella 39 mm. Leikkausvoimaksi saatiin 45 MPa.

Painevaraajien ympärille suunniteltiin taivutetut, kolmen millimetrin vahvuiset teräslevyt. Ne suojaavat, mikäli ylimääräisten porttien sulkutulpat irtoaisivat käyttötilanteessa. Teräslevyt toimivat samalla osana kiinnittimiä, joilla painevaraajat on kiinnitetty pöytätasoon.

Hihnapyörät ja kiilahihnat ovat pyöriviä ja liikkuvia komponentteja. Ne saattavat aiheuttaa vakavan vaaran esimerkiksi vaatekappaleiden tartuttua niihin. Lisäksi hihnapyörät voivat irrota sijoiltaan. Kun mittauspenkkiä käytetään korkealla ruiskutusaineella, saattavat kiilahihnat alkaa värähdellä. Värähtelyn seurauksena kiilahihnat saattavat luisua pois hihnapyöriltä. Pahimmassa tapauksessa hihnat voivat katketa ja sinkoutua mittauspenkkiä käyttävien henkilöiden päälle.

Hihnapyörien ja kiilahihnojen ympärille suunniteltiin kauttaaltaan peittävä ohutlevykotelo kahden millimetrin paksuisesta teräslevystä. Kotelo toimii suojana, mikäli kiilahihnat katkeaisivat tai hihnapyörät irtoaisivat sijoiltaan. Lisäksi ulkopuoliset esineet eivät pääse tarttumaan pyöriiviin komponentteihin. Kotelon alaosaan jätettiin aukko tuuletusta ja kiilahihnojen visuaalista tarkastamista varten.

Korkean ruiskutuspaineen vaikutuksesta dieselöljy kuumenee voimakkaasti ja voi aiheuttaa syttymis- höyrystymisvaaran. Lisäksi kuumaa dieselöljyä voi roiskua mittapenkkiä käyttävien henkilöiden päälle. Standardin EN 590:2014 mukaisen dieselöljyn leimahduspiste sallitaan olevan alimmillaan 55 celsiusastetta. Mittauspenkin polttoaineen leimahduspiste on 67,5 celsiusastetta (ASG, 2020). Leimahduspiste on alin lämpötila, missä aineesta haihtuva höyry muodostaa ilman kanssa kipinästä syttyvän seoksen (Tekniikan kemia, 2008, s. 125).

Dieselöljy alkaa höyrystyä 100 kPa paineessa 40 celsiusasteen lämpötilassa. Tällöin on mahdollista, että dieselöljy höyrystyy putkistossa ja aiheuttaa painevaihteluita korkeapainepumpun syöttöpumpussa (Salminen, 2019, s. 61). Vaikka mittauspenkin polttoainejärjestelmä on suljettu piiri, on mittaus säiliön kansi varustettu avattavalla luukulla ja polttoainesäiliön korkissa on ilmausruuvi. Mikäli luukku ja ilmausruuvi avataan polttoaineen lämpötilan ollessa yli höyrystymislämpötilan, saattaa höyrystynyttä dieselöljyä päästä hengitysilmaan.

Polttoaineen jäähdyttämiseksi oli hankittu putkimallinen lämmönvaihdin. Lämmönvaihtimessa on erilliset, suljetut kiertopiirinsä jäähdytysnesteelle ja jäähdytettävälle polttoaineelle. Lämpö siirtyy kuumasta polttoaineesta kylmään jäähdytysveteen. Polttoaineen lämpötila polttoainesäiliössä pystytään pitämään jäähdytysjärjestelmän avulla alle 40 celsiusasteen. Tämän ansiosta syttymis- ja höyrystymisvaara kyetään välttämään. Polttoainejärjestelmään suunniteltiin kaksi mittauspistettä polttoaineen lämpötilalle.

Sähkömoottori on kyettävä ongelmatilanteessa sammuttamaan nopeasti ja varmasti. Taajuusmuuttajan ohjauspaneelissa on pysäytyspainike, mutta tämän lisäksi suunniteltiin taajuusmuuttajan ja sähkömoottorin välille sähkökatkaisin, jolla sähkömoottori voidaan sammuttaa nopeasti vaaratilanteessa.

Turvallisuus yleisesti huomioitiin suunnitteleamalla kaikki korkeapainepiirin komponentit mittauspenkin toiseen päähän ja ohjauslaitteet toiseen päähän. Näin mittauspenkkiä

käyttävät henkilöt ovat etäällä korkeapainepiiristä. Tämä oli perusteltua lisäksi siitä syystä, että näin pystyttiin käyttämään mahdollisimman paljon vakioiitöntäputkia. Vakioiitöntäputket ovat käytännössä todettu turvallisiksi. Koko mittauspenkin ympärille on periaatetasolla suunniteltu polykarbonaattilevystä rakennettava turvakehikko. Turvakehikkoa ei ole vielä toteutettu.

2.3 Suunnittelun eteneminen

Tarkan suunnittelun haasteellisin seikka oli työhön liittyvien yksityiskohtien lukumäärä. Aivan pienimmätkin yksityiskohdat täytyi huomioida ja ratkaista, jotta suunnittelussa voitiin edetä. Tämän vuoksi suunnittelussa oli noudatettava periaatetta etenemisestä ainoastaan yksi osakokonaisuus kerrallaan, alkaen esimerkiksi voimansiirron suunnittelusta ja edeten sitten seuraavaan vaiheeseen. Mittauspenkin toiminnallinen kokonaisuus oli koko ajan otettava huomioon, vaikka ainoastaan vasta osa alikokoonpanoista oli kulloinkin suunniteltu yksityiskohtaisesti.

2.4 Lisätoimet

Hankitun ruiskutuslaitteiston komponentit ovat vastaavia, joita käytetään Agco Powerin 6-sylinterisissä työkoneiden moottoreissa. Työkoneeseen asennettuna ruiskutuslaitteistoa ohjataan integroidulla ohjausjärjestelmällä, joka huolehtii ruiskutuslaitteiston normaalista ja turvallisesta toiminnasta. Mittauspenkin ruiskutusjärjestelmä oli hankittu ilman ohjausjärjestelmää, minkä vuoksi mittauspenkkiin täytyi suunnitella kustannustehokas ja tarkoitukseen sopiva ohjausmenetelmä.

Pääkomponenttien kiinnittämiseksi pöytään kaikki kiinnikkeet oli suunniteltava ja hankittava tämän työn puitteissa. Tarvittavat kiinnikkeet suunniteltiin ensin konseptitasolla ja lopulliset suunnitelmat tehtiin Autodesk Inventor Professional 2019 mallinnusohjelmalla. Suunnitelmat lähetettiin toimittajalle, joka valmistivat pyydetyt osat. Kiinnikkeet

valmistettiin 2–12 mm vahvoista teräslevyistä työstämällä ja hitsaamalla. Kiinnikkeet hankittiin Vaasan Kuljetuskanavat Oy: ltä, jolla on tarvittava osaaminen ja laitteisto kiinnikkeiden valmistamiseksi.

Voima-anturin sijoittaminen suihkun voiman mittaamiseksi osoittautui hyvin vaativaksi. Jotta suihkun voima voidaan mitata luotettavasti, on suihku saatava osumaan täsmällisesti mitta-anturiin. Suutinreiän halkaisija on vain 0,138 mm suuruinen, joten sen havaitseminen on hankalaa ja vaikeuttaa suuttimen kohdistamista. Suutinreiän ruiskutus-suunta suhteessa ruiskutusventtiin runkoon on tunnettu, mutta suutinreiän sijainti korkeussuunnassa on vaikea todeta silmämääräisesti.

Voima-anturi oli sijoitettava suljetun polttoainepiirin sisään, jotta polttoaineen kierto pysyi suljettuna ja polttoaineen massavirta voitiin mitata. Voima-anturin signaaliliitäntäpäätä oli kuitenkin jätettävä suljetun polttoainepiirin ulkopuolelle signaalihoitimen kytkemiseksi. Ensisijaisen voima-anturin pitimen rakenneratkaisun lisäksi suunniteltiin vaihtoehtoinen ratkaisu. Vaihtoehtoisella pitimellä voidaan voima-anturi tarvittaessa sijoittaa ruiskutuskammion ulkopuolelle. Tällöin suihkun voima välittyy voima-anturille työntö-tangon välityksellä.

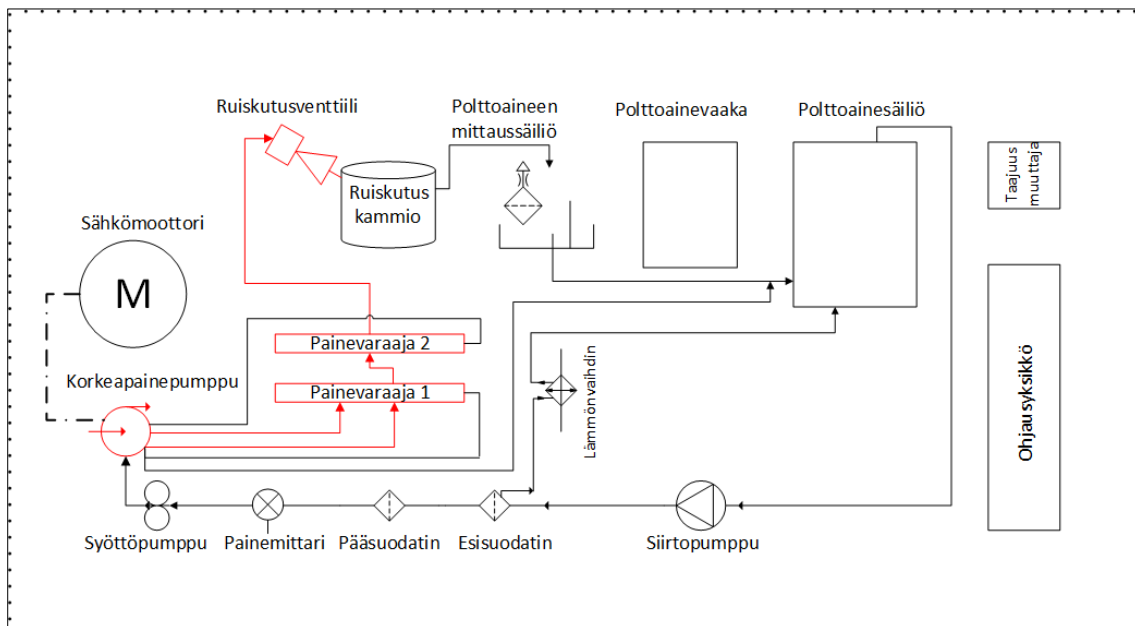
Voima-anturille suunniteltiin ruiskutuskammio, jossa anturia voidaan liikutella eri suuntiin. Ruiskutuskammio ja sen telakointiasema valmistettiin 3D-tulostustekniikalla PA12 muovimateriaalista. Tulostetut komponentit hankittiin Origo Engineering Oy: ltä. Origo Engineering Oy on paikallinen 3D-tulostukseen erikoistunut insinööritoimisto.

Mittaustulosten myöhempää analysointia varten tarvittiin mittaustulosten tallennusjärjestelmä. Työn muiden osa-alueiden laajuuden vuoksi mittaustietojen tallennusjärjestelmä päätettiin hankkia valmiina Insinööritoimisto A. Hänninen Oy: ltä. Järjestelmäksi valittiin yksinkertainen ja tehokas menetelmä, jossa kahdeksankanavainen tiedonkeruumuoduuli muuntaa mittausten jännitetiedot digitaaliseen muotoon. Saadut mittaustiedot tallennetaan jännitearvoina Excel taulukkoon.

3 Mittauspenkin kokoonpano

3.1 Mittauspenkin komponenttien asettelu

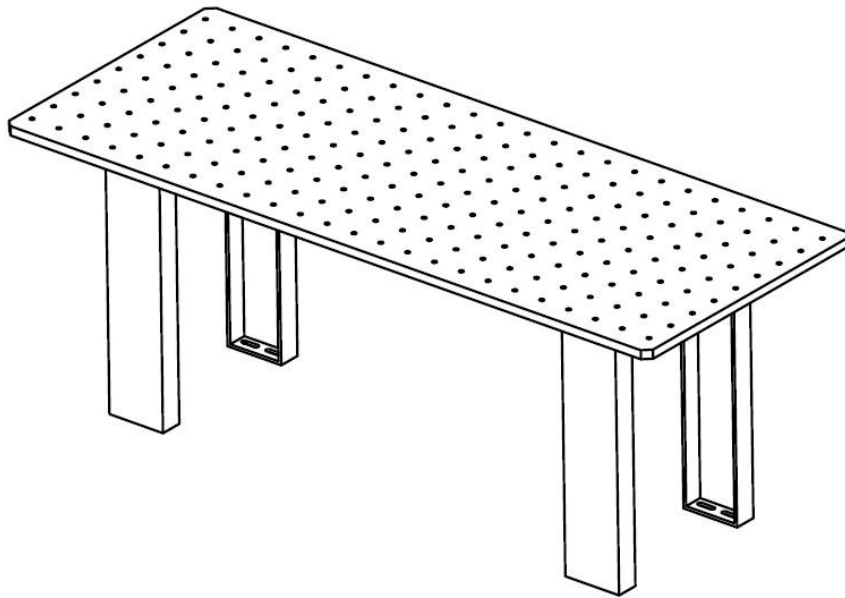
Mittauspenkin pääkomponenttien asettelu toteutettiin sijoittamalla korkeapainepiirin komponentit mahdollisimman etäälle mittauspenkin ohjauksyksiköltä. Ohjauksyksikkö, taajuusmuuttaja, ruiskutuslaitteiston osat ja polttoaineen massavirran mittauslaitteet sijoitettiin pöytätason yläpuolelle. Sähkömoottori, polttoainesäiliö, siirtopumppu ja lämmönvaihdin sijoitettiin pöytätason alapuolelle. Pääkomponenttien sijoittelu on esitetty yksinkertaistetussa kuvassa 2. Korkeapainepiirin komponentit on merkitty punaisella.



Kuva 2. Mittauspenkin pääkomponenttien sijoittelu.

3.2 Mittauspenkin pöytätaso

Mittauspenkin suurin yksittäinen komponentti on tukeva, metallinen pöytä. Pöydän taso on kokoa 2400 mm x 950 mm x 30 mm. Taso on valmistettu teräksestä. Tasoon on koneistettu yhteensä 216 kpl läpireikää symmetrisesti 100 mm välein. Reiät ovat kierteetty M16 kiertein komponenttien kiinnittämiseksi pöytään. Pöydän yläpinta on 900 mm korkeudella lattiasta ja seisoo tukevien teräsjalcojen päällä. Kaikki mittauspenkin komponentit ovat kiinnitetty kyseiseen pöytään. Kuvassa 3 on esitetty mittauspenkki ilman laitteistoja.

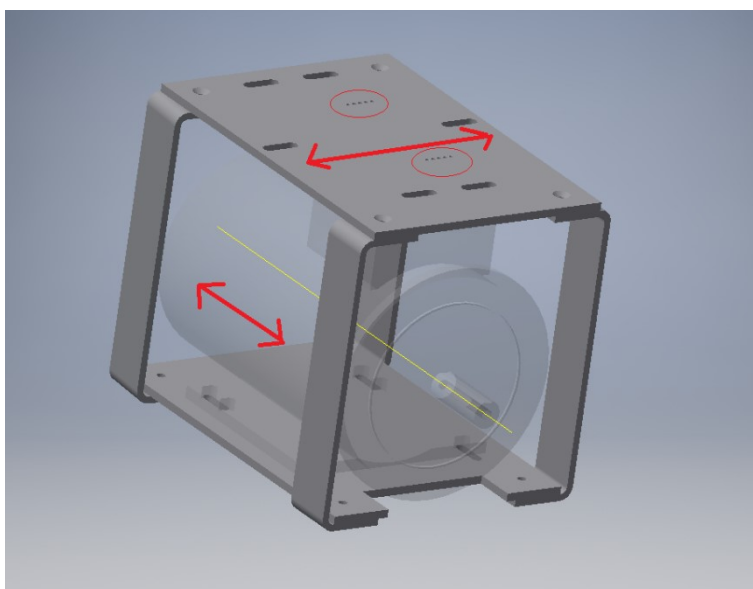


Kuva 3. Mittauspenkki ilman laitteistoja.

3.3 Sähkömoottorin asennus

Sähkömoottorilla käytetään korkeapainepumppua, joka tuottaa järjestelmän ruiskutus-paineen. Sähkömoottori on ABB:n valmistama suurikokoinen oikosulkumoottori. Sähkömoottorin massa on 72 kg. Sähkömoottori on esitelty tarkemmin kappaleessa 3.7. Sähkömoottori päätettiin sijoittaa pöytätason alle tilan säästämiseksi ja painopisteen alen-tamiseksi. Sähkömoottorille täytyi suunnitella riittävän tukevat kiinnikkeet, jotta moot-tori pystyttiin kiinnittämään pöytätason alapintaan.

Kiilahihnojen kiristäminen on tehtävä sähkömoottoria siirtämällä, koska kiilahihnojen toinen kääntopiste korkeapainepumpulla on kiinnitetty kiinteästi pöytätasoon. Kiinnik-keet on suunniteltu kaksisuuntaisina siten, että ne toimivat sekä kiilahihnojen kiristys-mekanismina että sähkömoottorin syvyysäätonä pöydän pätyyn nähden. Sähkömoot-torin ylälevyyden porattiin kahteen riviin 10 kpl 5 mm reikiä. Sopivalla työkalulla reikiä vas-ten kampeamalla pöydän yläpuolelta, voidaan hihnojen kiristämistä ja linjaamista hel-pottaa. Sähkömoottorin kiinnikkeet on esitetty kuvassa 4.



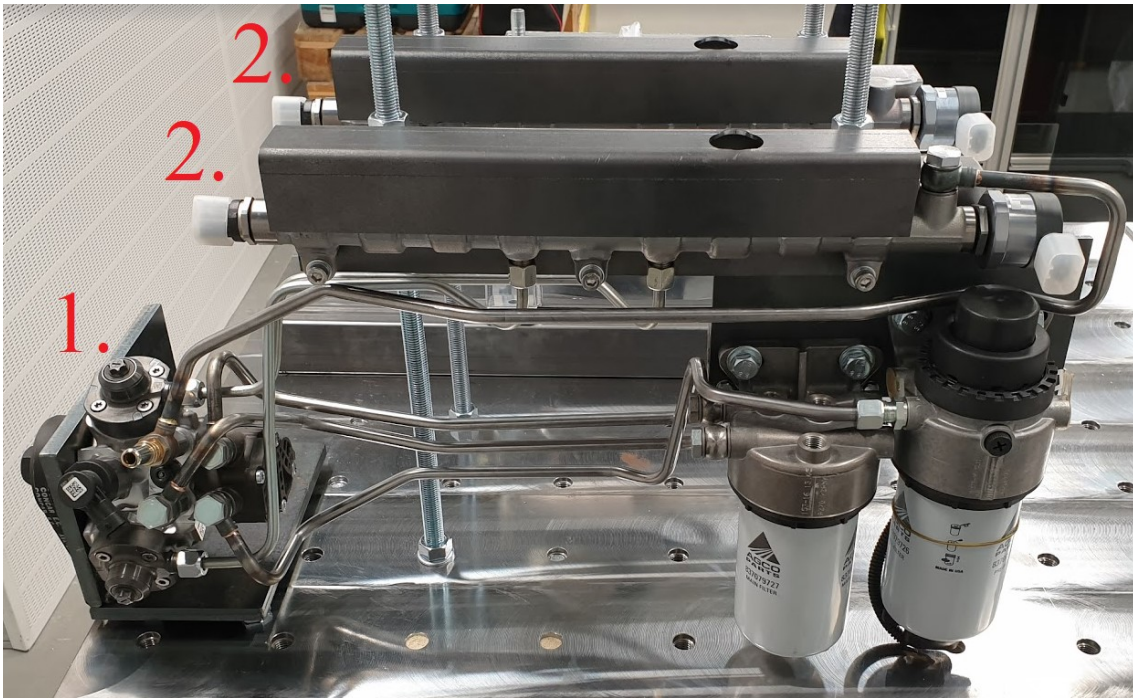
Kuva 4. Sähkömoottorin kiinnikkeet.

3.4 Korkeapainepiiri

Mittauspenkin korkeapainepiirin maksimipaine on 200 MPa, jonka CP4-korkeapainepumppu tuottaa. Korkeassa paineessa oleva polttoaine varastoituu painevaraajiin ja on moottorikäytössä kaikkien ruiskutuslaitteiden käytettävissä viiveettömästi. Peruste korkealle ruiskutuspainelle on vaatimus saada polttoaine leviämään ja hajoamaan moottorissa mahdollisimman tehokkaasti sylinterin uloimmille alueille saakka, tasaisen palotapahtuman saavuttamiseksi (Isola, 2017, s. 13). Lisäksi korkea paine mahdollistaa useita ruiskutustapahtumia yhden työtahdin aikana. Tällä saavutetaan tehokkaampi ja puhtaampi palaminen. Korkeapainepumppu ja painevaraajat muodostavat common rail (CR), eli yhteispaineruiskutusjärjestelmän toiminnallisen rungon (DieselNet, 2021).

Mittauspenkissä korkeapainepiirin pääkomponentit ovat korkeapainepumppu, painevaraajat, korkeapaineputket sekä yksi ruiskutusventtiili. Valitut komponentit ovat vakio-komponentteja, joita käytetään useissa Agco Powerin sarjatuotantomootoreissa (Agco Power, 2021). Ainoastaan korkeapaineputki ensimmäiseltä painevaraajalta jälkimmäiselle suunniteltiin ja teetätettiin mittatilaustyönä erikoisliikkeessä.

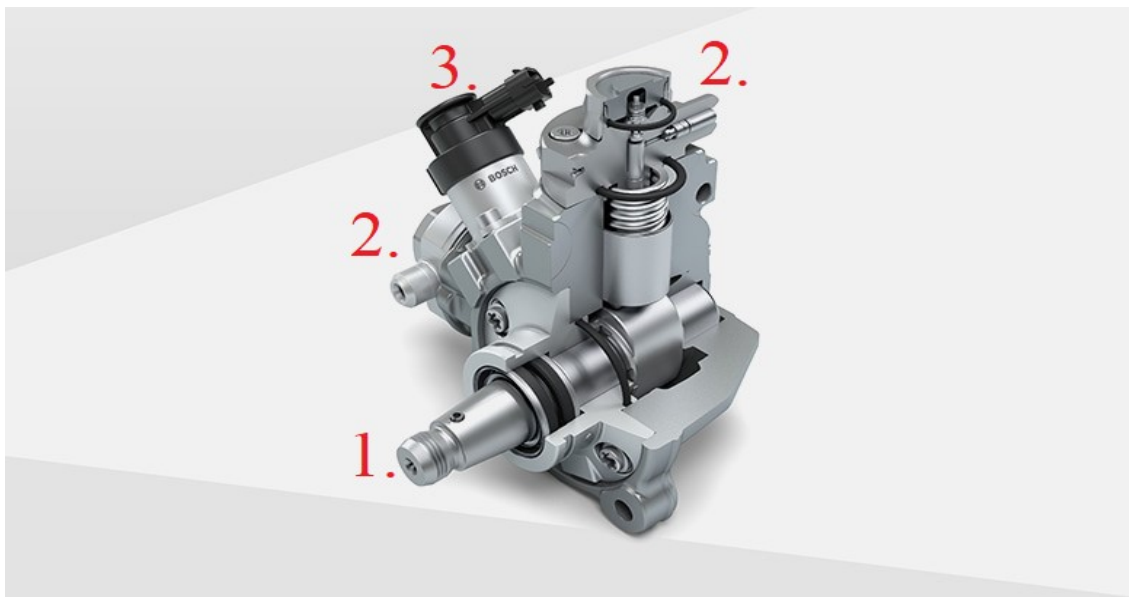
Normaalisti Agco Powerin kuusisylinterisen rivimoottorin korkeapainepiirissä käytetään ainoastaan yhtä painevaraajaa, mutta mittauspenkissä niitä on kaksi (Agco Power, 2021). Mittauspenkissä käytetään kahta rinnakkaista painevaraajaa painevaihteluiden tasaimiseksi. Mittauspenkissä painevaihteluiden suuruusluokaksi mitattiin 3,5 MPa. Yhden painevaraajan järjestelmässä painevaihtelut saattavat olla jopa 10 MPa (Klemt, 2021). Kuvassa 5 on esitetty korkeapainepumppu ja kaksi painevaraajaa.



Kuva 5. 1 korkeapainepumppu, 2 painevaraajat.

3.4.1 Korkeapainepumppu

Laitteiston korkeapainepumpuksi oli hankittu Boschin valmistama CP4-mallinen yhteispaineruiskutuspumppu. Malli on laajasti käytössä henkilöautoissa, kevyissä hyötyajoneuvoissa ja työkoneissa. Valmistajan mukaan pumppu on suunniteltu moottorin korkean suorituskyvyn ja alhaisen polttoaineen kulutuksen saavuttamiseksi. CP4-pumppua on valmistettu yli 60 miljoonaa kappaletta eri mallivariaatioina. Bosch CP4 korkeapainepumpun osaleikkaus on esitetty kuvassa 6 (Bosch, 2021).



Kuva 6. Bosch CP4 korkeapainepumppu: 1 nokka-akseli, 2 työsylinterit, 3 MPROP-venttiili (Bosch, 2021).

Mittauspenkissä korkeapainepumpun nokka-akseli saa käyttövoimansa sähkömoottorilta kiilahihnojen välityksellä. Pumpun runko-osassa on kaksi kiinteätä työsylinteriä 90° kulmassa toisiinsa nähden. Jyrkkänousuiset ja pitkät nokat on sijoitettu nokka-akselille säteen suuntaisesti vastakkain 180° välein. Nokat käyttävät työsylinterien mäntiä, jotka tuottavat korkean paineen. Nokka-akseli pyörii edestäpäin katsottuna myötäpäivään. Työtahti tapahtuu tasaisesti 90° välein. Huolimatta tasavälisistä työtahdeista, CP4 pumpun ominaisuuksiin kuuluvat suuret momenttihuiput.

Momenttihuiput ovat seurausta nokkien jyrkistä nousukulmista. Momenttihuippujen vaikutus pumpun käytettävyyteen korostuu yhä, koska momenttihuippuja esiintyy sekä momenttikeskiarvon plus- että miinuspuolella. Jyrkät nokat ovat edellytys sille, että korkea paine ja volyyymi pystytään tuottamaan nopeasti. Työsylinterit ovat suunniteltu mahdollisimman pitkiksi työsylintereissä tapahtuvien ohivuotojen minimoimiseksi (Klemt, 2021).

Vertailutiedoiksi saatiin erään vastaavan pumpun suoritusarvoja. Varaajan paineen ollessa noin 140 MPa ja pumpun pyörimisnopeuden 2100 r/min, keskimääräinen

vääntömomentti oli 14 Nm. Pumpun ottoteho oli tuolloin noin 3,0 kW. Momenttihuiput tuossa käyttötilanteessa olivat välillä +50 Nm ja -15 Nm. Huomioitavaa on, että mainittuja suoritusarvoja ei voi suoraan verrata mittaustenkin arvoihin, koska kyseisen käyttötilanteen kaikkia muuttujia ei tunneta (Klemt, 2021). Vertailuarvot antavat kuitenkin karkeasti kuvan momenttihuippujen suuruusluokasta. Mittauspenkin sähkömoottorin maksimi nimellisvääntömomentti on 72 Nm.

Pumpun nimellispyörimisnopeus on 3150 r/min. Pumppu kykenee tuottamaan maksimipaineen alkaen jo 1000 r/min pyörimisnopeudesta, jolloin pumpun maksimituotto on vähintään 0,83 litraa minuutissa. Pumpun tuottamaa painetta ja tilavuusvirtaa säädetään pumppuun integroidulla magneettiohjatulla MPROP-venttiilillä. Venttiilille johdetaan pulssimoduloitua sähkövirtaa (PWM) halutun ruiskutuspaineen mukaisesti (Vilenius, 2020). Pumpun maksimituotto on 2,5 litraa minuutissa (Klemt, 2021). Mittauspenkissä tarvittava tilavuusvirta on maksimissaan noin 0,53 litraa minuutissa mittausten suorittamiseksi (Salminen, 2019, s. 68).

Mittauspenkissä ensisijainen säädettävä muuttuja on ruiskutuspainetta, jota säädetään MPROP-venttiilin avulla. Pumpun pyörimisnopeus pidetään vakiona. Pumpun pyörimisnopeutta voidaan kuitenkin tarvittaessa muuttaa taajuusmuuttajan avulla vaivattomasti. Koeruiskutuksissa havaittiin, että mikäli ruiskutuspainetta nostettiin yli 100 MPa: n, alkoivat kiilahihnat värähdellä momenttihuippujen seurauksena. Koeruiskutusten perusteella korkeapainepumpun optimaalinen pyörimisnopeus on noin 2250 r/min. Tällöin hihnojen värähtelyt olivat pienimmillään.

Korkeapainepumpulle ei ole erillistä pyörimisnopeuden mittausta, mutta pyörimisnopeus kyetään määrittämään kertomalla taajuusmuuttajalta saatava sähkömoottorin pyörimisnopeus hihnapyörien välityssuhteella. Hihnapyörien välityssuhde on niiden jakohalkaisijoiden suhde: $100 / 71$. Esimerkiksi sähkömoottorin pyörimisnopeus 1600 r/min tuottaa korkeapainepumpun pyörimisnopeudeksi 2253 r/min. Käytännössä kiilahihnat luistavat hieman, jota ei ole otettu laskelmissa huomioon.

Bosch CP4N2 on tehokas ja kompakti korkeapainepumppu, joka kykenee tuottamaan korkean paineen ja suuren tilavuusvirran alhaisella pyörimisnopeudella. Tehokkuuden haittapuolena on pumpussa esiintyvät suuret momenttihuiput. CP4-pumpun pääominaisuudet on esitetty taulukossa 1.

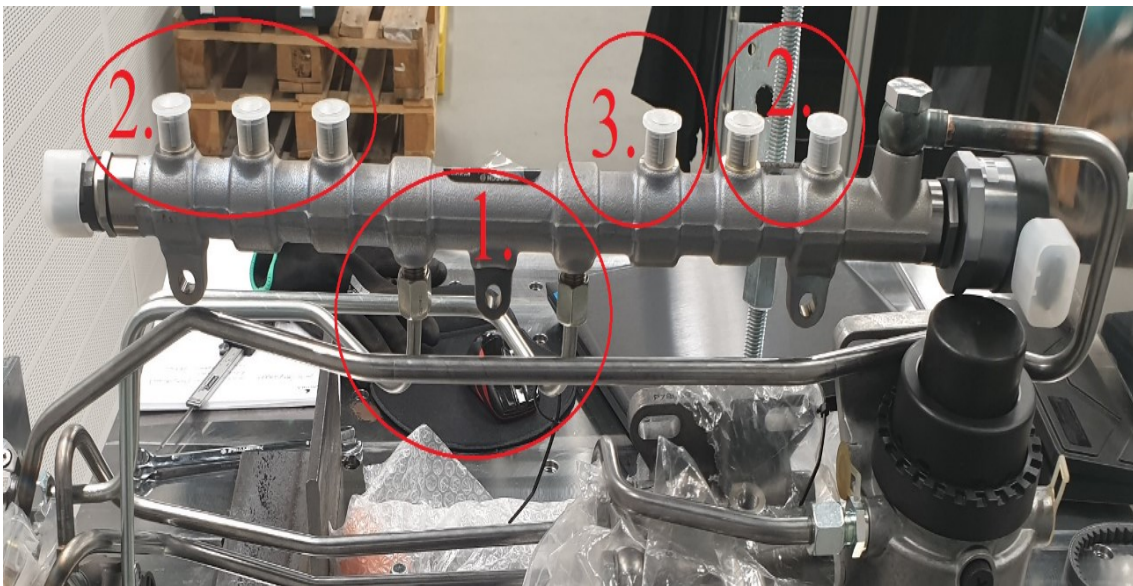
Taulukko 1. Bosch CP4N2 korkeapainepumpun pääominaisuudet (Klemt, 2021); (Salminen, 2019).

Bosch CP4N2	
Maksimipaine	200 MPa
Maksimituotto	2,5 L / min
Nimellis-pyörimisnopeus	3150 r/min
Maksimituotto alkaen	1000 r/min
Paineen ja tuoton säätömenetelmä	MPROP-venttiili
Ohjausjännite	12 VDC
Ohjausvirta, maksimi tuotto	0,4 A
Ohjausvirta, minimi tuotto	1,6 A
Laskennallinen tuottotarve mittauspennissä	0,53 L / min (@200 MPa)
Momenttipiikit keskiarvosta	+50 Nm / -15 Nm (@140MPa/3,0 kW)

3.4.2 Painevaraajat

Yhteispaineruiskutusjärjestelmän yksi suurimmista eduista on korkean ruiskutuspaineen tuottaminen kaikille ruiskutussuuttimille samanaikaisesti. Tämä yhdistettynä tarkasti ja nopeasti säätyviin ruiskutussuuttimiin mahdollistaa usean ruiskutustapahtuman suorittamisen sylinterissä yhden työtahdin aikana. Ruiskuttamalla yhden työtahdin aikana useita eri pituisia ruiskutuksia, saadaan moottorin hyötysuhdetta parannettua ja päästöjä vähennettyä (Perkins, 2021).

Mittauspenkin painevaraajat ovat kuusisyinteriselle moottorille tarkoitetut vakiomalliset painevaraajat. Painevaraajien valmistaja on Bosch. Korkeapainepumpulta saapuva polttoaine johdetaan ensimmäisen painevaraajan sisääntuloportteihin. Painevaraajien ylimääräisten tulo- ja lähtöporttien sulkemiseksi oli hankittu tarkoitukseen valmistettuja sulkutulppia. Sulkutulpat koostuvat kartiomallisesta suljinosasta, joka kiinnitetään painevaraajan porttiin M14 x 1,5 kierteisellä pyörömutterilla. Kuvassa 7 on esitetty ensimmäisen painevaraajan tulo- ja lähtöportit.



Kuva 7. Ensimmäinen painevaraaja: 1 Tuloportit. 2 Suljetut lähtöportit. 3 Lähtöportti jälkimmäiselle painevaraajalle.

3.4.3 Korkeapaineputket

Mittauspenkin kaikki korkeapaineputket on valmistettu ruostumattomasta teräksestä. Putkien sisähalkaisija on 3 mm ja ulkohalkaisija 8 mm. Putket on taivutteleamalla muotoiltu asentoon, jossa ne sopivat täsmällisesti vastinkomponentteihinsa. Putkien päät on muotoiltu 60° vakiokartioiksi. Kartioliitettä kiinnitetään vastinkomponentteihin pyörömutterin avulla. Tällä menetelmällä saadaan korkeapaineputki liitettyä tiiviisti

vastinkomponenttiinsa. Tämä on yleinen putkien liitântätapa ruiskutuslaitteistoissa (Rocken Tech Products Inc, 2021). Korkeapaineputkien kiinnitysperiaate on esitetty kuvassa 8.



Kuva 8. Korkeapaineputkien kiinnitysperiaate: Kartio 60°, M14x1,5 sisäkierteinen pyörömutteri.

Mittauspenkissä on yhteensä neljä korkeapaineputkea. Kaksi putkea kulkee korkeapainepumpun työsylintereiltä ensimmäiselle painevaraajalle. Yksi putki kulkee ensimmäiseltä painevaraajalta jälkimmäiselle painevaraajalle ja viimeinen putki kulkee jälkimmäiseltä painevaraajalta ruiskutusventtiilille. Käytetyistä putkista kolme on vakiokomponentteja ja ne on muotoiltu sopimaan Agco Powerin kuusisylinterisen moottorin ruiskutuslaitteiston asetteluun. Korkeapaineputkien pyörömuttereiden sisäkierteet ovat kaikissa mittauspenkin liitoksissa kokoa M14 x 1,5. Poikkeuksena on korkeapainepumpun lähtöliitännät, joiden sisäkierrmitta on M16 x 1,5.

Painevaraajat yhdistävää korkeapaineputkea ei ollut valmiina saatavissa. Alustava suunnitelma oli hankkia painevaraajien yhdistämiseksi joustava korkeapaineletku, mutta esteeksi muodostui säännösten määräämä lyhyehkö kolmen vuoden käyttöikä ja korkea

kustannus (Boström, 2020). Näin ollen painevaraajat yhdistävä korkeapaineputki päätettiin tilata mittatilaustyönä teräsputkesta valmistettuna. Putkimateriaalin halkaisijatiedot ovat vakiintuneita ja putken muut mittatiedot saatiin mittauspennistä. Putki mallinnettiin ja siitä laadittiin piirustus. Valmistaja Rocken Tech Products Inc, toimitti määritetyn putken piirustuksen mukaisesti.

3.4.4 Ruiskutusventtiili

Solenoidiohjatun ruiskutusventtiilin pääosat ovat runko, ohjausventtiili, ohjauskammio, suutinneula ja suutinkärki. Polttoaine syötetään sivusyöttöputken kautta ruiskutusventtiilin rungossa olevaan tuloporttiin, josta polttoaine etenee ohjausvaiheen jälkeen suutinneulalle. Normaalisissa moottorikäytössä suutinneula avautuu ja sulkeutuu solenoidin ja paineen vaikutuksesta. Solenoidia ohjataan moottorinohjausjärjestelmällä (Isola, 2017, ss. 24-26).

Mittauspennissä polttoainetta ruiskutetaan mittaustapahtumassa yhden ruiskutusventtiilin kautta ruiskutuskammioon yhtäjaksoisesti yhden minuutin ajan. Ruiskutusventtiiliä on muokattu mittauspennin tarkoitukseen sopivaksi poistamalla siitä suutinneula. Lisäksi solenoidia on kytketty sähköisesti. Näin ollen mittauspennissä polttoaine kulkee suuttimen läpi jatkuvana virtauksena. Ruiskutusventtiili on esitetty kuvassa 9.



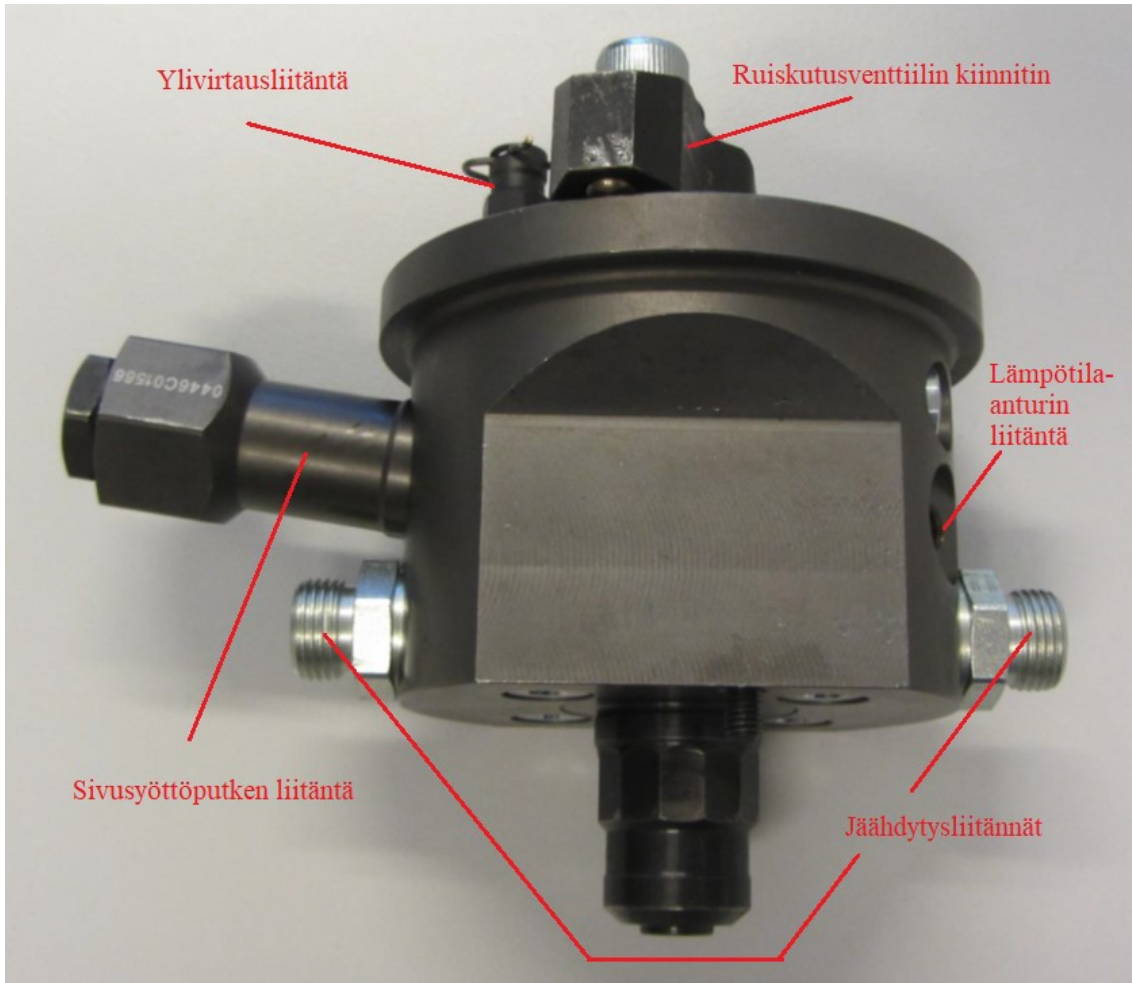
Kuva 9. Ruiskutusventtiili.

3.4.5 Ruiskutusventtiilin adapteri

Ruiskutusventtiilin täytyy olla tukevasti ja tiiviisti kiinnitettynä alustaansa. Korkealla paineella saapuva polttoaine ei saa vuotaa liitänäkohdista ja ruiskutusvirtauksen on kohdistuttava voima-anturille samassa asennossa koko mittaustapahtuman ajan.

Mittauspenkkiin oli hankittu erillinen adapteri tätä tarkoitusta varten. Adapteri on koneistettu ruiskutusventtiilin mittoihin sopivaksi ja ruiskutusventtiili asennetaan osittain adapterin lävitse ja lukitaan paikoilleen kiinnitysmekanismeilla. Adapterin avulla polttoaineen sivusyöttöputki saadaan kiinnitettyä ruiskutusventtiiliin täsmällisesti. Adapterissa on polttoaineen ylivirtausliitäntä, mutta koska ruiskutusventtiilistä on suutinneula poistettu, ylivirtausta ei synny ja kaikki polttoaine virtaa ruiskutuskammioon. Ylivirtausliitäntä on kuitenkin yhdistetty kumiletkulla adapterilta ensimmäisen painevaraajan ylivirtausputkeen.

Ruiskutustapahtumassa polttoaineen lämpötila nousee voimakkaasti paineen vaikutuksesta ja ruiskutusventtiiliä on jäähdytettävä. Adapteri on valmistettu siten, että sen sisällä olevien kanavien kautta adapteriin voidaan johtaa jäähdytysnestettä. Ruiskutusventtiilin ja polttoaineen lämpötila pystytään pitämään siten riittävän alhaisena. Jäähdytysliitännät on asetettu lähelle adapterin alatasoa, jotta jäähdytystä tapahtuu mahdollisimman lähellä suutinreikää. Jäähdytysnesteen lämpötilaa voidaan seurata adapteriin kytkeytyllä lämpötila-anturilla. Ruiskutusventtiilin adapteri on esitetty kuvassa 10 (Isola, 2017).



Kuva 10. Ruiskutusventtiilin adapteri (Isola, 2017).

3.5 Matalapainepiiri

Mittauspenkin matalapainepiirin pääkomponentit ovat ruiskutuskammio, polttoaineen mittaus säiliö, polttoainesäiliö, polttoainepumput, lämmönvaihdin sekä suodattimet. Matalapainepiirissä vallitsee noin yhden ilmakehän paine (0,1 MPa), riippumatta onko mittaus tapahtuma käynnissä vai ei. Kokonaisuudessaan polttoainepiiri on suljettu ja matalapainepiiriin palautuu sama määrä polttoainetta kuin mitä sieltä poistuu korkeapaine- piirille. Matalapainepiirin paine pysyy näin vakiona. Matalapainepiirissä on yksi mittaus- piste paineen mittaamiseksi sijoitettuna ruiskutuskammioon. Korkea- ja

matalapainepiirien välissä toimii polttoaineen syöttöpumppu. Syöttöpumppu kuuluu matalapainepiiriin, mutta sen tuottama syöttöpaine korkeapainepumpulle on noin 0,6 MPa.

3.5.1 Ruiskutuskammio

Ruiskutuskammio toimii korkea- ja matalapainepiirin rajapintana. Ruiskutusventtiili ja suutinkärki ulottuvat adapterin lävitse ruiskutuskammioon. Voima-anturi on kiinnitetty erillisellä pidikeholkilla ruiskutuskammion sivuun. Polttoainesuihku purkautuu suutinreiästä ja osuu voima-anturin mittapäähän. Voima-anturin vaihtoehtoisessa kiinnitystavassa voima-anturi on sijoitettuna ruiskutuskammion ulkopuolella ja polttoainesuihku osuu voiman välittävään työntötankoon.

Suutinreiän sisääntulossa polttoaineen paine on korkea. Ruiskutusaine on kulloisenkin mittaustilanteen mukaisesti säädetty, esimerkiksi 100 MPa. Suutinreiän ulostulon jälkeen polttoaineen paine laskee nopeasti. Koemittauksissa ruiskutuskammiossa mitatut paineet olivat tasaisesti noin 0,1 MPa, vaikka koemittauksia tehtiin eri ruiskutusaineilla. Mittaussäiliön hana oli tällöin auki ja polttoainekierto oli jatkuva.

Ruiskutuskammioilla on kolme pääasiallista toimintoa:

- Mahdollistaa ruiskutuskammioon kiinnitetyn voima-anturin kohdistamisen ruiskutusvirtauksen linjalle
- Toimia pienenä polttoainesäiliönä, jotta ruiskutus tapahtuu nestepinnan alapuolelle, syttymisvaaran vähentämiseksi.
- Mahdollistaa voima-anturin kiinnittämisen osittain polttoainepiirin sisäpuolelle ja osittain ulkopuolelle

Ruiskutusventtiili ja adapteri olivat valmiita komponentteja ja niiden toimintaan tai rakenteeseen ei voinut tehdä muutoksia. Ruiskutuskammio oli suunniteltava ja mitoitettava ruiskutusventtiiliin ja adapteriin sopivaksi. Tämä asetti rajoituksia ruiskutuskammion koolle ja muodolle.

Voima-anturi on kiinnitetty kaksikerroksisen pidikeholkin sisään. Sisempi kuori kiinnittyy voima-anturin välityksellä metalliseen päätylieriöön. Päätylieriö oli teetätetty Kellosepäkoulun hienomekaniikkalinjalla. Sisemmät komponentit liikkuvat ulomman kuoren sisällä. Päätylieriö toimii O-renkaiden kanssa tiivistävänä komponenttina. Tämä rakenne mahdollistaa voima-anturin kohtisuoran syvyysäädön ruiskutusvirtaukseen ulostuloaukkoon nähden. Kuvatuilla rakenteilla voima-anturin mittapää saatiin asennettua ruiskutuskammion sisään ja samanaikaisesti voima-anturin toinen pää jäi ruiskutuskammion ulkopuolelle ja signaalijohdin voitiin kiinnittää.

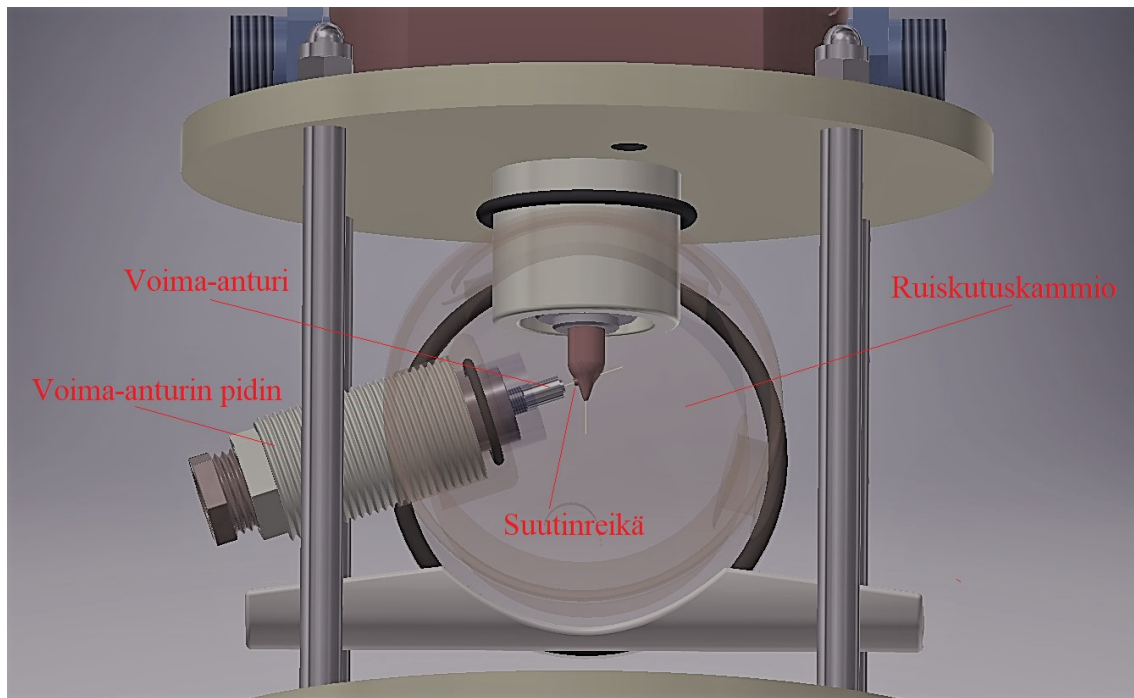
Voima-anturin vaihtoehtoisessa kiinnitystavassa hyödynnettiin samaa ruiskutuskammion rakennetta sekä päätylieriötä kuin ensimmäisessä kiinnitystavassa. Ainoastaan voima-anturin pidikeholkki mitoitettiin eri lailla siten, että voima-anturi sijoittuu ruiskutuskammion ulkopuolelle. Tällöin suihkun aiheuttama voima välittyy voima-anturin mittapäähän työntötangon välityksellä. Työntötanko on tiivistetty pidikeholkkiin O-renkaalla. O-renkaan aiheuttama vaikutus mitattavaan voimaan arvioitiin merkityksettömäksi, koska voima-anturin mittapään pitkittäisliike on suuruudeltaan ainoastaan millimetrin kymmenesosa.

Ruiskutuskammio on umpinainen, ontto lieriö, jonka nimellisulkohalkaisija on 74 mm ja sisätilavuus on noin 135 cm³. Ruiskutuskammiossa on aukot voima-anturille, ruiskutusventtiilille, paineanturille sekä polttoaineen poistokanavalle. Ruiskutusventtiilin aukko on ovaalin muotoinen. Polttoaineen poistokanava suuntautuu alaviistoon, voima-anturin vastakkaiselle puolelle. Polttoaineen poistokanavan letku on asetettu kulkemaan ruiskutuskammiota ylempänä ja mittaustilanteessa ruiskutuskammio täyttyy polttoaineesta.

Staattisen paineen ylittäessä poistoletkun paineen, polttoaine jatkaa kulkuaan mittaus-säiliöön.

Vaadittujen toimintojen ja hankalasti valmistettavien yksityiskohtien takia, ruiskutus-kammio päätettiin toteuttaa 3D-tulostustekniikalla. 3D-tulostus on materiaalia lisäävää valmistusta, jolla voidaan valmistaa sellaisia monimutkaisia muotoja, joita ei pystytä val-mistamaan esimerkiksi perinteisellä metallin koneistuksella.

Nykyaikaiset 3D-tulostimet ja tulostusmateriaalit mahdollistavat valmistetuille kom-ponenteille korkeat lujuus- ja lämmönkestoarvot. Ruiskutuskammio on valmistettu PA2200 – Polyamidi 12 materiaalista selective laser sintering (SLS) tekniikalla. Materiaa-lin tiheys on 930 kg/m³ ja sulamispiste 176 celsiusastetta (Origo Engineering, 2021). Ruiskutuskammion havainnekuva on esitetty kuvassa 11.



Kuva 11. Ruiskutuskammio, voima-anturin mittapää sijoitettuna ruiskutuskammion sisään.

3.5.2 Ruiskutuskammion telakointiasema

Ruiskutuskammiota varten oli suunniteltava eräänlainen telakointiasema, jonka sisään ruiskutuskammio voitiin asettaa ja voima-anturin asentoa säätää. Telakointiaseman pääkomponentit ovat kansi- ja pohjalieriöt sekä ruiskutuskammion pidin. Telakointiasemalle oli suunniteltava pöytäkiinnitin, jonka tehtävä on sitoa yhteen koko telakointiasema ja ruiskutusventtiilin adapteri. Muutoin muovitulosteissa olevat ruuvikierteet saattaisivat rikkoutua ajan kuluessa. Pöytäkiinnitin mahdollistaa telakointiaseman liikuttamisen, jotta sisään tuleva korkeapaineputki voidaan kohdistaa tarkasti sivusyöttöputkeen.

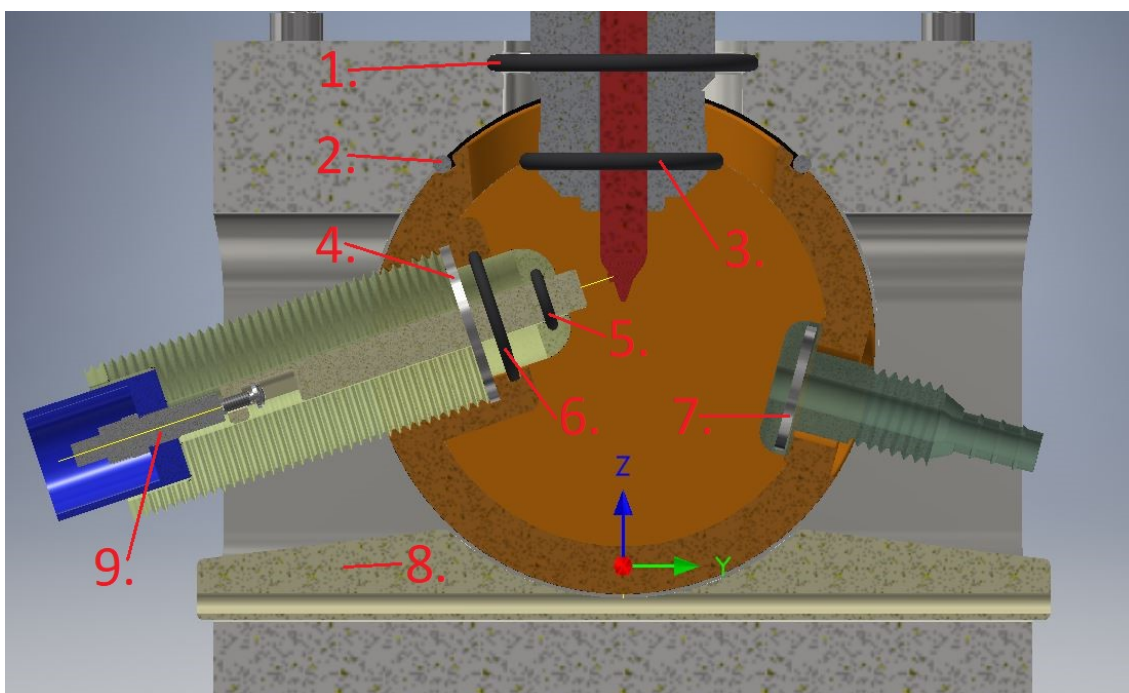
Ruiskutuskammio ja voima-anturi liikkuvat pitimen sisässä X-akselin suhteen. Liikkuminen mahdollistaa voima-anturin kohdistamisen haluttuun asentoon ruiskutuskulmaan nähden, oletuksena on kohtisuoruus suuttimen ulostuloaukkoon nähden. Suuttimen ruiskutuskulma on $76,1^\circ$ alaviistoon ruiskutusventtiilin pystyakseliin nähden (Salminen, 2019, s. 36).

Voima-anturin kiinnitys ruiskutuskammioon olisi voitu suunnitella pysyvästi $76,1^\circ$ arvoon, jolloin telakointiaseman rakennetta olisi voitu yksinkertaistaa. Tuolloin kuitenkin muiden liittyvien komponenttien asento täytyisi säilyä varmuudella muuttumattomina. Päätettiin toteuttaa säädettävä rakenne. Säädettävä rakenne monipuolistaa mittausmahdollisuuksia esimerkiksi tilanteessa, jossa suutinmalli vaihdetaan toisen tyyppiseen. Ruiskutuskammion pitimeen suunniteltiin lisäksi ruuvisäätömekanismi, mutta O-renkaiden aiheuttamien kitkavoimien takia säätötilanteessa ruiskutuskammion liikuttelua X-akselin suhteen on avustettava manuaalisesti käsin.

Ruiskutuskammion pidin puolestaan liikkuu kansi- ja pohjalieriöiden välissä Z-akselin suhteen. Lisäksi pidintä voidaan liikuttaa ylös / alas suunnassa telakointiaseman pohjassa olevalla ruuvimekanismilla. Voima-anturin asentoa voidaan säätää neljässä eri suunnassa suuttimen ulostuloaukkoon nähden. Ruiskutuskammion X-akselin suuntainen kohdistus on mitoitettu keskelle ruiskutussuutinta ja on näin ollen kiinteä.

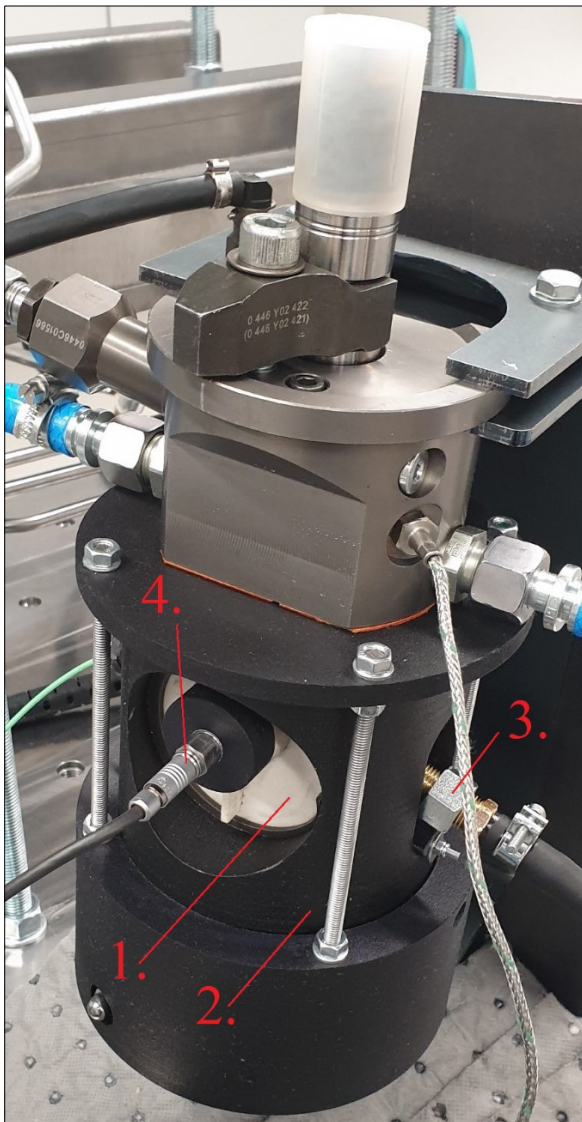
Käytännössä voima-anturin lopullinen kohdistaminen tehdään liikuttamalla voima-anturin pidintä ruiskutuksen ollessa käynnissä. Mittauslukemaa seurataan reaaliaikaisesti signaalivahvistimen näytöltä ja suurimman voimalukeman kohdalla, voima-anturin kohdistus lukitaan. Ruiskutuskammion pitimessä on kolme eri lukitusruuvia, joilla pidin lukitaan paikoilleen.

Ruiskutuskammion pidin on valmistettu 3D-tulostustekniikalla PA12 materiaalista. Liiketojen mahdollistamiseksi ruiskutuskammion aukko ruiskutusventtiiliä varten suunniteltiin ovaalin muotoiseksi. Ovaalin aukon ympärille suunniteltiin normaali O-rengasura tiiviiden varmistamiseksi. Tiivistys osoittautui hyvin hankalaksi, koska koemittauksissa havaittiin, että polttoainetta vuotaa hyvinkin pienistä raoista. Tiiveys ovaalissa aukossa varmistettiin suunnittelemalla korotuskiila ruiskutuskammion ja pitimen väliin. Korotuskiila puristaa ruiskutuskammion yläpintaa pidintä vastaan ja O-rengas puristuu tasaisesti. Ruiskutuskammion tiivistys on esitetty kuvassa 12.



Kuva 12. Ruiskutuskammio, voima-anturin mittapää ruiskutuskammion ulkopuolella. 1 O-rengas, pidin. 2 O-rengas, ovaali. 3 O-rengas, ruiskutusventtiili. 4 Päätytiiviste, voima-anturin pidin. 5 O-rengas, työntötanko. 6 O-rengas, voima-anturin pidin. 7 Usit-tiiviste, poistoaukko. 8 Korotuskiila. 9 Voima-anturi.

3D-tulosteet ovat periaatteessa hyvin mittatarkkoja, mutta täysin koneistusta vastaavaa mittatarkkuutta ei voida odottaa. Tulostustapahtuma kestää yleensä useita kymmeniä minutteja tai jopa useita tunteja. Tulostusparametreillä ja lämpötiloilla on suuri vaikutus lopputulokseen. Haasteeksi osoittautui 3D tulostettavien komponenttien mitoitus siten, että toisiinsa liitettävien komponenttien välykset olivat hankalia määrittää tarkasti. Suurikokoiset komponentit, jotka sisältävät aukkoja tuottavat eri mittatarkkuuden kuin pienikokoiset komponentit, joissa ei ole suuria aukkoja (Henttinen, 2020). Ruiskutuskamion telakointiasema on esitetty kuvassa 13.



Kuva 13. Telakointiasema: 1 Ruiskutuskammio. 2 Kammion pidin. 3 Poistokanava. 4 Painanturi.

3.5.3 Ruiskutetun polttoaineen mittaussäiliö

Mittauspenkissä mitattavat suureet ovat massavirta ja suihkun aiheuttama voima. Mittaustilanteessa polttoaine siirtyy ruiskutuskammioista kumiletkun kautta mittaussäiliöön. Mittaussäiliön alle on asetettu vaaka, jolla siirtyneen polttoaineen massa voidaan mitata. Mittaussäiliön alakulmissa on kumityydyntäjä tärinöiden vaimentamiseksi. Yläkannessa on avattava luukku, josta voidaan tehdä tarkastuksia. Poistoletkussa on sulkuventtiili. Sulkuventtiili asetetaan kiinni-asentoon, kun polttoaineen massavirtaa mitataan. Sulkuventtiilin ollessa kiinni-asennossa on huomioitava, että mittaussäiliön painen nousee hieman kerääntyneen polttoaineen ansiosta. Mittaussäiliön mitat ovat 30 cm x 30 cm x 21 cm ja sen tilavuus on noin 21 litraa.

3.5.4 Polttoainesäiliö

Polttoainesäiliönä käytetään muovista valmistettua, yleiskäyttöön tarkoitettua säiliötä. Säiliö asetettiin pöytätason alapuolelle ja kiinnitettiin terässpannoilla ja lukitusliinoilla paikoilleen. Säiliön tilavuus on noin 35 litraa. Järjestelmään on täytetty polttoainetta kaikkiaan noin 20 litraa. Polttoaineen lämpötilan mittaus sijoitettiin säiliön sisään metallisella taskulla. K-tyyppin termopari mittaa polttoaineen lämpötilaa olematta fyysisesti kosketuksessa polttoaineeseen. Polttoainesäiliön täyttökorkissa on pieni ilmausruuvi, jolla voidaan tarvittaessa tasata säiliön painetta.

3.5.5 Polttoaineen siirto- ja syöttöpumppu

Mittauspenkin polttoainejärjestelmässä on kaksi erillistä polttoainepumppua.

- Siirtopumppu, siirtää polttoaineen säiliöstä esisuodattimelle
- Syöttöpumppu, syöttää polttoaineen pääsuodattimesta korkeapainepumpulle.

Polttoaineen siirtopumppu on paineilmalla toimiva kalvopumppu, joka siirtää polttoainetta polttoainesäiliöstä esisuodattimelle. Paineilma saa pumpun sisällä olevan kalvon liikkumaan edestakaisin ja polttoaineen virtaamaan. Paineilmaa syötetään siirtopumpulle kiinteistön paineilmaverkosta. Paineilman määrää säädellään täysin manuaalisesti paineilmaverkoston sulkuventtiilillä. Kun lisätään syötetyn paineilman määrää, siirtopumpun tuotto ja paine kasvavat. Siirtopumpun toimintaperiaatteen takia pumppu aiheuttaa siirrettävään polttoaineeseen jaksottaisia painesykäyksiä. Tällaiset painesykäykset saattavat vaikuttaa polttoainepiirissä edempänä olevan syöttöpumpun tuottamaan paineeseen ei-toivottuja vaihteluita. Ilmiötä voidaan hallita rajoittamalla paineilman määrää minimiinsä, huomioiden kuitenkin polttoaineen riittävä kierto lämmönvaihtimessa. Polttoaineen siirtopumppu on esitetty kuvassa 14.

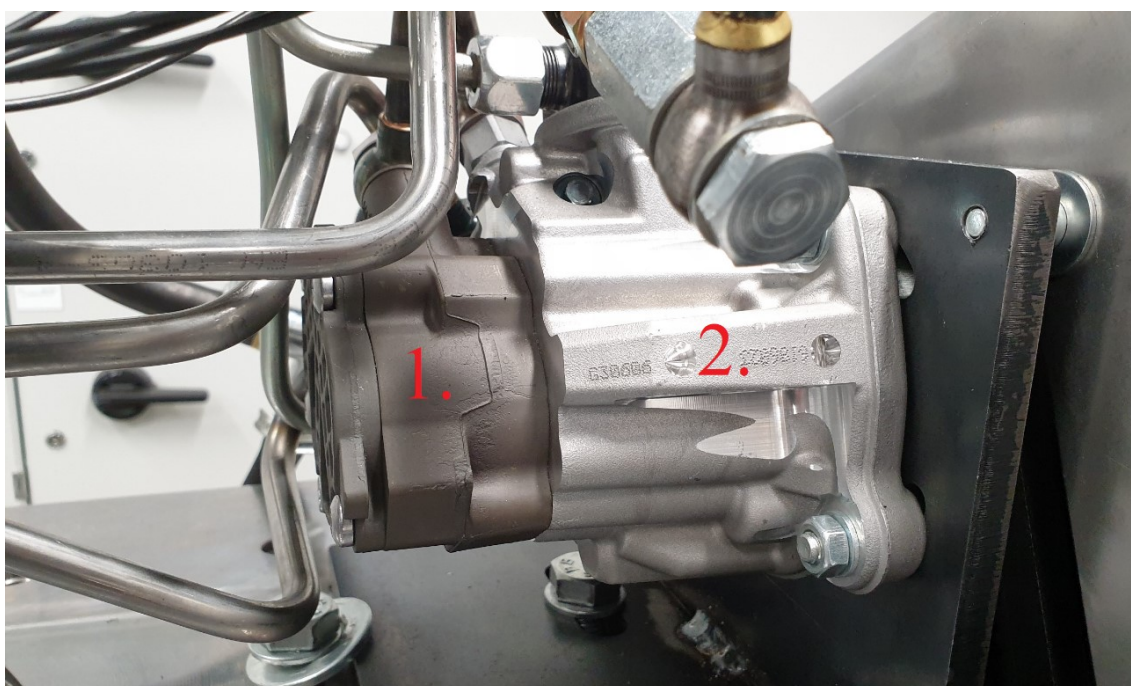


Kuva 14. Polttoaineen siirtopumppu.

Korkeapainepumpun yhteyteen on integroitu hammasratas -tyyppinen polttoaineen syöttöpumppu. Syöttöpumppu saa käyttövoimansa korkeapainepumpun nokka-akselilta. Syöttöpumpun tarkoitus on imeä polttoainetta esisuodattimelta ja syöttää sitä pääsuodattimen kautta korkeapainepumpulle noin 0,6 MPa paineella. Erillinen painemittari asennettiin polttoaineen pääsuodattimen yhteyteen, jotta syöttöpumpun tuottamaa painetta voidaan seurata.

Mittauspenkkiä käytettäessä on huomioitava, ettei esisuodattimelle ja sitä kautta syöttöpumpulle toimitetun polttoaineen paine nouse liian korkeaksi. Tämä on mittauspenkissä mahdollista lisäämällä polttoainepiirissä aikaisemmin olevan siirtopumpun tuottoa.

Mikäli saapuvan polttoaineen paine on liian suuri, voi syöttöpumpun hammasrattaat va-
hingoittua ja siitä voi aiheutua häiriöitä korkeapainepumpun tuottamaan paineeseen.
Lisäksi koemittauksissa havaittiin, että polttoaineen esisuodattimen kiristin alkaa vuotaa
siirtopaineen kasvaessa. Oikea polttoaineen syöttöpaine syöttöpumpulle on 50–100 kPa
(Klemt, 2020b). CP4 korkeapainepumpun yhteyteen integroitu syöttöpumppu on esi-
tetty kuvassa 15.



Kuva 15. Bosch CP4: 1 polttoaineen syöttöpumppu, 2 korkeapainepumppu.

3.5.6 Polttoaineen suodatusjärjestelmä

Nykyaikaisissa dieselmootoreissa polttoaineen ruiskutuspainet ovat korkeita polttoai-
netaloudellisuuden parantamiseksi. Tällaiset ruiskutuslaitteistot vaativat hyvin korkeaa
polttoaineen suodatusta, ja polttoaineessa ei sallita juuri lainkaan partikkeleita tai vettä.
Taulukossa 2 on esitetty ISO 4406: 2017 standardiin perustuva hiukkaskoon ja -määrän
luokitusmenetelmä, jolla määritetään polttoaineen suodatukselle asetettuja vaatimuk-
sia. Liikennekäytössä dieselpolttoaineelle suositellaan tyypillisesti ISO 19/17/14 mu-
kaista luokitusta (Mann-Filter, 2021); (Parker, 2021).

Taulukko 2. Polttoaineen suodattimien ominaisuuksia (Mann-Filter, 2021).

Moniastesuodatin- materiaali	Suodatuskyvyn taso ISO 19 (438)	
	4 µm (c)	6 µm (c)
	≥ 10 %	≥ 30 %
Esisuodatin veden erotuksella	Suodatuskyvyn taso ISO/TR 16 (332)	
	Vesi	
	≥ 93 %	

Mittauspenkin polttoainejärjestelmässä on kaksi varsinaista suodatinyksikköä. Niiden tarkoitus on varmistaa, että ruiskutuslaitteistoon ei pääse epäpuhtauksia. Epäpuhtaudet kuluttavat ja tukkeuttavat hienomekaanisia komponentteja.

Mittauspenkissä polttoaine saapuu ensin esisuodattimelle, joka erottelee polttoaineesta veden ja tekee ensimmäisen suodatuksen partikkeleille. Esisuodattimen yhteyteen on integroitu manuaalinen käsipumppu järjestelmän täyttämistä ja ilmaamista varten. Seuraavassa vaiheessa polttoaine siirtyy pääsuodattimelle, joka suorittaa lopullisen suodatuksen ennen korkeapainepumppua.

Varsinaisten suodattimien lisäksi on polttoainesäiliön imuputken läpivientiin asennettu pieni verkkosuodatin. Koemittauksissa havaittiin, että tämä verkkosuodatin siivilöi tehokkaasti asennuksesta aiheutuneita epäpuhtauksia. Polttoaineen esi- ja pääsuodatin on esitetty kuvassa 16.



Kuva 16. Polttoaineensuodatus: 1 Esisuodatin. 2 Pääsuodatin. 3 Kirstinrenkas. 4 Käsipumppu. 5 Sytötpumpun painemittari.

3.6 Jäähdytysjärjestelmä

Polttoaineen lämpötila nousee korkeimmilleen ennen purkautumistaan suutinreiän ulostulosta. Korkeapaineputkeen lähelle ruiskutusventtiiliä asennettiin paineanturi, joka sisältää myös lämpötilan mittauksen. Anturi sijaitsee kuitenkin niin etäällä ennen suutinreikää, että polttoaineen lämpötila nousee hieman vielä anturin mittauspisteen jälkeen. Koemittauksissa lämpötilaksi mitattiin anturilla noin 40 celsiusastetta korkeimmillaan. Arvioimalla voitiin todeta, että lämpötila mittaussäiliössä oli tätä arvoa suurempi, korkeimmillaan noin 50 celsiusastetta. Mittaussäiliön lämpötilaa arvioitiin mittaamalla säiliön ulkopinnan lämpötila infrapunalämpömittarilla ja termoparilla.

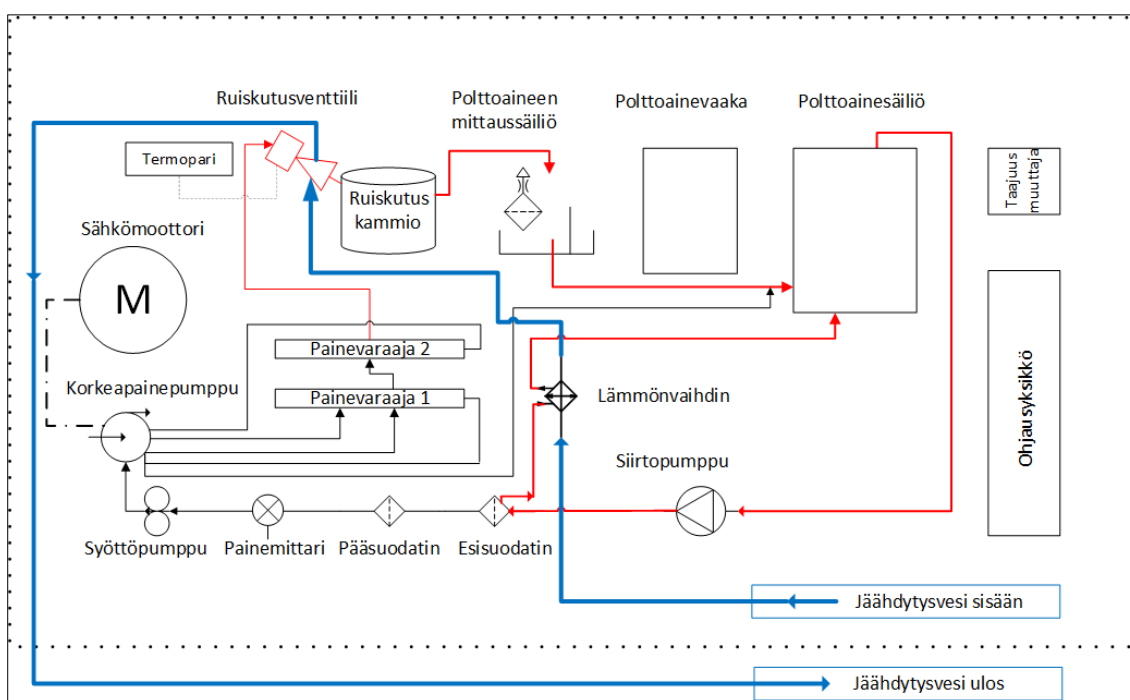
Järjestelmän käyttölämpötilaksi matalapainepiirissä oli määritetty 40 celsiusastetta. Tämä on dieselöljyn höyrystymislämpötila 0,1 MPa paineessa. Polttoaineen lämpötila nousee mittauskammiossa hetkellisesti yli 40 celsiusasteen. Mittaussäiliöön ei suoraan voida asentaa jäähdytystä, koska ruiskutetun polttoaineen massan mittaus on osa koejärjestelyä ja jäähdytysneste haittaisi massan mittausta. Mahdollista höyrystynyttä polttoainetta ei kuitenkaan pääse hengitysilmaan, koska polttoainepiiri pidetään suljettuna.

Jäähdytysveden kierto toteutettiin siten, että jäähdytysvesi virtaa ensin lämmönvaihtimeen, jossa vesi jäähdyttää polttoainesäiliön ja esisuodattimen välillä jatkuvasti kiertävää polttoainetta. Lämmönvaihtimessa lämpöä siirtyy lämpimästä polttoaineesta kylmään jäähdytysveteen. Tämän jälkeen jäähdytysvesi johdetaan ruiskutusventtiilin adapteriin, jossa ruiskutussuutin sijaitsee. Adapterin jäähdytys hillitsee polttoaineen lämmön nousua adapterissa, missä lämpötila on korkeimmillaan. Jäähdytysvesi johdetaan adapterin jälkeen lattiakaivoon.

Tämä järjestely todettiin tehokkaimmaksi menetelmäksi, koska jäähdytysvesi on kylmimmillään virratessaan lämmönvaihtimen läpi. Polttoaineen siirtopumppu kierrättää polttoainetta keskeytyksettä suurella volyymilla esisuodattimen ja polttoainesäiliön välillä. Tällä tavoin polttoainesäiliössä oleva polttoaine kiertää jatkuvasti lämmönvaihtimessa pitäen polttoaineen lämpötilan alhaisena. Lämmönvaihtimen jälkeen jäähdytysvesi

johdetaan adapteriin, joka on järjestelmän kuumin kohta. Jäähdytykseen käytetään kiinteistön vesijohtovettä, jonka lämpötila saadaan säädettyä alimmilleen noin 7 celsiusasteeseen. Ennen mittaustapahtuman alkua vesipisteen hana aukaistaan ja veden kierto pidetään käynnissä mittaustapahtuman loppuun saakka.

Jäähdytysjärjestelmässä ei ole varsinaista korroosion estoa lämmönvaihtimelle ja ruiskutusventtiilin adapterille käytettäessä normaalia hanavettä jäähdytysnesteinä. Kun mittauspenkkiä ei käytetä, kannattaa järjestelmä täyttää korroosionestoaineita sisältävällä glykolilla. Jäähdytysjärjestelmän yksinkertaistettu kaavio on esitetty kuvassa 17. Jäähdytysputket on merkitty kuvaan sinisellä, lämpimän polttoaineen putket on merkitty punaisella.



Kuva 17. Jäähdytysjärjestelmän yksinkertaistettu kaavio.

3.6.1 Jäähdytystase

Lämmönvaihtimessa on kaksi toisistaan eristettyä nesteen kiertopiiriä. Toisessa piirissä kiertää kuuma polttoaine ja toisessa kylmä jäähdytysvesi. Kuuma kiertopiiri on asetettu

kiertämään kylmän piirin sisällä, jolloin lämpöä siirtyy polttoaineesta jäähdytysveteen. Lämmönvaihtimena käytetään Bowman DC90-XAA putkimallista polttoainejäähdytintä. Jäähdytyksen järjestelmästä poistama lämpövirta Q lasketaan kaavalla

$$Q = \dot{m}c_v(T_2 - T_1), \quad (3)$$

missä \dot{m} merkitsee jäähdytysveden massavirtaa, c_v veden ominaislämpökapasiteettia, T_1 jäähdytysnesteen sisäänvirtauslämpötilaa ja T_2 jäähdytysnesteen ulosvirtauslämpötilaa.

Mittauspenkin lämmöntuottoa arvioitiin korkeapainepumpun kokonaisottotehon ja ruiskutukseen kuluvan tehon erotuksena. Ideaalitalanteessa korkeapainepumpun hyötysuhde olisi 100 %, jolloin kaikki ottoteho kuluisi ruiskutukseen. Toisena ääriarvona hyötysuhteelle käytettiin arvoa 55 %. Näiden hyötysuhteiden mukaisten ottotehojen erotusta käytettiin arvioinnin perusteena. Laskentakaavana käytettiin lauseketta (Salminen, 2019, s. 54).

$$P_{\text{axle}} = \frac{q_v \cdot \Delta p_p}{\eta}, \quad (4)$$

missä P_{axle} tarkoittaa korkeapainepumpun akselitehoa, q_v on polttoaineen tilavuusvirtaa, Δp_p paine-eroa ja η korkeapainepumpun hyötysuhdetta.

Mittausatilanteessa, jossa jäähdytysveden massavirta oli noin 12 kg / minuutissa, jäähdytysveden ulos- ja sisäänvirtauslämpötilat olivat 8,0 ja 7,0 celsiusastetta lämmönvaihtimella. Ulos- ja sisäänvirtauslämpötilat ruiskutussuuttimen adapterilla olivat 9,0 ja 8,0 celsiusastetta. Kokonaisjäähdytystehoksi saatiin 1,6 kW.

Järjestelmän maksimilämmöntuotoksi arvioitiin 200 MPa paine-erolla ja 0,53 L / min tilavuusvirralla 1,5 kW. Tämän perusteella voitiin arvioida, että riittävä jäähdytysteho saavutettiin, eikä polttoaineen lämpötila nouse kumulatiivisesti. Huomioitavaa on, että

ainoastaan ruiskutusventtiilin adapterissa on kiinteä lämpötila-anturi ja muiden mittauspisteiden lukevat on mitattu ulkopuolisilla menetelmillä ja voivat poiketa todellisista. Lämpövirran säteilyä tai vapaata konvektiota ympäristöön ei otettu huomioon laskelmassa. Korkeapainepumpun laskennallinen maksimi lämmöntuotto on esitetty taulukossa 3. Taulukossa 4 on esitetty jäähdytysjärjestelmän suoritusarvot koemittauksessa.

Taulukko 3. Korkeapainepumpun tuottama laskennallinen maksimilämpövirta.

CP4	Paine-ero	Ruiskutuksen tilavuusvirta	Kokonaisottoteho ($\eta=0,55$)	Ruiskutukseen kulunut teho ($\eta=1,00$)	Arvioitu lämpötuotto
	200 MPa	0,53 L / min	3,2 kW	1,7 kW	1,5 kW

Taulukko 4. Jäähdytysteho lämmönvaihtimessa ja ruiskutusventtiilin adapterilla.

Jäähdytysjärjestelmä	Jäähdytys massavirta	T _{out}	T _{in}	Jäähdytys teho
Lämmönvaihdin	12 kg / min	8,0 °C	7,0°C	0,8 kW
Ruiskutussuuttimen adapteri	12 kg / min	9,0 °C	8,0°C	0,8 kW
Yhteensä				1,6 kW

3.7 Sähkömoottori

Mittauspenkin sähkömoottorina käytetään ABB: een valmistamaa 11 kW: n tehoista oikosulkumoottoria. Moottori toimii 3-vaihe sähköllä, käyttötaajuus on 50–60 Hz ja pääjännite on 400 VAC. Moottori on 4-napainen ja sen nimellispyörimisnopeus kuormittamattomana on 50 Hz:llä 1500 r/min. Nimellistäntömomentti on 72 Nm. Moottorin

runkokokoko on 160M. Moottori on niin kutsuttu jalka- ja laippamoottori (ABB, 2021). Taajuusmuuttajan avulla sähkömoottorin pyörimisnopeutta voidaan helposti säätää välillä 1200–1700 r/min. Tämä vastaa taajuusmuuttajalla noin 40–57 Hz lähtötaajuusarvoja. Sähkömoottori toimii mittauspenkissä kolmiokytkennässä (Kiikeri, 2020).

Koemittauksissa havaittiin, että kiilahihnat värähtelevät voimakkaasti korkeapainepumpun kuormituksen ollessa korkea. Vaikka selvitysten perusteella selittäväksi tekijäksi osoittautui korkeapainepumpun nokkien jyrkät nousukulmat, päätettiin sähkömoottorin kunto kuitenkin tarkistaa. Sähkömoottori on päällisin puolin hyvässä kunnossa, mutta moottori on todennäköisesti yli 20 vuotta vanha.

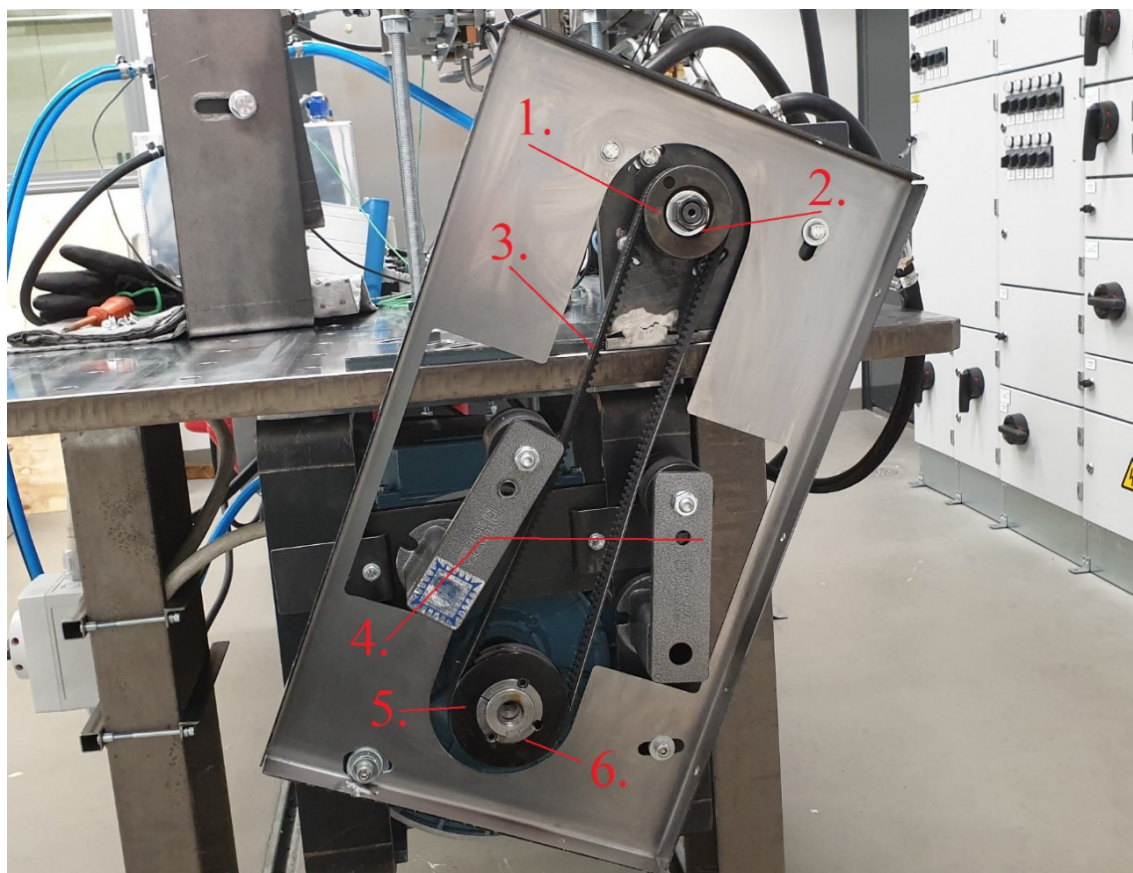
Sähkömoottorin roottori irrotettiin ja kaikki näkyvät liitännät ja komponentit tarkistettiin silmämääräisesti. Mitään selvää vikaa ei havaittu, ainoastaan moottorin sisällä, staattorin pinnalla näytti olevan ylimääräistä hartsia. Hartsia käytetään käämien suojaamiseen, mutta normaalisti sitä ei jätetä staattorin pinnalle. Juuri tämä ilmarako staattorin ja roottoriin välillä, jossa hartsia oli, on tärkeä tekijä sähkömoottorin toiminnassa. Ylimääräinen hartsi poistettiin mekaanisesti, mutta sillä ei ollut sanottavaa vaikutusta moottorin toimintaan. Moottorin laakerit vaihdettiin uusiin. Roottorin akselilla, laakereiden kiinnityskohdassa, oli havaittavissa pientä kulumaa. KytKentäkotelossa alimmat Abiko-liittimet kiiristettiin. Liittimet olivat löystyneet todennäköisesti tärinän vaikutuksesta.

3.8 Voimansiirto

Voimansiirron tehtävänä mittauspenkissä on välittää pyörittävä voima sähkömoottorilta korkeapainepumpun akselille. Korkeapainepumpun tarvitsema teho oli laskettu ja tarvittava sähkömoottori oli hankittu. Mittauspenkin voimansiirto oli suunniteltu toteutettavaksi kiilahihnojen välityksellä. Voimansiirron hihnapyörillä voidaan muuttaa järjestelmän välityssuhdetta.

Kiilahihnakäytön etuna on yksinkertainen ja edullinen rakenne sekä vähäinen huollon tarve. Tarvittavia komponentteja ovat ainoastaan hihnapyörät, hihnat ja kiristimet. Huoltotoimenpiteitä ovat hihnojen linjaus, kireyden tarkistaminen ja hihnojen uusiminen. Hihnatyypiksi oli valittu teollisuudessa yleisesti käytetyt SPZ / XPZ tyyppin kiilahihnat (Salminen, 2019, s. 54).

Hihnojen joustavuus mahdollistaa sähkömoottorin pehmeän käynnistyksen ja sammuttamisen. Taajuusmuuttajalla voidaan säätää sähkömoottorin kiihdytys- ja hidastuvuus-aikoja. Nämä seikat yhdessä vähentävät voimansiirron komponenteille tulevaa rasitusta (Salminen 2019). Koemittauksissa havaittiin, että kiilahihnat vaimentavat korkeapainepumpun aiheuttamia momenttipiikkejä. Haittapuolena on kuitenkin hihnojen värähtely, ja hihnat luistavat suhteessa hihnapyöriin. Voimansiirron komponentit on esitetty kuvassa 18.



Kuva 18. Voimansiirto: 1 Hihnapyörä 71 mm. 2 Taper Lock 1108–20. 3 Kiilahihnat. 4 Hihnankiristimet. 5 Hihnapyörä 100 mm. 6 Taper Lock 1610–42.

3.8.1 Hihnapyörät

Teollisuudessa on yleisesti käytössä menetelmä, jossa hihnapyörät kiinnitetään lieriön muotoiselle akselille Taper-Lock holkin välityksellä. Holkin kehä on katkaistu ja lieriön muotoinen sisäreikä kiristyy akselin ympärille. Holkin ulkopinta on kartio ja vastaa hihnapyörän sisäreiän kartiota. Holkki kiristetään kahden pienen pysäytinruuvien avulla hihnapyörän sisään. Holkki ikään kuin liukuu hihnapyörän kartiota pitkin ja kiristyy samanaikaisesti sekä hihnapyörään, että akselille. Näin hihnapyörä saadaan kiinnitettyä luotettavasti ja helposti suoralle akselille.

Kiilahihnakäytön suunnittelun yhteydessä oli määritelty hihnapyörien tyyppi ja koko. Ratkaisuksi oli valittu yksiuraiset hihnapyörät. Sähkömoottorin akselille oli määritelty jakohalkaisijaltaan 106 mm hihnapyörä ja korkeapainepumpulle 71 mm hihnapyörä. Hihnapyörien jakohalkaisijat määrittävät hihnakäytön välityssuhteen. Valittujen jakohalkaisijoiden perusteella välityssuhde oli 106 mm / 71 mm, eli 1,49.

Mittauspenkissä voimansiirron rajoittavana tekijänä on sähkömoottorin akselin suuri halkaisija suhteessa korkeapainepumpun akseliin. Akseleiden halkaisijat rajoittivat saatavissa olevien hihnapyörien koot siten, että korkeapainepumpun hihnapyörä on pienempi kuin sähkömoottorin hihnapyörä. Normaalisti vedettävän laitteen hihnapyörä on suurempi kuin vetävän hihnapyörä (Gates, 2021, ss. 28,45).

Sähkömoottorin akseli on lieriön muotoinen, suora akseli. Hihnapyörän kiinnittäminen siihen sujui ongelmitta Taper-Lock holkillä. Korkeapainepumpun hihnapyörän kiinnitys akselille toteutettiin samalla periaatteella, mutta holkkia jouduttiin muokkaamaan. Koska korkeapainepumpun akselilla hihnapyörän kiinnityspinta on kartio, jouduttiin normaalin Taper-Lock holkin sisäreikä koneistamaan kartioksi. Kartiokulma ja muut mitoitustiedot olivat tunnettuja ja holkki valmistettiin MK-koneistus Oy: n toimesta halutuilla mittatiedoilla onnistuneesti.

Koemittauksissa havaitun kiilahihnan voimakkaan värähtelemisen takia päätettiin hankkia kaksiriviset hihnapyörät. Ajatuksena oli, että välitettävä teho jakautuisi kahdelle rinnakkaiselle kiilahihnalle tasaisemmin ja värähtely vaimenisi. Kahden rinnakkaisen hihnan asentaminen ei kuitenkaan vaikuttanut merkittävästi hihnojen värähtelyyn. Kaksirivisiä hihnapyöriä sähkömoottorin akselin halkaisijalla oli vielä rajoitetummin saatavissa kuin yksirivisiä. Lopulliseksi välityssuhteeksi muodostui hihnapyörien jakohalkaisijoiden suhde $100 \text{ mm} / 71 \text{ mm}$, eli 1,41. Alkuperäisten Taper-Lock holkkien mitoitus on yhteensopiva kaksirivisten hihnapyörien kanssa.

3.8.2 Kiilahihnat

Mittauspenkissä voidaan käyttää joko SPZ tai XPZ kiilahihnoja. SPZ hihna on kontaktipinnoiltaan sileä. XPZ hihnassa on sisäpinnassa uritus, joka hieman vähentää hihnan kontaktipinta-alaa, mutta parantaa hihnan kääntyvyyttä pienillä hihnapyörähalkaisijoilla. SPZ ja XPZ hihnojen nimellisleveys on 9,7 mm ja nimelliskorkeus on 8 mm. Hihnan poikkileikkaus muodostaa kiilamaisen V-kuvion, jonka avautumiskulma on noin 38° (Gates, 2021, s. 42).

Autoteollisuudessa käytössä oleva AVX 10 hihna on yhteensopiva edellisten hihnojen kanssa. Erona on, että AVX hihnojen pituusmitta ilmoitetaan toisin. Mittauspenkissä käytössä olevien SPZ ja XPZ hihnojen jakopituus on 1162 mm. Vastaavan pituisen AVX 10 hihnan pituusmerkintä on 1175 mm. Hihnojen värähtelyn takia mittauspenkissä kokeiltiin kaikkia kolmea eri hihnatyyppeä. Eri hihnatyyppeiden välillä ei havaittu mainittavia eroja värähtelyn suhteen.

Laskennallinen tehonsiirron tarve ruiskutuksen paine-erolla 200 MPa ja polttoaineen tilavuusviralla 0,53 L / minuutissa, oli korkeapainepumpulla 2,06 kW (Salminen, 2019, s. 69). Koemittauksissa havaittiin 140 MPa paine-erolla taajuusmuuttajan arvojen perusteella, että sähkömoottorin ottoteho oli noin 2,1 kW. Mittauspenkissä käytössä olevien kiilahihnojen teoreettisena tehonsiirron ylärajana voidaan pitää 2,5 kW (XPZ) ja 1,8 kW

(SPZ) per yksi hihna (Gates, 2021, ss. 48,56). Mittauspenkissä on asennettuna kaksi kiilahihnaa rinnakkain.

Kiristyspyöriä käytetään hihnäkäytöissä useista eri syistä. Hihnojen kireyden ylläpitämisen lisäksi niitä käytetään hihnojen ohjaamiseen. Mittauspenkissä hihnojen esikiristäminen tehdään liikuttamalla sähkömoottoria etäämmälle korkeapainepumpulta. Kiristämisen yhteydessä on huolehdittava, että hihnojen linjaus pysyy suorassa. Hihnojen linjaamisen apuna käytettiin kahta rinnakkaista linjalautaa, joilla hihnäpyörien asento saatiin kohdistettua.

Kokeiluissa havaittiin, että paras tapa kiristää ja linjata hihnät samanaikaisesti, on tehdä hihnojen peruskiristys sähkömoottorilla. Tämän jälkeen lopullinen kiristys tehdään kahdella, vastakkaisilla puolilla olevilla kiristinpyörillä. Korkeapainepumpusta syntyvät momenttipiikit aiheuttavat värähtelyä sekä hihnan veto- että vapaalla puolella. Havaittiin, että värähtelyä pystytään vaimentamaan kiristinpyörien avulla.

3.9 Sähköjärjestelmä

Mittauspenkin sähköjärjestelmän pääosat ovat sähkömoottori, taajuusmuuttaja, mitta-anturit, anturivahvistimet, DC-teholähteet, magneettiventtiilit, katkaisimet ja johtimet. Pääsähkönsyöttö mittauspenkille on 50 Hz taajuista 3-vaihe vaihtosähköä, jossa vaiheiden välinen jännite on 400 VAC. Toissijainen sähkönsyöttö on 50 Hz yksivaiheista vaihtosähköä, jonka jännite on 230 VAC. Voima-anturilla on erillinen, kytkentäkaapin ulkopuolinen signaalivahvistin. Voima-anturin vahvistimelle sekä punnitusvaa'alle otetaan oma sähkönsyöttönsä jatkojohdolla sähkökeskuksesta.

Sekä 400 VAC, että 230 VAC sähkönsyötöt otetaan mittauspenkin viereisestä sähkökeskuksesta kumikaapelilla. Pääsyöttö johdetaan taajuusmuuttajan kautta sähkömoottorille. Toissijainen sähkönsyöttö johdetaan kytkentäkaappiin, jossa 230 VAC jännite

muunnetaan antureille ja antureiden vahvistimille 5, 12 ja 24 VDC jännitteiksi DC-teholähteiden avulla.

3.9.1 Taajuusmuuttaja

Taajuusmuuttaja on tehoelektronikkalaitte, jolla voidaan ohjata moottorin nopeutta ja momenttia portaattomasti moottorin syöttöjännitteen taajuuden avulla. Mitä suurempi syötetty taajuus on, sitä korkeampi on moottorin pyörimisnopeus. Taajuusmuuttaja mahdollistaa hallitut käynnistämisen- ja pysäyttämistoiminnot, jotka vähentävät mekaanisia rasituksia ja tehopiikkejä (Kettunen, 2015).

Taajuusmuuttajaksi oli hankittu Vacon 100 Industrial laite. Sen syöttöjännitteenä voidaan käyttää 3-vaiheista vaihtosähköä 380–500 V ja 50–60 Hz alueilla. Taajuusmuuttajan ulostulojännitealue on 0–500 V taajuusalueella 0–320 Hz. Maksimi ulostulovirta on 31 A ja teho on 15 kW. Mittauspenkissä taajuusmuuttajaa hallitaan taajuusmuuttajan etupaneelissa olevalla näppäimistöllä.

Taajuusmuuttajilla voidaan nykyään ohjata sähkömoottoreita yhä useammassa käyttökohteissa ja ne sisältävät valmiiksi määriteltäviä sovellusohjelmia eri tarkoituksiin. Vacon 100 Industrial taajuusmuuttaja sisältää kuusi erilaista valmista sovellusta, esimerkiksi vakio- ja PID-säätösovellukset. Valmiit sovellukset helpottavat taajuusmuuttajan käyttöönottoa ja laajentavat käyttömahdollisuuksia (Kettunen, 2015).

Eri sovellusohjelmavaihtoehtojen lisäksi Vacon 100 Industrial taajuusmuuttajassa on mahdollista valita käytettävä ohjaustapa. Usein ohjaustapana käytetään taajuusohjausta. Taajuusohjauksessa sähkömoottoria käytetään annetun taajuusohjeen perusteella. Mittauspenkissä esimerkiksi 50 Hz annettu taajuusohje tuotti koemittauksissa sähkömoottorilla noin 1495 r/min pyörimisnopeuden. Tällöin moottori oli kuormittamaton.

Kiilahihnojen voimakkaan värähtelyn johdosta taajuusmuuttajan ohjaustapa muutettiin taajuusohjauksesta OL-momentinohjaukseen. Open loop (OL) ohjauksessa ei ole takaisinkytkentää säädettävästä parametrystä, taajuusmuuttaja kykenee silti säätämään parametria tarkasti ja nopeasti (Kettunen, 2015). Muutoksen ansiosta hihnojen värähtelyä saatiin pienennettyä merkittävästi jo pelkästään momentinohjaustavan parametrien oletusarvoilla. Parametrejä edelleen muuttamalla saatiin värähtelyä yhä pienennettyä. Kaikkia parametrien yhdistelmiä ei ollut kuitenkaan mahdollista testata tämän työn puitteissa.

Vacon 100 Industrial taajuusmuuttaja sisältää kokonaisuudessaan useita kymmeniä eri parametrejä, joita käyttäjä voi muuttaa parhaan säätämistavan löytämiseksi. Momentinohjaustilassa useilla parametreillä on vaikutusta toisiinsa, ja eri parametriyhdistelmien määrittäminen on haastavaa. Mittauspenkkiä käyttävien henkilöiden tulee perehtyä tarkasti kaikkien oleellisten parametrien vaikutukseen ja kokeilemalla hakea optimaalisin parametrien yhdistelmä.

Kiilahihnat absorboivat momenttipiikkejä, joten niiden välittävät momenttipiikit sähkömoottorille ovat erisuuruisia kuin alkuperäiset momenttipiikit korkeapainepumpulla. Kuitenkin kokeilemalla parametrien ja niiden yhdistelmien vaikutusta taajuusmuuttajaan ja sähkömoottoriin, voidaan optimaalisin asetus löytää. Vacon Live on taajuusmuuttajalle tarkoitettu hallintaohjelma. Vacon Live helpottaa huomattavasti parametrien määrittäystä. Lisäksi tällä ohjelmalla voidaan tehdä reaaliaikaista prosessin seuranta. Vacon Live on ladattavissa internetistä veloituksetta (Danfoss, 2021). Kuvassa 19 on esitetty Vacon 100 Industrial taajuusmuuttaja.



Kuva 19. Vacon 100 Industrial taajuusmuuttaja.

3.9.2 Kytentäkaappi

Kytentäkaappiin on sijoitettu mittauspenkin ohjaukseen ja mittaustietoihin liittyvät komponentit. Kytentäkaapin materiaali on lasikuidulla vahvistettua kyllästämätöntä polyesteriä. Ovesa on PU-vaahdotiiviste ja kaappi sisältää sinkityn asennuslevyn, johon

järjestelmien laitteet on kiinnitetty (Salonen, 2020). Ohjausjärjestelmään kuuluvat potentiometrit sijoitettiin kytkentäkaapin etupaneeliin käytettävyyden helpottamiseksi.

3.9.3 Teholähteet

Mittauspenkissä teholähteitä käytetään muuntamaan 230 V vaihtojännite tasajännitteeksi. Teholähteiden avulla voidaan kytkentäkaapille johdettu 230 V vaihtojännite jakaa ja muuntaa helposti tasajännitteeksi teholähteiden monipuolisten kytkentäominaisuuksien ansiosta. Tasajännitettä tarvitaan mittauspöydässä painevaraajien paineantureille, magneettiventtiileille ja signaalivahvistimille.

Teholähteiksi valittiin Mean Well DRA- ja MDR-sarjan teholähteitä. Niiden tuottama tasajännite on toteutettu pulssinleveysmodulaatio-tekniikalla (PWM). Tarvittavat teholähteet löytyivät samasta tuoteperheestä. Teholähteet ovat kooltaan kompakteja, ja teholähteet voitiin asentaa kytkentäkaappiin käyttämällä valmiita DIN-kiskoja. Teholähteitä hankittiin yhteensä 6 kpl. Voima-anturilla on näiden lisäksi erillinen signaalinvahvistin, jossa on oma teholähde.

Hankituissa teholähteissä on kussakin kaksi lähtöporttia kuormalle, esimerkiksi kaksi signaalivahvistinta pystyttiin kytkemään yhteen teholähteeseen. Tämä vähensi teholähteiden kokonaismäärän tarvetta. Teholähteiden ulostulojännitettä voidaan hienosäätää säätöruuvilla. DRA-sarjan laitteiden ominaisuuksiin kuuluu ulos lähtevän virran rajoitusmahdollisuus kolmella eri menetelmällä. Tätä ominaisuutta tarvitaan magneettiventtien ohjaamisessa. Ominaisuutta hyödynnettiin siten, että säätöporttiin kytkettiin potentiometri. Tällä tavoin ulostulovirtaa kyetään rajoittamaan portaattomasti. Teholähteiden tärkeimmät ominaisuudet on esitetty taulukossa 5 (Yliselektronikka, 2021).

Taulukko 5. Mittauspenkin kytkentäkaapin teholähteiden tärkeimmät ominaisuudet (Yleiselektronikka, 2021).

Teho- lähde	Syöttö jännite	Ulostulo jännite	Max virta	Käyttö 1	Käyttö 2
MDR-40- 5	230 VAC	5 VDC	6,0 A	Painevaraaja, Bosch paineanturi 1	Painevaraaja, Bosch paineanturi 2
MDR-40- 24	230 VAC	24 VDC	1,7 A	Kistler 4624 signaa- livahvistin paine/lämpötila- anturi 4067e	Kistler 4624 sig- naalivahvistin pai- neanturi 4075a
MDR-40- 24	230 VAC	24 VDC	1,7 A	Nokeval 6821 sig- naalivahvistin ter- mopareille	
DRA-40- 12	230 VAC	12 VDC	3,34 A	MPROP-magneetti- venttiili	* Virran rajoitta- minen mahdol- lista
DRA-40- 12	230 VAC	12 VDC	3,34 A	Paineenrajoitus- magneettiventtiili 1	* Virran rajoitta- minen mahdol- lista
DRA-40- 12	230 VAC	12 VDC	3,34 A	Paineenrajoitus- magneettiventtiili 2	* Virran rajoitta- minen mahdol- lista

3.9.4 Magneettiventtiilit

Magneettiventtiilillä voidaan kontrolloida venttiilin avautumista portaattomasti. Magneettiventtiilit sisältävät käämin, johon johdetaan pulssimoduloitua tasajännitteellistä sähkövirtaa. Johdetun sähkövirran kasvaessa avautumiseen tarvittava voima kasvaa. Mikäli magneettiventtiileihin ei johdeta sähkövirtaa lainkaan, ne vaativat pienemmän voiman avautuakseen (Klemt, 2020a); (Vilenius, 2020).

Mittauspenkissä on yhteensä kolme magneettiventtiiliä. Yksi on korkeapainepumpun MPROP-venttiili, jolla säädellään korkeapainepumpun tuottamaa tilavuusvirtaa ja painetta. Kaksi muuta ovat painevaraajien päädyissä sijaitsevat paineenrajoitusventtiilit, Pressure control valve (PCV). Mittauspenkin paineenrajoitusventtiilien ei ole tarkoitus aueta ja sulkeutua edestakaisin. Ne toimivat järjestelmän turvalaitteina ja avautuvat ainoastaan silloin, kun varaajien paine ylittää säädetyn maksimipaineen (Klemt, 2020a).

Mittauspenkissä magneettiventtiilejä ohjataan ruiskutuksen ohjausjärjestelmällä. Korkeapainepumpun ja paineenrajoitusventtiilien minimi- ja maksimiohjausvirrat ja niiden tuottamat polttoaineen paineet painevaraajissa on esitetty taulukossa 6 (Klemt, 2021); (Vilenius, 2020).

Taulukko 6. MPROP-venttiilin ja paineenrajoitusventtiilien viitteelliset ohjausvirrat ja vastaavat paineet painevaraajissa (Klemt, 2021).

Sijainti	Magneetti-venttiili	Ohjausvirta minimi / rail paine	Ohjausvirta maksimi / rail paine
Korkeapainepumppu	MPROP	0,0 A / 200 MPa	1,6 A / 0,0 MPa
Painevaraaja 1	PCVN2-25	0,0 A / 89 MPa	1,26 A / 220 MPa
Painevaraaja 2	PCVN2-25	0,0 A / 89 MPa	1,26 A / 220 MPa

3.10 Ruiskutuksen ohjausjärjestelmä

Mittauspenkin ruiskutuksen ohjausjärjestelmän pääperiaate on ohjata järjestelmässä olevia magneettiventtiilejä johtamalla niille kulloinkin halutun ruiskutuspaineen mukaisesti sähkövirtaa. Magneettiventtiilit toimivat 12 VDC nimellisjännitteellä. Normaali 230 VAC vaihtosähkö muunnetaan teholähteiden avulla 12 VDC tasasähköksi. Magneettiventtiilejä varten hankittiin säädettävät teholähteet, joiden tuottamaa sähkövirtaa voidaan rajoittaa ja haluttu ohjausvirta saavutetaan.

Korkeapainepumpussa oleva MPROP-venttiili toimii siten, että jos venttiilille ei johdeta sähkövirtaa, pumppu tuottaa maksimivirtauksen ja -paineen. Jos venttiilille johdetaan noin 1,6 A virtaa 12 VDC tasajännitteellä, pumppu ei tuota lainkaan tilavuusvirtaa eikä painetta. Säättämällä sähkövirran määrää 0–1,6 A välillä, saadaan haluttu paine painevaraajiin ja ruiskutusventtiiliin (Vilenius, 2020).

Painevaraajien paineenrajoitusventtiilit (PCV) toimivat seuraavasti: mikäli venttiileille ei johdeta lainkaan sähkövirtaa, määräytyy avautumispaine venttiileissä olevien jousivoimien perusteella. Painevaraajien paineeksi mitattiin likimain 89 MPa koemittauksissa, joissa paineenrajoitusventtiileille ei johdettu sähkövirtaa. Kun paineenrajoitusventtiileille johdetaan suunnilleen 1,26 A sähkövirta 12 VDC jännitteellä, on venttiilien avautumispaine noin 220 MPa (Klemt, 2020a).

Huomioitavaa on, että sähkövirran rajoittaminen tehdään manuaalisesti säättämällä potentiometrin asentoa. Tällöin on mahdollista, että venttiilien avautumispaine kasvatetaan liian korkeaksi, jolloin voi syntyä turvallisuusriski. Mittaustilanteessa on varmistuttava, että paineenrajoitusventtiileille johdettava sähkövirta ei ylitä 1,26 A arvoa. Paineenrajoitusventtiilien suurin sallittu jatkuvakestoinen sähkövirtaraja on 1,8 A (Klemt, 2020a).

Käytännössä magneettiventtiilien virran rajoittaminen tehdään kytkentäkaapin etupaneeliin asennettujen potentiometriä avulla. Korkeapainepumpun MPROP-venttiili on

merkitty tekstillä "CP4 Pressure control" ja paineenrajoitusventtiilien potentiometrit on merkitty teksteillä "PCV 1" ja "PCV 2".

Korkeapainepumpun tuottamaa tilavuusvirtaa ja painetta säädetään siis muuttamalla etupaneelin potentiometrin asentoa. Tämä muuttaa MPROP-venttiilille menevän sähkövirran suuruutta, joka puolestaan säättää korkeapainepumpulla tuotantoon menevän polttoaineen määrää. Mittaustilanteessa painevaraajien paineesta saadaan reaaliaikaista mittaustietoa ja haluttu paine voidaan säätää.

Paineenrajoitusventtiilien PCV 1 ja PCV 2 tehtävä mittauspennissä on toimia turvalaitteina, jotka avautuvat vain silloin kun paine ylittää määritetyn rajan. Paineenrajoitusventtiilien ohjausvirrat pidetään vakioina, eikä niitä säädetä mittaustilanteessa. Ainoastaan jos painevaraajien maksimipaineen arvoa halutaan muuttaa, ohjaussähkövirran arvoa muutetaan. Koemittauksissa paineenrajoitusventtiilien ohjausvirta pidettiin vakiona, noin 1,26 A. Tämä vastaa suurin piirtein 220 MPa:n avautumispainetta (Klemt, 2020a).

Magneettiventtiileiden ohjaussähkövirran määrä voidaan mitata näkyvillä olevista liittimistä yleismittarilla tai vaihtoehtoisesti avoimista johtimista pihtivirtamittarilla. Kytkenäkaappiin asennetut sähkövirran rajoituspotentiometrit sekä liittyvät komponentit on esitetty kuvassa 20.



Kuva 20. Kytkentäkaappi: 1 Ohjausvirtojen säätö. 2 Teholähteet. 3 Signaalivahvistimet. 4 Tiedonkeruunmoduuli.

3.11 Mitta-anturit

Mittauspenkissä on yhteensä seitsemän mittauspistettä ja mittausanturia. Korkeapaineputken paineanturissa on lisäksi integroitu lämpötilan mittaus, mittaustietoa saadaan yhteensä kahdeksasta eri parametristä. Kaikki mittauspenkin anturit ovat analogisia ja mitatut arvot saadaan signaalivahvistimilta 0–10 V tai -10 V–10 V jännitesignaaleina tiedonkeruunmoduulille. Mitta-anturitiedot on esitetty taulukossa 7.

Taulukko 7. Mitta-anturit ja mittausketjun komponentit.

Mittaus	Anturi	Vahvistin	Teholähde	Kanava
Voima-anturi	Kistler 9215A	Kistler 5018	Oma tehonsyöttö	In0
Ruiskutusaine korkeapaineputkessa	Kistler 4067E3000DS	Kistler 4624A	MDR-40-24	In1
Lämpötila korkeapaineputkessa	Kistler 4067E3000DS	Kistler 4624A	MDR-40-24	In2
Ruiskutusammion vastapaine	Kistler 4075A500	Kistler 4624A	MDR-40-24	In3
Paine, rail 1	Bosch DS-HD-RPS4-20	Ei vahvistinta	MDR-40-5	In4
Paine, rail 2	Bosch DS-HD-RPS4-20	Ei vahvistinta	MDR-40-5	In5
Lämpötila polttoainesäiliössä	K-tyyppi, termopari	Nokeval 6821-1. kanava	MDR-40-24	In6
Lämpötila jäähdytys, adapteri	K-tyyppi, termopari	Nokeval 6821-2. kanava	MDR-40-24	In7

Mitta-antureiden lisäksi mittauspenkissä on vaaka, jolla mitataan siirtynyt polttoaineen massa. Vaaka on Kern DS 30K-mallin vaaka, jonka mittauskapasiteetti on 30 kg ja erotte-lukyky on 0,1 g. Mittauspenkissä polttoaineen mittaussäiliö asetetaan vaan päälle ja siir-tyneen polttoaineen massa voidaan lukea digitaaliselta näytöltä. Mittauspenkissä vaakaa ei ole kytketty tiedonkeruujärjestelmään. Vaa’assa on RS232-liitin, jolla mittaustietoja voidaan siirtää ulkopuolisiin laitteisiin. Vaa’an valmistajalta on hankittavissa ohjelmisto mittaustietojen siirtämiseen tietokoneelle (Kern, 2021).

3.12 Signaalivahvistimet

Mitta-anturit tarvitsevat signaalivahvistimet, jotta anturin mittaama analogiasignaali saadaan muunnettua ja vahvistettua tiedonkeruumoduulille yhteensopivaksi. Tiedonkeruumoduulin sisään tulevat jännitesignaalit täytyy olla -10 VDC ja +10 VDC välillä. Mittauspenkissä on käytössä kaksi eri tyyppistä Kistler signaalivahvistinta ja yksi signaalivahvistin termopareille lämpötilojen mittaamista varten (Hänninen, 2020).

Voima-anturin toimintaperiaate on tuottaa pieni sähkövaraus voiman kohdistuessa sen mittapäähän. Sähkövarauksen vahvistamiseksi mittauspenkissä on Kistler 5018a vahvistin. Vahvistinta hallitaan laitteeseen integroidun näyttöpaneelin ja painikkeiden avulla. Kistler 5018a vahvistimella on oma sisäinen teholähteensä ja vahvistimen ulostulosignaali johdetaan kaapelilla tiedonkeruumoduulille. Vahvistimen mukana toimitetulla tai internetistä ladattavissa olevalla ohjelmistolla voidaan vahvistin kytkeä tietokoneeseen (Kistler 2020a).

Mittauspenkissä on kaksi Kistler 4624A-vahvistinta. Kytkentäkaapissa vasemmanpuoleiseen vahvistimeen on kytketty korkeapaineputken paine-lämpötila-anturi. Tämä anturi sisältää elektronisen määrittelytiedoston (TEDS), jonka vahvistin lukee automaattisesti, eikä manuaalista määrittelyä tarvita. Kytkentäkaapin oikeanpuoleiseen vahvistimeen on kytketty ruiskutusammion vastapaineanturi. Tämä anturi on manuaalisesti määriteltävä vahvistimen Ethernet portin kautta (Kistler 2020b).

Polttoaineen ja jäähdytysnesteen lämpötilan mittaamiseksi asennettiin K-tyypin termoparit polttoainesäiliöön ja ruiskutusventtiilin adapteriin. Termoparien vahvistimeksi valittiin Nokeval 6821-vahvistin. Vahvistin on kaksikanavainen ja sen ominaisuuksiin kuuluu hyvä ohjelmoitavuus. Esimerkiksi eri tyyppisiä termopareja voidaan käyttää ja mittausalueet voidaan asettaa etupaneelistä (Nokeval, 2020).

3.13 Mittaustiedon tallennusjärjestelmä

Mitta-antureiden mittaustiedot johdetaan signaalivahvistimien kautta tiedonkeruumuodulille. Tiedonkeruumuodulille saapuva tieto on analogista jännitesignaalia, jonka moduuli muuntaa digitaaliseen muotoon. Moduulista mittaustieto johdetaan ja tallennetaan tietokoneelle.

Mittaustiedon tallennusjärjestelmä tilattiin ulkopuoliselta toimittajalta. Tavoitteena oli pelkistetty, mutta tehokas sovellus. Ensisijainen vaatimus oli saada koottua kaikkien mitta-antureiden mittaustiedot samanaikaisesti sekä kirjoittaa ne Excel tiedostoon myöhempiä tarkastelua varten. Toiseksi tavoitteiksi asetettiin mahdollisuus asettaa eri näytteenottovälejä sekä järjestelmän hyvät laajennus- ja parannusmahdollisuudet jatkossa.

Tiedonkeruumuoduliksi valittiin USB-1608FS-Plus laite. Moduulissa on kahdeksan itsestä mittauskanavaa, joille saapuvaa jännitesignaalia muunnetaan digitaaliseen muotoon kaikilta kanavilta samanaikaisesti. Jokaisella kanavalla on oma analog–digital muunnin (A/D). Moduuli kykenee 16-bitin erottelukykyyyn. Mittaustilanteessa tiedonkeruumuoduli liitetään tietokoneeseen USB-kaapelilla. Näytteenottoväli voidaan valita suoritettavaksi 50 Hz, 100 Hz, 500 Hz ja 1000 Hz taajuuksilla.

Tallennusjärjestelmään liitettävään tietokoneeseen on asennettava InstaCal-sovellus, joka tunnistaa mittauspenkin tiedonkeruumuodulin ja ilmoittaa, että moduuli on käytettävissä. InstaCal-sovelluksella voidaan lisäksi testata, että moduuli toimii oikein.

Muut mittaustiedon tallentamiseksi tarvittavat sovellukset ovat neljä eri näytteenottoaajuudella toimivaa tallennussovellusta. Huomioitavaa on, että tallennetut mittaustiedot Excel tiedostossa ovat käytettävissä vasta mittauksen jälkeen ja suurella näytteenototaajuudella tulostettu rivimäärä on suuri. Tämän vuoksi tietokoneelle kannattaa asentaa DAQami-sovellus, jolla näkee mittausarvot reaaliajassa tietokoneen näytöllä.

4 Testaus

4.1 Testausjärjestelyt

Ennen mittaustapahtuman alkua täytyy varmistua, että mittauspenkin laitteisto on toimintakunnossa ja mittaustiedot voidaan tallentaa. Taajuusmuuttajan asetukset ja sähkömoottorin pyörimisnopeus on määritettävä ennen varsinaisia mittauksia.

Laitteiston kannalta on tärkeintä, että kiilahihnojen kireys on tarkistettu ja että näkyvää polttoainevuotoa tai muuta ongelmaa ei ole havaittavissa. Mittaustietojen tallentamiseksi on tietokonesovellukset ja vaaka käynnistettävä. Mittauspöytäkirjaan tulee merkitä mittausten alku- ja loppuajankohdat, painetaso sekä mitattu siirtyneen polttoaineen massa. Mittaustietojen kirjaamisessa voidaan käyttää apuna videokuvausta, jonka tallenteesta mittausjakson ajoituspisteet voidaan tarkistaa.

Ennen tapahtuman ensimmäistä mittausta tulee vähintään seuraavat kohdat tarkistaa:

- Visuaalinen / tunnusteleva tarkastus yleisesti, kiilahihnat, vuodot, ym.
- Jäähdytysnesteen ja polttoaineen kierto käynnistetty
- Virranrajoituspotentiometriä asetukset tarkistettu
- Mittaustietojen tallennus valmiina tietokoneella
- Mittaustietojen tallennus valmiina vaa'alla
- Ajanotto ja mittauspöytäkirja järjestetty

4.2 Testaussuunnitelma

Mittauspenkin toimivuuden toteamiseksi tehtiin sarja koemittauksia. Koemittauksissa oli tarkoitus tutkia ainoastaan laitteiston toimivuutta. Mittaustulosten analysointia ei tehty syvällisesti.

Koemittaukset päätettiin toteuttaa viidellä eri painetasolla. Ensimmäinen korkealla paineella ja sitten alentaen painetta vaiheittain. Mittaukset tehtiin kahden mittauksen sarjoina. Mittaussarjoista laskettiin suihkun voiman ja paine-eron keskiarvot. Massavirran arvo saatiin vertaamalla vaa'an mittauslukemia mittauksen alussa ja lopussa. Yhden mittausjakson kesto oli 60 sekuntia.

Koemittaukset toteutettiin seuraavan käytännön mukaisesti:

1. Koemittaus: painetaso 160 MPa: 2 x 60 s – Voima- ja massavirrat per mittaus + keskiarvot per kaksi mittausta
2. Koemittaus: painetaso 140 MPa: 2 x 60 s – Voima- ja massavirrat per mittaus + keskiarvot per kaksi mittausta
3. Koemittaus: painetaso 80 MPa: 2 x 60 s – Voima- ja massavirrat per mittaus + keskiarvot per kaksi mittausta
4. Koemittaus: painetaso 40 MPa: 2 x 60 s – Voima- ja massavirrat per mittaus + keskiarvot per kaksi mittausta.
5. Koemittaus: painetaso 10 MPa: 2 x 60 s – Voima- ja massavirrat per mittaus + keskiarvot per kaksi mittausta.

4.3 Polttoaineanalyysi

Ennen koemittauksia käytetystä polttoaineesta toimitettiin analyysi Vebicin polttoaine-laboratorion toimesta. Analysoinnin päätarkoitus oli selvittää polttoaineen tiheys ja viskositeetti. Polttoaineanalyysin tärkeimmät tulokset on esitetty taulukossa 8.

Taulukko 8. Polttoaineanalyysin pääkohdat (ASG, 2020).

Parametri	Menetelmä	Tulos	Yksikkö
Tiheys [15°C]	DIN EN ISO 12185:1997	836,4	kg / m ³
Kin. viskositeetti [40°C]	DIN EN ISO 3104:1999	3,325	mm ² / s
Leimahduspiste	DIN EN ISO 2719 :2016	67,5	°C
Vesipitoisuus	DIN EN ISO 12937 :2002	32	mg / kg

4.4 Tulokset

Mittauspenkin mittaustapahtumassa tutkittiin suihkun aiheuttamaa voimaa sekä polttoaineen massavirtaa. Suoritetuissa koemittauksissa voima-anturi oli kiinnitettynä ruiskutuskammion ulkopuolelle. Suihkun voima mitattiin työntötangon välityksellä noin 7 mm etäisyydeltä ruiskutussuuttimen ulostuloreiästä. Työntötangon mittapään poikkileikkauksen halkaisija on noin 5,9 mm. Massavirta mitattiin lukemalla vaa’an alku- ja loppulukemat 60 sekunnin pituiselta jaksolta.

Koemittauksia suoritettiin lisäksi voima-anturi asennettuna ruiskutuskammion sisään. Voimalukemissa esiintyi tällöin voimakkaita häiriöitä, eikä luotettavia tuloksia tällä asetelulla saatu. Pietsokide-anturin tiedetään olevan herkkä komponentti ja sen normaaliin toimintaan kuuluu lievä nollapisteen liukuminen. Selkeää ja yksiselitteistä syytä häiriöille tällä asetelulla ei löydetty.

Koemittauksissa voima-anturin signaalivahvistimen mittausmenetelmä asetettiin DC-Long asetukselle. Koemittauksissa käytettiin 3 kHz low pass suodatinta. Koemittauksissa ruiskutusammion paine oli tasaisesti noin yhden ilmakehän paineen suuruinen.

Mitattujen voima-arvojen vertailutiedoiksi laskettiin voima-arvojen laskennalliset arvot koemittausten painetasoilla. Laskennallinen suihkun voima laskettiin yhtälöstä

$$F_{\text{suihku}} = \dot{m}v_{\text{suihku}}, \quad (5)$$

missä F_{suihku} merkitsee suihkun tuottamaa voimaa, \dot{m} merkitsee suihkun massavirtaa ja v_{suihku} merkitsee suihkun virtausnopeutta (Isola, 2017, s. 33). Suihkun virtausnopeus laskettiin muuttamalla suihkun massavirta tilavuusvirraksi. Sen jälkeen tilavuusvirran arvo jaettiin suutinreiän poikkipinta-alalla. Väliaineen vastusvoimaa ei huomioitu laskelmassa.

Lämpötila mitattiin korkeapaineputkessa olevalla paineanturilla, johon on integroitu lämpötila-anturi. Anturi on asennettu juuri ennen ruiskutusventtiiliä.

Mittauspenkillä jatkossa suoritettavat varsinaiset mittaukset ja niistä saatavat tulokset vaativat tarkemman mittausarvojen analysoinnin kuin tässä työssä tehty analysointi. Laskennallisia voiman arvoja voidaan pitää viitteellisinä, koska suihkun nopeus on määritetty oletetulla suutinreiän halkaisijalla laskennallisesti.

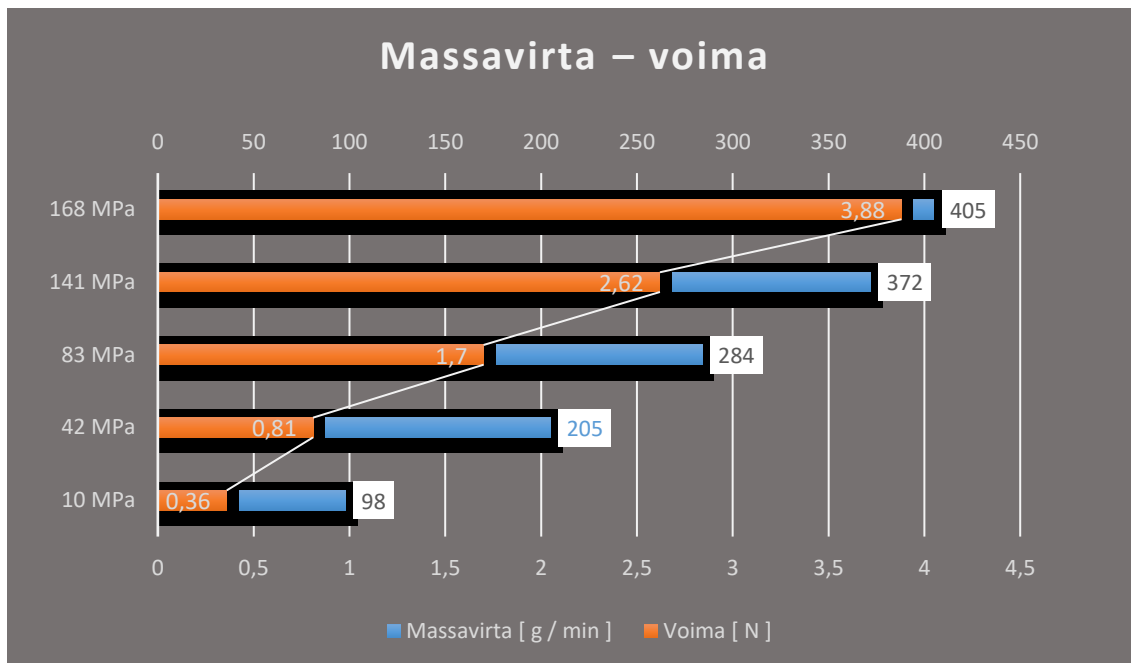
Vertaamalla aikaisempiin vastaavan aihealueen tutkimustuloksiin sekä laskettuihin arviointeihin, voitiin todeta, että mittauspenkistä saadut mittaustulokset ovat suuruusluokaltaan vastaavalla tasolla kuin aikaisemmissa tutkimuksissa (Isola, 2017, s. 37); (Salminen, 2019, s. 68). Koemittauksista saadut tulokset on esitetty taulukossa 9.

Taulukko 9. Mittaustulokset eri painetasoilla.

Mitattu voima [N]	Laskennallinen voima [N]	Massavirta [kg/s]	Tilavuusvirta [L/min]	Lämpötila [°C]	Paine-ero [MPa]
0,36	0,21	0,0016	0,117	28,4	10,2
0,81	0,91	0,0034	0,242	28,9	42,4
1,70	1,79	0,0047	0,340	29,0	83,8
2,62	3,08	0,0062	0,445	29,0	141,1
3,88	3,64	0,0067	0,484	28,8	168,4

Kuvassa 21 on esitetty koemittauksen mittausravot kuvaajana eri painetasoilla. Suihkun voima on esitetty yksikössä newton ja massavirta yksikössä grammaa minuutissa.

Kuva 21. Koemittauksissa mitatut massavirta- ja voima-arvot.



5 Pohdinta

Tämän diplomityön tarkoitus oli saattaa ruiskutuksen mittauspenkki toimintavalmiiksi. Työn tekeminen käytännössä oli huomattavasti monitahoisempi ja haasteellisempi kuin mitä aluksi saattoi päätellä. Ensiajatuksena saattoi pitää, että eri komponentit asennetaan vain peräjälkeen pöytään kiinni. Lopuksi tehdään koetestit ja käytännön osuus on valmis. Ohjausjärjestelmän, ruiskutusammion, mittauksen tallennusjärjestelmän ja lukemattomien pienten yksityiskohtien ratkaiseminen oli käytännössä kuitenkin vaativaa ja aikaa vievää.

Mittauspenkin rakenne ja asettelu määräytyi suuresti sen pääkomponenttien, ruiskutuslaitteiston ja teräspöydän mukaisesti. Ruiskutuslaitteisto oli saatava kiinnitettyä tukevalle alustalle. Teräspöytä soveltui tähän tarkoitukseen hyvin. Muut komponentit oli suunniteltava toimimaan näiden kahden elementin ympärille. Lisätietoa ja käytännön kokemuksia haettiin vieraillemalla Wärtsilän laboratoriossa. Vierailulla saatiin monia hyviä neuvoja. Mittauspenkin peruskonsepti, laitteistojen sijoittaminen teräspöydän ympärille, osoittautui toimivaksi ratkaisuksi.

Korkeapainepiirin maksimipaine asettaa suuret vaatimukset turvallisuudelle. Turvallisuuden kannalta kriittisimmät kohdat on pyritty suunnittelemaan siten, että ilmeiset vaaranpaikat on suojattu ja sijoitettu pois päin laitteiston ohjauspaneelilta. Mittauspenkin koamisvaiheessa laitteiston käyttötöstejä tehtiin yhteensä vain noin 100 minuutin ajan. Tässä ajassa ei laitteistoon ehtinyt muodostua rasituksesta aiheutuvia havaittavia vikoja, mutta joita pidemmällä aikavälillä saattaa ilmetä. Mittauspenkin ympärille on alustavasti suunniteltu kokopeittävä polykarbonaattilevystä valmistettava suojakehikko. Kehikko suojaa ongelmatilanteissa tehokkaasti ja vaimentaa laitteistosta syntyvää melua. Lisäksi kehikko on helposti nostettavissa pois huoltotöiden ajaksi.

Ruiskutettu dieselpolttoaine lämpeni ennen ruiskutussuutinta sijaitsevassa mittauspisteessä korkeimmillaan noin 40 celsiusasteeseen. Ruiskutussuuttimen jälkeen sijaitsevassa polttoaineen mittaussäiliössä ei ole lämpötilan mittausturua. Arvioituna

polttoaineen lämpötila oli mittaussäiliössä noin 40 ja 50 celsiusasteen välillä. Varsinaisessa polttoainesäiliössä lämpötila laski alle 40 celsiusasteen jäähtymisen ansiosta. Välitöntä vaaraa polttoaineen mahdollisesta syttymisestä tai höyrystymisestä ei havaittu.

Mittauspenkin käytettävyyden kannalta hankalimmaksi seikaksi muodostui voimansiirron kiilahihnojen epävakaus. Kun ruiskutuspainetta nostetaan yli 100 MPa:n, alkaa kiilahihnoissa herkästi esiintyä voimakasta värähtelyä sekä hihnojen veto- että vapaapuolella. Suurin syy tähän ilmiöön ovat korkeapainepumpun käyttöakselin nokkien jyrkät nousukulmat. Jyrkät nokat aiheuttavat momenttipiikkejä, joita kiilahihnat kyllä vaimentavat, mutta josta aiheutuu hihnojen värähtelyä ja hihnojen luistamista. Toinen syy hihnojen värähtelyyn on mahdollinen virheasento hihnojen linjaamisessa. Hihnojen virheasento ei kuitenkaan ole niin merkittävä tekijä kuin korkeapainepumpun momenttipiikit.

Taajuusmuuttajalla on suuri merkitys liittyen kiilahihnojen värähtelyilmiön hillitsemiseen. Ensivaiheessa taajuusmuuttajaa käytettiin taajuusohjeella, mutta ohjaustapa muutettiin momentin ohjaukseksi. Momentin ohjauksella kiilahihnojen värähtely pieneni merkittävästi. Taajuusmuuttajassa on useita asiaan vaikuttavia parametrejä. Kaikkia parametrien eri yhdistelmiä ei tämän työn puitteissa ollut mahdollista testata. Taajuusmuuttajan parametrien vaikutuksesta ja toiminnasta ei ollut saatavissa yksityiskohtaista tietoa yleisissä dokumenteissa. Koemittauksissa muutamia tärkeimpiä parametrejä muutettiin yksi kerrallaan parhaan yhdistelmän löytämiseksi.

Suunnittelun ja valmistuksen kannalta erityisen vaikea tehtävä oli ruiskutuskammion ja voima-anturin pitimen toteuttaminen. Voima-anturi täytyi saada kohdistettua tarkasti ruiskutusvirtauksen linjalle. Voima-anturin mittapää täytyi asettaa ruiskutuskammion sisään. Toinen pää oli jätettävä ruiskutuskammion ulkopuolelle signaalijohtimen liittämiseksi. Tähän seikkaan liittyi suuria haasteita saada järjestelmä tiiviiksi siten, että voima-anturin etäisyyttä suuttimen ruiskutusaukolta oli kyettävä muuttamaan. Samanaikaisesti liitoskohtien täytyi säilyä tiiviinä.

Koemittauksissa havaitut voima-anturin mittauslukemien häiriöt kyettiin sivuuttamaan siirtämällä voima-anturi mittauskammion ulkopuolelle. Ensisijaiset rakenteet ruiskutus-kammiossa sekä voima-anturin pitimessä mahdollistivat sen, että voima-anturi voitiin siirtää vähäisillä muutoksilla. Ainoastaan voima-anturin pidin ja työntötanko suunniteltiin uudelleen. Lisäksi voima-anturi kyettiin edelleen kiinnittämään alumiiniseen päätylieriöön. Voima-anturin kiinnittäminen päätylieriöön vakauttaa pitimen rakennetta.

Tarkan suunnittelun johtoajatukseksi oli pyrkiä suunnittelemaan tarvittavat komponentit ja järjestelmät mahdollisimman yksinkertaisiksi, jolloin toimintavarmuus on yleensä paras. Yksinkertaisten ratkaisujen taustalla oli lisäksi niiden helpompi valmistettavuus ja alhaisemmat valmistuskustannukset. Mittauspenkin tarkkaa suunnittelua ja kokoamisvaihetta toteutettiin rajallisen budjetin puitteissa. Kaikissa yksityiskohdissa pyrittiin toteuttamaan laitteisto, jolla voidaan suorittaa mittauksia ja jota voidaan myöhemmin helposti parantaa.

Tässä diplomityössä tutkittiin uutta lähestymistapaa voima-anturin kohdistamiseksi. Työssä onnistuttiin toteuttamaan pitimen rakenne, jossa voima-anturia voidaan liikutella useaan suuntaan. Kohdistaminen voidaan tehdä jopa ruiskutusmittauksen aikana. Tällä toimenpiteellä kyetään varmistamaan, että mitattava voima on mittaustapahtumassa suurin. Tämän ansiosta johtopäätökset ja laskutoimitukset ruiskutuksen dynamiikasta ovat mahdollisimman todenmukaisia.

Taajuusmuuttaja sisältää lukuisia parametreja, joilla voidaan vaikuttaa sähkömoottorin pyörimisnopeuteen ja vääntömomenttiin. Parametrien vaikutuksen ymmärtäminen on ensiarvoisen tärkeää, jotta optimaalinen parametrien yhdistelmä voidaan löytää. Koetesteissa havaittiin, että parametrejä muuttamalla kiilahihnojen värähtelyä voitiin pienentää merkittävästi ja laitteiston toiminta oli vakaampaa. Laitteistoa käyttävän henkilön on perehdyttävä tarkasti taajuusmuuttajan parametrien ja niiden yhdistelmien vaikutukseen sekä käytännön kokeilla varmistettava optimaalisin asetusten yhdistelmä.

Mittauspenkki toimii pääpiirteittäin odotetusti, toimintahäiriöitä saattaa ilmetä lähinnä kiilahihnojen värähtelynä ja lievinä polttoainevuotoina ruiskutuskammion liitännöissä. Yksiselitteistä syytä voima-anturin mittausarvojen häiriöihin asettelussa, jossa anturin mittapää oli ruiskutuskammion sisällä, ei voitu osoittaa. Laitteiston käytön aloittaminen vaatii perehtymistä sen toimintaperiaatteisiin, jotta laitteistoa käyttävä henkilö hallitsee laitteiston turvallisen ohjaamisen.

6 Johtopäätökset

Tämän työn perusteella voidaan tehdä seuraavia johtopäätöksiä:

- Työstä saatuja kokemuksia voidaan hyödyntää mittauspenkin parantamiseksi sekä soveltaa muissa mahdollisissa vastaavien aihepiirien tehtävissä.
- Mittauspenkki toimii pääpiirteittäin suunnitellulla tavalla ja mittauksia voidaan suorittaa
- Turvallisuuden lisäämiseksi voidaan asentaa suojakehikko sekä ylipainerajoitin
- Taajuusmuuttajan parametrien vaikutusten ymmärtäminen on tärkeässä asemassa mittauspenkin ohjauksessa
- Teknisiä parannuksia voidaan tehdä lisäsuunnittelulla ruiskutukammi-oon ja voimansiirtoon.

Suojakehikon lisääminen laitteiston ympärille voidaan toteuttaa kiinnittämällä jo valmiiksi hankitut polykarbonaattilevyt kulmaprofiileilla pöydän jalkoihin. Suojakehikko voidaan mitoittaa siten, että kehikko suojaa laitteiston käyttäjiä, mutta on helposti nostettavissa pois huoltotöiden ajaksi.

Nykyisessä kokoonpanossa on asennettuna kaksi paineenrajoitusventtiiliä, yksi kummankin painevaraajan yhteydessä. Painerajoitusventtiilejä ohjataan manuaalisesti ja on mahdollista, että painetta rajoittava ohjaussignaali säädetään liian suureksi, jolloin rajoitusventtiilit aukeavat esimerkiksi vasta 230 MPa paineessa. Turvallisuutta lisäävä

ylimääräinen paineenrajoitin voidaan toteuttaa olemassa olevilla komponenteilla. Tällöin johdetaan paineantureilta jännitesignaali taajuusmuuttajalle, joka kynnysjännitteen ylittyessä pysäyttää sähkömoottorin.

Teknisinä parannuksina jatkossa voidaan toteuttaa voimansiirron ja ruiskutuskammion lisäsuunnittelua. Lisäksi koemittauksissa havaittiin, että yhdistämällä kaikki järjestelmästä saatava mittaustapahtuman aikainen tietovirta yhteen, voidaan laitteiston hallintaa ja mittaustiedon tarkkuutta parantaa.

Voimansiirron osalta kannattaa tutkia, saavutetaanko tasaisempaa käytettävyyttä, mikäli nykyiset kiilahihnat korvataan hammashihnalla tai ketjulla. Yksi vaihtoehto on tutkia korkeapainepumpun akselille asennettavaa vauhtipyörää (Kiikeri, 2020). Lähtötietojen perusteella mitoitettu vauhtipyörä eliminoisi momenttipiikit sekä sen avulla voitaisiin korjata hihnapyörähalkaisijoiden välinen epäsuhta.

Sähkömoottorissa havaitun ylimääräisen hartsin takia korkeapainepumppua tulisi testata toisella sähkömoottorilla, jotta voidaan varmistua kiilahihnojen värähtelyn johtuvan pelkästään korkeapainepumpusta.

Ruiskutuskammio voidaan suunnitella siten, että ruiskutuskammiota ympäröivät osat tulostetaan 3D-tulostuksella muovimateriaalista, mutta itse ruiskutuskammio koneistetaan teräksestä. Tämä mahdollistaa paremman komponentin mittatarkkuuden ja paremman voima-anturin säätötarkkuuden. Ruiskutuskammion kokoa voidaan suurentaa tarvittavien liitännöiden ja ruiskutuskammion tiiviyden parantamiseksi.

Voima-anturin mukana toimitettava mittapään kärkikappale on Kistlerin valmistama nuolimainen vakiokärki. Työntötangon suihkun vastaanottava pää on tasapäinen lieriö. Uusi kärkikappale voidaan teetättää Kelloseppäkoulun mikromekaniikkaosastolla. Toisissa tämän aihepiirin tutkimuksissa on havaittu, että käytettäessä tasaista levyä kärkikappaleena, ruiskutuksen aiheuttama voima on suurempi (Isola 2017: 36).

7 Yhteenveto

Tämän diplomityön tarkoituksena oli saattaa ruiskutuksen mittauspenkki toimintavalmiiksi aikaisempien diplomitöiden pohjalta. Pekka Isola ja Mikko Salminen tekivät diplomitöissään FLEXe ja Hercules-2 ohjelmien puitteissa periaatesuunnitelmat mittauspenkin rakenteesta ja toiminnasta. Ohjelmien tavoitteena oli kehittää joustavia ja kestäviä energiateknologioita sekä parantaa laivojen moottoreiden hyötysuhdetta ja vähentää moottoreiden päästöjä. Mittauspenkillä voidaan tutkia dieselpolttoaineen ruiskutus-suihkun aiheuttamaa voimaa sekä polttoaineen massavirtaa.

Puristus-paineen vaikutuksesta syttyvä dieselpolttoaine ruiskutetaan moottorin sylinteriin korkealla paineella, jolloin polttoaine hajoaa ja leviää sylinteriin. Ruiskutustapahtumalla on suuri vaikutus palotapahtuman ajoitukseen ja ominaisuuksiin. Kaikkia ruiskutuksessa tapahtuvia ilmiöitä ei vielä tunneta aukottomasti. Ruiskutusta tutkimalla kyetään kehittämään ruiskutussuuttimen ominaisuuksia päästöjen vähentämiseksi.

Mittauspenkki rakentuu tukevan teräspöydän ympärille. Sen pääkomponentit, korkea-painepumppu ja muu ruiskutuslaitteisto on Boschin valmistamia vakiokomponentteja, joita käytetään Agco Powerin työkoneenmoottoreissa. Pöytään kiinnitetty ruiskutuslaitteisto saa käyttövoimansa sähkömoottorilta, jota käytetään taajuusmuuttajan avulla. Korkeapaine-piirin maksimipaine on 200 MPa ja sitä voidaan säätää portaattomasti pöytään rakennetulla ohjausjärjestelmällä. Mittaustapahtuman tiedot välittyvät tiedonkeruumoduuliin, josta ne siirretään ja tallennetaan Excel tiedostoon. Mittauspenkissä polttoaine kiertää toistuvasti suljetussa piirissä. Polttoainetta jäähdytetään lämmönvaihtimessa jäähdytysveden avulla.

Mittauspenkin voima-anturin kiinnitin suunniteltiin siten, että kiinnitin mahdollistaa voima-anturin liikuttelun ruiskutuksen aikana neljään eri suuntaan suhteessa ruiskutussuuttimen ulostuloaukkoon. Tällä toiminnolla on mahdollista varmistua, että voiman mittaustilanteessa tavoitetaan ruiskutusvirtauksen maksimiarvo.

8 Lähdeluettelo

- ABB. (2021). *Low voltage general performance motors*. Haettu 3. Maaliskuu 2021 osoitteesta <https://library.e.abb.com/public/00389a1977844886b7e3e7560a6c22bf/9AKK105789%20EN%2006-2018%20General%20Perf.pdf>
- Agco Power. (2021). *Moottorit, työkoneet, yli 130 kW*. Haettu 28. Tammikuu 2021 osoitteesta <https://www.agcopower.com/fi/tuotteet/moottorit/tyokoneet/>
- Antila, A.;Karppinen, M.;Leskelä, M.;Mölsä, H.;& Pohjakallio, M. (2008). *Tekniikan kemia* (10.–12. painos p.).
- ASG. (2020). *Fossil Diesel Fuel (DFO) specifications*. Analytik-Service Gesellschaft. Fuel oil analyse report 17.12.2020.
- Bosch. (2021). *Bosch mobility solutions. High pressure pump CP4/CP4N*. Haettu 4. Helmikuu 2021 osoitteesta <https://www.bosch-mobility-solutions.com/en/products-and-services/passenger-cars-and-light-commercial-vehicles/powertrain-systems/common-rail-system-piezo/high-pressure-pump-cp4/>.
- Boström, B. (2020). Vaasan Yliopisto, Ruiskutustestipenkki. Sähköpostiviesti Jyrki Sorsalle 12.6.2020.
- Danfoss. (2021). *Vacon Live*. Haettu 6. Maaliskuu 2021 osoitteesta <https://www.danfoss.com/fi-fi/service-and-support/downloads/dds/vacon-live/#tab-overview>
- DieselNet. (2021). *Common rail fuel injection*. Haettu 17. Maaliskuu 2021 osoitteesta https://dieselnet.com/tech/diesel_fi_common-rail.php

- FLEXe. (2021). *Transiting energy systems towards sustainable systems*. Haettu 9. Tammikuu 2021 osoitteesta <http://flexefinalreport.fi/about/flexe>
- Gates. (2021). *Kiilahihnakäytön suunnitteluopas*. Haettu 3. Maaliskuu 2021 osoitteesta <https://docplayer.fi/5133936-Kiilahihnakayton-suunnitteluopas.html>
- Hänninen, A. (2020). Insinööritoimisto A. Hänninen. Toimitusjohtaja. Haastattelu 2.10.2020, Vaasa. (J. Sorsa, Haastattelija)
- Henttinen, M. (2020). Origo Engineering Oy. Teknologiajohtaja. Haastattelu 13.10.2020. Vaasa. (J. Sorsa, Haastattelija)
- Hercules-2 Project. (2021). *Fuel flexible, near-zero emissions, adaptive performance marine engine*. Haettu 9. Tammikuu 2021 osoitteesta <https://www.hercules-2.com/concept>
- IEA. (2021). *International energy agency. Tracking report – June 2020*. Haettu 17. Tammikuu 2021 osoitteesta <https://www.iea.org/reports/international-shipping>
- Isola, P. (2017). *Ruiskutuksen mittauspenkin suunnittelu*. Vaasan Yliopisto. Teknillinen tiedekunta. Diplomityö.
- Kern. (2021). *Balance Connection*. Haettu 13. Maaliskuu 2021 osoitteesta <https://www.kern-sohn.com/shop/en/software/BalanceConnection/>
- Kettunen, H. (2015). Taajuusmuuttajat ja parametrintiohjeen laatiminen. *Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Tekniikan ja liikenteen ala. Opinnäytetyö, AMK*.
- Kiijärvi, J. (9. Tammikuu 2020). Haastattelu. Vaasa. (J. Sorsa, Haastattelija)
- Kiikeri, A. (22. Joulukuu 2020). Haastattelu. Vaasa. (J. Sorsa, Haastattelija)
- Kistler 2020a. (2020a). Instruction manual Charge amplifier Type 5018A. [Kistler_5018_002_490e_3.0.pdf](#).

- Kistler 2020b. (2020b). Electronics & Software. Piezoresistive Amplifier with piezo smart. Kistler_4624_003_105e_6.0.pdf.
- Klemt, M. (2020a). Vaasan Yliopisto, ruiskutustestipenkki. Sähköpostiviesti 8.6.2020 Jyrki Sorsalle.
- Klemt, M. (2020b). Vaasan Yliopisto, ruiskutustestipenkki. Sähköpostiviesti 27.11.2020 Jyrki Sorsalle.
- Klemt, M. (2021). Powertrain Solutions, Robert Bosch Oy. Tekninen asiantuntija. Puhelinhaastattelu 5.1.2021. (J. Sorsa, Haastattelija)
- Mann-Filter. (2021). *MF_PreLine_Brosch_En_Web_neu*. Haettu 21. Helmikuu 2021 osoitteesta <https://www.mann-filter.com/mann-filter/products/fuel-filter/preline/>
- Nokeval. (2020). Käyttöohje. 6821 2- kanavainen lähetin. 6821_V1.0-1.5_2013-07-30_manual_FI.pdf.
- Origo Engineering. (2021). *PA2200 Tekniset tiedot*. Haettu 21. Helmikuu 2021 osoitteesta <https://www.origoengineering.fi/go/>
- Parker. (2021). *Filtration*. Haettu 21. Helmikuu 2021 osoitteesta <http://blog.parker.com/meeting-iso-4406-cleanliness-standards-with-diesel-and-biodiesel-fuel>
- Perkins. (2021). *Diesel common rail direct injection (CRDI) and its benefits*. Haettu 18. Maaliskuu 2021 osoitteesta https://www.perkins.com/en_GB/resources/useful-information/common-rail.html
- Rocken Tech Products Inc. (2021). *Custom-made high-pressure fuel lines*. Haettu 18. Helmikuu 2021 osoitteesta http://www.rocken-tech.com/Fuel_Lines.html
- Salminen, M. (2019). *Dieseluiskun voiman mittauslaitteisto*. Vaasan Yliopisto. Teknillinen tiedekunta. Diplomityö.

Salonen, R. (2020). Muovikaapit. Rittal. Sähköpostiviesti 30.9.2020 Jyrki Sorsalle.

Vilenius, T. (2020). Ruiskutustestipenkki, Vaasan Yliopisto. Sähköpostiviesti Jyrki Sorsalle 16.3.2020.

Wärtsilä. (2021). *Common rail fuel injection rules the waves*. Haettu 17. Maaliskuu 2021 osoitteesta <https://www.wartsila.com/insights/article/common-rail-fuel-injection-rules-the-waves>

Yliselektronikka. (2021). *MEANWELL_MDR-40-SPECS.pdf*. Haettu 7. Maaliskuu 2021 osoitteesta <https://www.yeint.fi/elektronikka/teholahteet/ac-dc-din-kiskot?manufacturer=mean--well&p=2>