

Opinnäytetyö (AMK)

Konetekniikka

2023

Santeri Virtanen

Polttoainekoneikon testausohjelma

TURKU AMK 
TURKU UNIVERSITY OF
APPLIED SCIENCES

Opinnäytetyö (AMK) | Tiivistelmä

Turun ammattikorkeakoulu

Konetekniikka

2023 | 50 sivua 2 liitettä

Santeri Virtanen

Polttoainekoneikon testausohjelma

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on kehittää testausohjelma vaihtoehtoisen polttoaineen syöttökoneikkojen toiminnallisen ja sähköisen ohjauksen varmistamiseksi sekä laatia luotettava dokumentaatio testien toistamista varten.

Työssä perehdytään perinteisiä sekä vaihtoehtoisia polttoaineita käyttäviin polttoaineen syöttökoneikkoihin ja niiden eroavaisuuksiin testauksen kannalta. Sen lisäksi tutustutaan potentiaalisten polttoaineiden ominaisuuksiin ja niistä aiheutuviin vaatimuksiin. Tutkimustyö toteutettiin pääasiassa keräämällä dataa Auramarinen testikoneikosta sekä aiemmista perinteisistä syöttökoneikoista.

Työn tuloksena on luotu testausohjelma, josta pienillä tapauskohtaisilla muutoksilla saadaan sovellettua standardisoitu testausmenetelmä, jota voidaan käyttää muun muassa laadunvarmistukseen osana laitteen toimitusta.

Asiasanat:

Testaus, meriteollisuus, vaihtoehtoiset polttoaineet, polttoainejärjestelmät

Bachelor's Thesis | Abstract

Turku University of Applied Sciences

Mechanical Engineering

2023 | 50 pages 2 appendices

Santeri Virtanen

Testing plan for a fuel supply unit

The objective of this thesis was to develop a testing program to ensure the functional and electrical control of the alternative fuel supply system, as well as to create reliable documentation so that any performed tests can be repeated.

The study delves into both traditional and alternative fuel supply systems, focusing on their differences concerning testing. Additionally, the study analyzes the characteristics of potential fuels and the requirements arising from them. The research was primarily conducted by gathering data from Auramarine's testing system and from previous traditional fuel supply systems.

As a result, a testing program has been developed. With some case-specific modifications, this program can be used as a standardized testing process, applicable, among other things, for quality assurance as part of the device delivery.

Keywords:

Testing, marine industry, alternative fuels, fuel systems

Sisältö

Käytetyt lyhenteet tai sanasto	8
1 Johdanto	9
1.1 Tausta	9
1.2 Työn tavoite	10
1.3 Tiedonhankinta ja tutkimusmenetelmät	10
2 Polttoaineen syöttökoneikko	12
2.1 Perinteinen polttoainejärjestelmä	13
2.1.1 Syöttöpuoli	13
2.1.2 Boosterpuoli	14
2.2 Vaihtoehtoinen polttoainejärjestelmä	14
3 Vaihtoehtoiset polttoaineet	17
3.1 Metanoli	17
3.2 Ammoniakki	18
3.3 LNG eli nesteytetty maakaasu	18
3.4 Vety	19
4 Standardit ja säädökset	20
4.1 Luokituslaitokset	20
4.2 Laitteistojen standardit	21
5 Testausjärjestelmän kuvaus	23
5.1 Testausjärjestelmän komponentit	24
5.1.1 Putkisto	24
5.1.2 Säiliö	24
5.1.3 Instrumentointi	24
5.2 Toimintojen kuvaus	25
5.2.1 Esitäyttö ja pumppaus	25
5.2.2 Kulutuksenmuutos	25
5.2.3 Kiertolinja	26

5.2.4 Tyhjennys	26
6 Testiajot	27
6.1 Käynnistys	27
6.2 Ilmaus	28
6.3 Kulutuksen muutokset	29
6.3.1 Kulutussimulaatioventtiili	29
6.3.2 Maksimikulutuksenmuutos	30
6.4 Kiertolinja	33
6.5 Pysäytys	34
7 Testausohjelma	35
7.1 Testijärjestys	35
7.2 Venttiilit	35
7.3 Anturit ja mittarit	35
7.4 Manuaalisten sekvenssien testaus	36
7.5 Automaattisten sekvenssien testaus	36
8 Yhteenveto	37
Lähteet	39

Liitteet

Liite 1. Testausohjeet

Liite 2. Testipohja

Kuvat

Kuva 1. MGO Unit AMF-M-40-MGO, (Auramarine Oy).	12
Kuva 2. Esimerkki perinteisen polttoainejärjestelmän toimintakaaviosta. (Jääskeläinen & Khair 2013.)	13
Kuva 3. Metanolikoneikko, (Auramarine Oy).	15
Kuva 4. Vaihtoehtoisen syöttökoneikon yksinkertaistettu PI-kaavio.	16
Kuva 5. ATEX-laitteen CE-merkintä ja räjähdysuojauksen erikoismerkintä. (Tukes.)	21
Kuva 6. Testausjärjestelmä.	23

Kuviot

Kuvio 1. Pumpun tuottopaine käynnistyksessä.	27
Kuvio 2. Ilmaus ajon aikana.	28
Kuvio 3. Kulutus täysin auki.	29
Kuvio 4. Kulutus täysin kiinni.	30
Kuvio 5. Kulutuksenmuutos, virtausnopeus.	31
Kuvio 6. Maksimikulutuksenmuutos 2, paine.	32
Kuvio 7. Maksimikulutuksenmuutos 2, virtausnopeus.	32
Kuvio 8. Kiertolinjan aiheuttama tehohäviö.	33
Kuvio 9. Pumpun tuottopaine pysäytyksessä.	34

Taulukot

Taulukko 1. Polttoaineiden ominaisuudet.	17
--	----

Taulukko 2. Tarvitut mittauslaitteet.	46
Taulukko 3. Sähkötestit.	47
Taulukko 4. Toiminnalliset testit.	48

Käytetyt lyhenteet tai sanasto

ECA	Emission Control Area. IMO:n luoma päästöjenhallinta-alue.
HFO	Heavy Fuel Oil. Raskas polttoöljy.
HMI	Human Machine Interface. Näyttöpaneeli.
IMO	International Maritime Organization. Kansainvälinen merenkulun turvallisuusasioita hallinnoiva järjestö.
NPSH	Net Positive Suction Head.
MDO	Marine Diesel Oil. Meridieselöljy.
MGO	Marine Gas Oil. Meriliikenteen kaasuöljy.
PLC	Programmable Logic Controller. Ohjelmoitava logiikka.
SECA	Sulphur Emission Control Area.
SOx	Sulphur oxide. Rikkioksidi.
VSD	Variable-Speed Drive. Taajuudenmuuttaja.

1 Johdanto

1.1 Tausta

Merenkulkualalla on elintärkeä rooli maailmantaloudessa. Noin 90 % maailman kauppaliikenteestä kulkee meriteitse (IMO 2023a). Perinteisesti merenkulussa käytetyt polttoaineet, kuten HFO (heavy fuel oil) ja MDO (marine diesel oil), aiheuttavat kuitenkin merkittäviä huolenaiheita erityisesti ympäristön ja ilmaston kannalta. International Maritime Organization (IMO) vastaa kansainvälisen merenkulun sääntelystä. Se on perustanut useita päästöjenhallinta-alueita (Emission Control Area, ECA) ympäri maailmaa, jotka pyrkivät vähentämään merenkulun ympäristövaikutuksia niillä alueilla, joilla on paljon meriliikennettä. Näiden alueiden keskeiset säädökset perustuvat erityisesti rikkioksidipäästöjen (SO_x) vähentämiseen. IMO on asettanut tarkat rajat polttoaineiden rikkipitoisuudelle, kun ne toimivat ECA-alueilla. SECA-alueella (Sulphur Emission Control Area) raja oli alun perin vedetty 1,00 % rikkipitoisuuteen. Kuitenkin 2015 alkaen raja alennettiin edelleen 0,10 %. Tämä tarkoittaa, että ECA-alueilla toimivien alusten on käytettävä polttoainetta, jonka rikkipitoisuus ei ylitä 0,10 %, ellei niissä ole pakokaasun puhdistusjärjestelmiä kuten rikkipesureita. (IMO 2023b.)

Tulevaisuudessa rajoituksia voidaan tuoda entistäkin alemmaksi, joka on syytä ottaa huomioon etenkin uusien laivojen rakennuksessa. Viime vuosina onkin herännyt kasvavaa kiinnostusta vaihtoehtoisiin polttoaineisiin, jotka vähentäisivät merenkulun ympäristövaikutuksia. Esimerkiksi metanolia sekä ammoniakkaa pidetään puhtaampina polttoaineina niiden alhaisempien rikkisisältöjen ja vähäisempien hiukkaspäästöjen ansiosta. Näiden vaihtoehtoisten polttoaineiden käyttöönotossa on kuitenkin omat haasteensa, ja niiden ratkomiseen tarvitaan uutta kalustoa ja kehitystyötä.

1.2 Työn tavoite

Tämän opinnäytetyön aiheena on testausohjelman, ja siihen liittyvän muun testausdokumentaation luominen sekä kehittäminen vaihtoehtoisen polttoaineen syöttökoneikolle. Opinnäytetyö tehtiin Auramarine Oy:n toimeksiannosta. Tuotettua dokumentaatiota voidaan käyttää tulevaisuudessa esimerkiksi laadunvarmistukseen.

Yksinkertaistettuna polttoaineen syöttökoneikon tehtävä on laivassa tai voimalaitoksessa nimensä mukaisesti syöttää polttoainetta sitä tarvitsevalle laitteelle, useimmiten suoraan polttomootorille. Jotta voidaan taata näiden koneikkojen turvallinen ja luotettava toiminta, on oltava olemassa standardisoitu testausohjelma, jolla todennetaan laitteelle asetetut vaatimukset sen toiminnallisuudesta sekä turvallisuudesta. Koska vaihtoehtoisten polttoaineiden ominaisuudet poikkeavat merkittävästi perinteistä meripolttoaineista, tulee myös syöttökoneikon suunnittelussa ottaa huomioon uudet vaatimukset. Tämä tulee niin ikään näkymään testiohjelman kehityksessä.

1.3 Tiedonhankinta ja tutkimusmenetelmät

Vaihtoehtoisten polttoaineiden käyttö on vielä monelta osa-alueelta kehitys- ja teorian tasolla, joten kirjallista aineistoa uudentyypisistä polttoainekoneikoista on hyvin niukasti. Se kirjallinen aineisto, mitä on olemassa ja mitä tässä työssä käytetään, liittyy muun muassa polttoaineiden ominaisuuksiin ja teoreettisiin käyttötarkoituksiin sekä standardeihin.

Työn ensisijainen tavoite eli testiohjelman luominen toteutetaan pääosin empiirisellä tutkimuksella. Testidatan keräämiseen on käytössä testikoneikko, joka vastaa perusominaisuuksiltaan vaihtoehtoiselle polttoaineelle suunniteltua syöttökoneikkoa. Testikoneikon toiminnasta voidaan tehdä päätelmiä joko visuaalisesti havainnoimalla tai tuomalla sensorien mittaamaa dataa tietokoneelle. Käsittelemällä raaka mittadata helpommin luettavaan muotoon, voidaan varmistua laitteen oikeanlaisesta toiminnasta.

Uudentyyppisissä polttoaineen syöttökoneikoissa on monia toiminnallisia eroja perinteisiin verrattuna, mutta myös samankaltaisuuksia löytyy. Perinteisten mallien dokumentaatiota, sekä muuta aineistoa voidaan siis joissain määrin käyttää referenssinä.

2 Polttoaineen syöttökoneikko

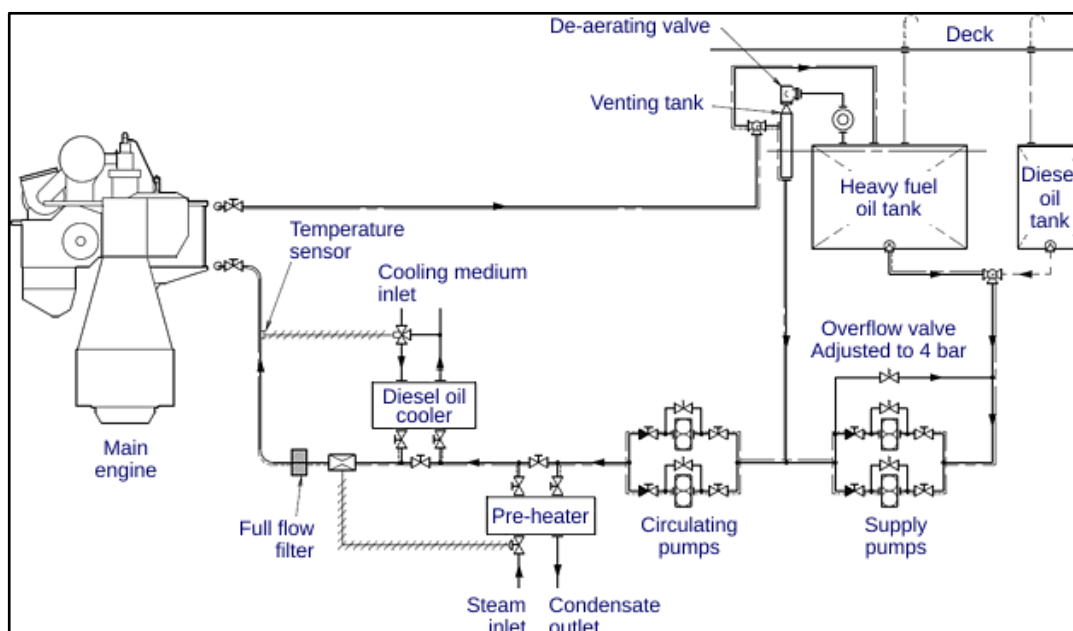
Polttoaineen syöttökoneikon (kuva 1) tehtävä on syöttää polttoainetta laivan päivätankilta (service tank) moottorille. Samalla koneikko säätelee polttoaineen virtausta, painetta ja lämpötilaa. Useimmiten koneikko koostuu yhdestä tai useammasta pumpusta, suodattimista, lämmönvaihtimista (käytettävästä polttoaineesta riippuen lämmitykseen ja/tai jäähdytykseen), mittalaitteista (paine, lämpötila, virtausnopeus, viskositeetti ja pinnankorkeus) sekä sähkökaapista (PLC ja taajuusmuuttaja).



Kuva 1. MGO Unit AMF-M-40-MGO, (Auramarine Oy).

2.1 Perinteinen polttoainejärjestelmä

Perinteisessä polttoainejärjestelmässä (kuva 2) saattaa olla yksi tai useampi käytettävä polttoaine, esimerkiksi HFO ja MDO. Polttoaine pumpataan halutulta päivätankilta syöttökoneikolle. Päivätankissa on nimensä mukaisesti laivan päivässä kuluttaman verran polttoainetta. Varsinkin perinteisiä polttoaineita käytävissä malleissa pumppaus usein jakautuu kahteen osaan, syöttöpuoleen sekä boosterpuoleen (kuvassa 2 supply ja circulating pumps).



Kuva 2. Esimerkki perinteisen polttoainejärjestelmän toimintakaaviosta. (Jääskeläinen & Khair 2013.)

2.1.1 Syöttöpuoli

Syöttöpuoli pumppaa polttoainetta laivan päivätankilta boosterpuolelle. Perinteisessä polttoainejärjestelmässä polttoainetta pumpataan jatkuvasti moottorin maksimikulutuksen verran, jolloin mahdollinen ylijäämä kulkeutuu paluulinjaa pitkin takaisin syöttöpumppujen imupuolelle. Paluulinjan venttiili aukeaa, kun tietty paineraja ylittyy.

2.1.2 Boosterpuoli

Boosterpuoli ylläpitää moottorin kulutukseen nähden moninkertaista virtaamaa, josta moottori ottaa tarvittavan kulutuksen verran pois. Niin sanotussa ”boosterkierrossa” ylijäämä polttoaine kulkeutuu moottorilta takaisin sekoittumissäiliöön, josta polttoaine taas kulkeutuu boosterpumppujen imupuolelle. Moottorin sekä boosterpumppujen välissä on yleensä yksi tai useampi lämmönvaihdin. Käytettävästä polttoaineesta ja olosuhteista riippuen polttoainetta voi olla tarve joko jäähdyttää tai lämmittää, jotta sen viskositeetti olisi sopiva käytössä olevalle moottorille.

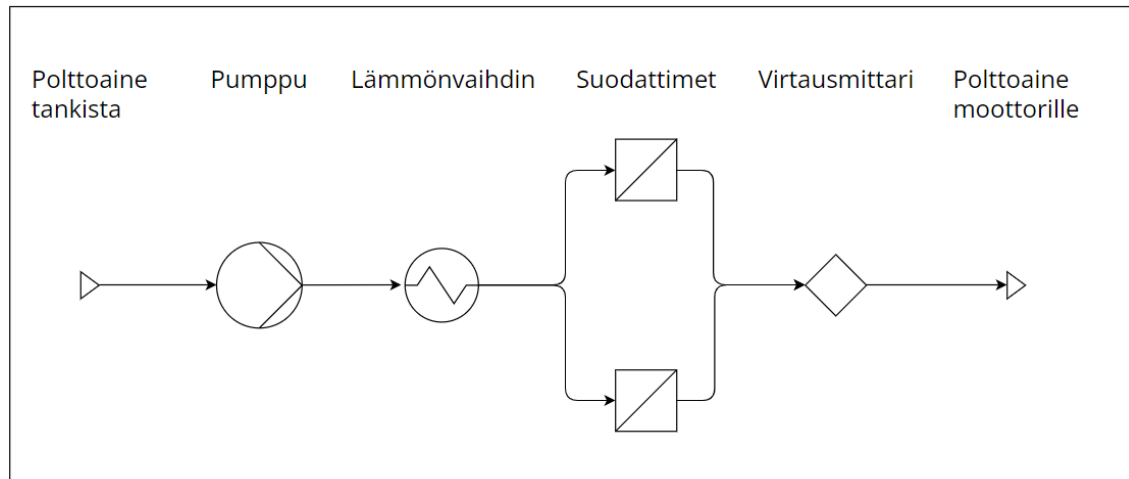
2.2 Vaihtoehtoinen polttoainejärjestelmä

Vaihtoehtoisista polttoainetta käyttävissä uudentyyppisissä syöttökoneikoissa saattaa olla merkittäviä toiminnallisia eroja verrattuna perinteisiin malleihin. Käyttökohteesta ja käytettävästä polttoaineesta riippuen erilliset syöttö- ja boosterpuolen pumput eivät välttämättä aina ole tarpeellisia. Muun muassa tässä opinnäytetyössä tutkimuksen kohteena oleva metanolikoneikko (kuva 3) vastaa kokonaisuutta, jossa ei ole erillisiä syöttö- ja boosterpuolia. Erillisiä puolia ei ole, koska metanolikiertoa ei nähdä tarpeelliseksi metanolikäyttöisten moottorien nykydesignissa.



Kuva 3. Metanolikoneikko, (Auramarine Oy).

Varmennussyistä monet komponentit on usein kahdennettu, mikä ei myöskään ole testikoneikossa tarpeen. Toisin kuin perinteisessä mallissa, jossa boosterpuoli ylläpitää aina moottorin maksimikulutuksen mukaista virtausta, testikoneikko syöttää vain tarvittavan määrän polttoainetta. Tämä saavutetaan PID-säätimellä, joka prosessipaineen perusteella säätelee pumpun moottorin kierrosnopeutta. Moottorin vaatima paine ylläpidetään asetusarvossa, samalla kun virtaus muuttuu. Näin saadaan syöttöpaine vakioitua ilman polttoaineenkiertoa ja paineenpitoventtiiliäkin.



Kuva 4. Vaihtoehdoisen syöttökoneikon yksinkertaistettu PI-kaavio.

Kyseisessä järjestelmässä (kuva 4) pumppu imee polttoaineen päivätankilta, ja tuottaa suoraan moottorivalmistajan määrittelemän käyttöpaineen. Aivan kuten perinteisessä järjestelmässä, polttoaine kulkeutuu lämmönvaihtimen läpi, joka jäähdyttää tai lämmittää polttoaineen sopivaan lämpötilaan. Suodattimet puhdistavat polttoaineen epäpuhtauksista.

3 Vaihtoehtoiset polttoaineet

Taulukossa 1 luetellaan vaihtoehtoisten polttoaineiden ominaisuuksia. Seuraavissa luvuissa keskitytään näiden ominaisuuksien aiheuttamiin edellytyksiin ja käytännön eroihin perinteisiin meripolttoaineisiin verrattuna. Mahdollisia eroja tutkitaan myös syöttökoneikon toiminnan sekä turvallisen käytön kannalta.

Taulukko 1. Polttoaineiden ominaisuudet.

Polttoaine	Lämpöarvo (LHV) [MJ/kg]	Energiatiheys [GJ/m ³]	Varastointipaine [bar]	Varastointilämpötila [°C]
MGO	42,7	36,6	1	20
LNG	50	23,4	1	-162
Metanoli	19,9	15,8	1	20
Nesteytetty ammoniakki	18,6	12,7	1	-34
			10	20
Nesteytetty vety	120	8,5	1	-253
Puristettu vety	120	7,5	700	20

3.1 Metanoli

Tämänhetkisen meriteollisuuden kehityskulun ja ilmapiirin mukaan voisi päätellä, että metanoli on yksi lupaavimmista vaihtoehtoisista polttoaineista. Metanolille on jo olemassa maailmanlaajuinen toimitusketju, ja sitä on saatavilla yli 125 satamassa ympäri maailmaa (Methanex 2023). Suurin osa tällä hetkellä tuotetusta metanolista on vielä kuitenkin valmistettu maakaasusta, jolloin päästövähennyksiä ei synny. Sen sijaan uusiutuvista materiaaleista, kuten biomassasta valmistetun metanolin käyttö polttoaineena vähentäisi

merkittävästi muun muassa hiilidioksidi- ja rikkipäästöjä perinteisiin polttoaineisiin verrattuna.

Etenkin metanolin ominaisuudet tekevät siitä houkuttelevan vaihtoehdon. Muihin vaihtoehtoihin polttoaineisiin verrattuna (lukuun ottamatta LNG:tä) metanolilla on suhteellisen korkea energiatiheys, jolloin tarvittava tila polttoainetankeille on pienempi. Metanolin varastointi on myös huomattavasti yksinkertaisempaa, sillä se on huoneenlämmössä nestemäistä. (Sustainable Ships 2023.)

3.2 Ammoniakki

Myös ammoniakki on herättänyt kasvavaa kiinnostusta polttoaineena, sillä kuten metanoli, puhtaasti tuotettuna se vähentäisi merkittävästi päästöjä. Palamistuotteena ammoniakista syntyy ainoastaan typpeä ja vettä. Ammoniakkia polttoaineena käyttävä järjestelmä on kuitenkin melko vaativa toteuttaa. Haasteita tuottaa muun muassa ammoniakin myrkyllisyys ja syövyttävyyys, mitkä asettavat erikoisvaatimuksia sen käsittelylle, varastoinnille sekä kuljetukselle. Ammoniakki on myös huoneenlämmössä kaasumaisessa muodossa, joten tilan säästämiseksi se täytyy joko jäähdyttää tai puristaa nestemäiseksi. (EMSA 2022.)

3.3 LNG eli nesteytetty maakaasu

LNG eli nesteytetty maakaasu on fossiilinen polttoaine, jota testattiin jo 70-luvulla. Sen käyttö LNG-tankkereiden ulkopuolella on kuitenkin kerännyt kiinnostusta vasta muutamien vuosien ajan. Vuosina 2020 ja 2021 tilattujen LNG alusten osuus uusien alusten bruttovetoisuudesta (gross tonnage) oli ensimmäistä kertaa merkittävä. LNG:n tuomat ilmastohyödyt ovat moniselitteiset. Perinteisiin polttoaineisiin verrattuna hiilidioksidipäästöt ovat merkittävästi pienemmät, eikä rikkipäästöjä ole lähes lainkaan. Ongelmana

LNG:ssä on kuitenkin sen käytöstä aiheutuvat metaanipäästöt, jotka käytännössä mitätöivät vähennettyjen hiilidioksidipäästöjen hyödyt. (DNV 2023.)

3.4 Vety

Vety on niin ikään kerännyt huomiota vaihtoehtoisena polttoaineena, sillä puhtaasti tuotettuna se on täysin päästötön. Puhdasta vetyä voidaan tuottaa veden elektrolyysillä, jossa vesimolekyyli halkaistaan sähköllä happi- ja vetyatomeihin. Vaihtoehtoisista polttoaineista vedyn laajamittainen käyttö on kuitenkin kauimpana käytäntöön panosta. Merkittävin pullonkaula vedylle on sen säilömisen haastavuus. Lämpöarvoltaan vety on erinomainen jopa fossiilisiin polttoaineisiin verrattuna, mutta sen matala energiatiheys edellyttää polttoaineen tiivistämistä esimerkiksi nesteyttämällä. (Van Hoecke ym. 2021.)

4 Standardit ja säädökset

Meriteollisuutta ohjataan kansainvälisillä standardeilla ja säädöksillä, joiden tarkoituksena on varmistaa alusten turvallisuus, suojella meriympäristöä sekä edistää reilua ja eettistä käytäntöä. Standardien ja säädösten noudattaminen on tärkeää suunnittelijoille, valmistajille, laivanvarustajille, sekä muille meriteollisuuden toimijoille. Tavoitteena on alusten turvallisuuden takaaminen, meriympäristön suojeleminen sekä meriteollisuuden maineen säilyttäminen. Sääntöjen noudattamista valvotaan lippuvaltioiden ja luokituslaitosten suorittamilla tarkastuksilla.

4.1 Luokituslaitokset

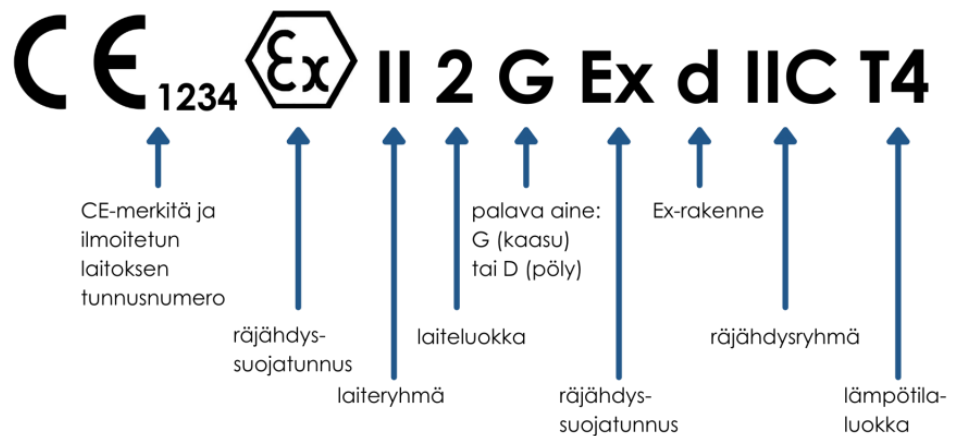
Luokituslaitokset ovat yksityisiä organisaatioita, joilla on tärkeä rooli meriteollisuudessa. Niiden tehtävänä on laivojen ja offshore rakennelmien tarkastaminen. Luokituslaitokset toimivat itsenäisesti laivanomistajista ja laivanrakentajista riippumatta, ja ne laativat dokumentaation standardeista ja säädöksistä, joilla ohjataan alusten suunnittelua, rakentamista ja huoltoa. Turvallisuuden ja laadun varmistaminen on luokituslaitoksille ensisijaisen tärkeää, jotta vahinkojen ja saasteiden riskit voitaisiin ehkäistä tai ainakin minimoida. Merkittävimpiä luokituslaitoksia ovat muun muassa DNV (DNV GL), Bureau Veritas (BV), Lloyd's Register (LR), American Bureau of Shipping (ABS) ja ClassNK. (EMSA 2023.)

Polttoaineen syöttökoneikon osalta luokituslaitokset keskittyvät erityisesti sen turvalliseen toimintaan ja redundanttisuuteen. Kun kyseessä on syöttökoneikko, jossa käytetään mahdollisesti myrkyllistä alhaisen leimahduspisteen polttoainetta (esim. metanoli, ammoniakki), on otettava huomioon luokituslaitosten laatimat uudet turvallisuusjärjestelyt ja vaatimukset. Esimerkiksi metanolisyöttökoneikossa kaikki putkistot on pystyttävä tyhjentämään ja inertoimaan ennen huoltotoimenpiteitä tai hätäpysäytyksen

seurauksena (Bureau Veritas 2022, 26). Tämä on yksi toiminnoista, jota testikoneikon avulla pyritään varmistamaan.

4.2 Laitteistojen standardit

Alhaisen leimahduspisteen omaavia polttoaineita käytettäessä räjähdysvaarallisuus on erityisen huomion kohteena. Räjähdysvaarallisissa tiloissa käytettävä sähköinen ja mekaaninen laitteisto on siten oltava luokiteltu kyseiseen tilaan turvalliseksi. Toisin sanoen, laitteisto ei saa normaalissa toiminnassa tai edes vikatilanteessa tuottaa kipinää, joka saisi mahdollisen räjähtävän kaasuseoksen syttymään. Näitä sertifiointeja ja luokituksia tehdään standardisoinnin ja lainsäädännön pohjalta. Valmistajan tulee kiinnittää tuotteeseen tarvittavat merkinnät ennen tuotteen markkinoille saattamista tai käyttöönottoa (kuva 5).



Kuva 5. ATEX-laitteen CE-merkintä ja räjähdysuojauksen erikoismerkintä. (Tukes.)

ATEX on Euroopan unionin direktiivi, joka asettaa vaatimuksia räjähdysvaarallisissa tiloissa käytettäville laitteille. IECEx on puolestaan kansainvälinen standardisointijärjestelmä, joka ajaa pitkälti samoja asioita, mutta toisin kuin ATEX:ssa, jossa sertifikaatit perustuvat lakiin, IECEx:ssä ne perustuvat standardeihin. (CESP 2022.) Polttoaineen syöttökoneikossa tarvittavat standardit otetaan huomioon jo suunnitteluvaiheessa.

5 Testausjärjestelmän kuvaus

Testidatan keruuseen ja lopullisen testausohjelman kehitykseen on käytössä kyseisiin tarkoituksiin rakennettu testausjärjestelmä (kuva 6). Järjestelmä koostuu itse syöttökoneikosta, testilaitteistosta, sekä säiliöstä.

Perusominaisuuksiltaan testisyöttökoneikko vastaa hyvin pitkälti todellista polttoaineen syöttökoneikkoa. Joitain komponentteja tai järjestelmiä on kuitenkin jätetty asentamatta, jos ne on koettu testikäytössä tarpeettomaksi.

Esimerkiksi polttoaineen suodatuksen tai jäähdytykseen liittyvät komponentit eivät ole tarpeen, sillä testikoneikkoa on tarkoitus käyttää pääasiassa vesijohtovedellä. Veden käytöllä varmistetaan laitteen turvallinen toiminta, sekä vältetään turhilta kuluilta. Veden sekä potentiaalisen vaihtoehdoisen polttoaineen ominaisuuksien erot (esimerkiksi viskositeetti) otetaan huomioon koneikon toiminnassa, silloin kun se on oleellista.



Kuva 6. Testausjärjestelmä.

Pääpiirteittäin testikoneikko koostuu pumpusta, antureista (paine, lämpötila, pinnankorkeus), mittareista (virtaus), venttiileistä (paineilmalla ohjatut-, sähköiset-, turva-, sekä käsiventtiilit). Testikoneikon sähkökaapista löytyy PLC (Programmable Logic Controller), pumpun taajuudenmuunnin eli VSD (Variable-Speed Drive) sekä näyttöpaneeli eli HMI (Human Machine Interface).

5.1 Testausjärjestelmän komponentit

Testausjärjestelmä koostuu seuraavista komponenteista. Itse syöttökoneikon lisäksi järjestelmään kuuluu testilaite, jolla muun muassa simuloidaan kulutusta.

5.1.1 Putkisto

Testikoneikossa käytetään läpinäkyvää PVC putkea havainnoinnin parantamiseksi. Joitain testikoneikosta puuttuvia komponentteja on kompensoitu lisäputkella, jolloin saadaan aikaiseksi samankaltainen painehäviö kuin mitä itse puuttuva komponentti tuottaisi.

5.1.2 Säiliö

Testikoneikko voidaan täyttää esimerkiksi IBC-tankista. Tankista täytettäessä on otettava huomioon vedenpinnan korkeus, joka vaikuttaa esimerkiksi esitäyttöön painovoiman avulla. Vettä kierrätetään koneikon läpi takaisin tankkiin, jotta turhalta kulutukselta vältytään.

5.1.3 Instrumentointi

Testikoneikossa käytetään monenlaisia antureita ja mittareita, joiden lähettämällä tiedolla ohjataan järjestelmän automatiikkaa. Dataa voidaan myös PLC:n kautta kerätä ohjelmointiympäristöön kuten Siemens TIA Portal:iin tai Codesys:iin. Data voidaan käsitellä ja visualisoida, mikä mahdollistaa johtopäätöksiä muodostamisen koneikon toiminnasta.

Polttoaineen kulutusta simuloidaan kyseiseen tehtävään tarkoitetulla venttiilillä, jolla voidaan tarkasti säätää virtausta esimerkiksi vastaamaan tietyn moottorityypin tuottamaa vaihtelevaa kulutusta.

5.2 Toimintojen kuvaus

Seuraavissa luvuissa kuvaillaan testausjärjestelmän toimintoja. Perustoimintojen lisäksi kuvaillaan koneikon käytön simulointiin liittyviä toimintoja.

5.2.1 Esitäyttö ja pumppaus

Kun koneikko on pysähtyneessä tilassa ja se on tyhjä nesteistä, pumppua ei saa käyttää. Esitäyttö suoritetaan gravitaation avulla. Kun vedenpinta pumpussa on tarpeeksi korkealla, pumppu voidaan käynnistää ja ilmata.

Pumppu on VSD-ohjattu. Pumpun moottorin nopeutta voidaan säätää joko manuaalisesti, tai sitten se voidaan asettaa paineohjatuksi, jolloin PID-ohjain pyrkii ylläpitämään paineen valitussa asetusarvossa. Imupainetta ei päästetä alle tietyn rajan, jonka määrittää niin sanottu NPSH-arvo. NPSH-arvo on absoluuttinen minimipaine, joka täytyy olla pumpun imupuolella kavitoinnin estämiseksi.

5.2.2 Kulutuksenmuutos

Moottorin ottaman kulutuksen simuloimiseksi testilaitteistosta löytyy kulutuksensimulointiventtiili. Kulutuksensimulointiventtiilinä toimii tässä tapauksessa toimilaitteellinen istukkaventtiili, jota operoidaan HMI-näytöltä. Avaamalla tai sulkemalla venttiiliä muutetaan syöttökoneikosta ulostulevaa virtausta, joka kuvastaa moottorin muuttuvaa kulutusta.

5.2.3 Kiertolinja

Kun kulutussimulaattoria suljetaan ja kulutus laskee, myös virtaus pumpun läpi laskee. Kun virtaus laskee alle määritellyn asetusarvon, kiertolinja ohjaa nesteen takaisin pumpun imupuolelle. Näin vältytään käyttämästä pumppua alle pumppuvalmistajan määrittämän minimivirtaaman. Koneikossa voidaan tällöin turvallisesti ylläpitää painetta, vaikka virtaus kuluttajalle olisikin täysin pysähtynyt.

5.2.4 Tyhjennys

Jotta koneikkoa voitaisiin huoltaa, täytyy se olla tyhjennettävissä. Tyhjennys tapahtuu siihen tarkoitetuista tyhjennysventtiileistä ensin valuttamalla painovoiman avulla, jonka jälkeen loput nesteet voidaan työntää ulos paineilmalla.

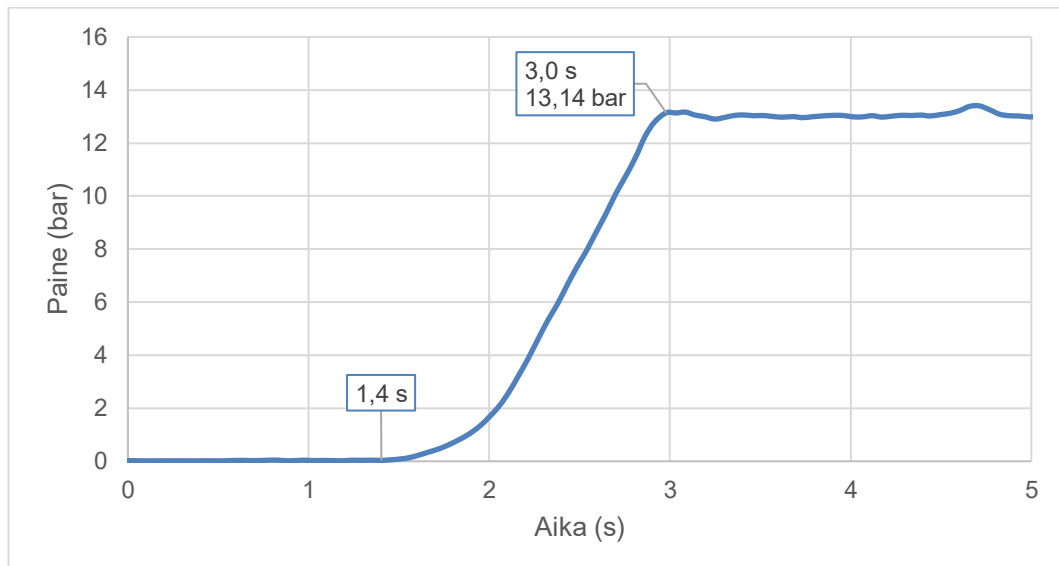
6 Testiajot

Tutkimusvaiheessa suoritettavat testiajot. Mahdollisia testauksen aikana tehtyjä huomioita analysoidaan testiohjelman kehityksen kannalta. Seuraavat kaaviot on tehty prosessoimalla testikoneikosta tuotua raakadataa.

6.1 Käynnistys

Polttoainekoneikon käynnistyksessä pumpun paine tuodaan mahdollisimman nopeasti tavoiteltuun asetuspaineseen. Alkutilanteessa koneikko on täytetty nesteellä, ilmattu sekä kytketty virtalähteeseen. Pumppu on asetettu PID-ohjaukseen, jolloin pumpun moottorin kierrosnopeus määräytyy tietyn asetuspaineen mukaan. Reaalipaine, jota vasten PID-ohjain vertaa asetuspainetta, saadaan pumpun tuottopuolella sijaitsevasta paineanturista.

Kun pumppu käynnistetään, taajuusmuuttajan syöttämä taajuus on hetkellisesti maksimissa, kunnes asetuspainetta saavutetaan. Tässä testissä asetuspainetta oli 13 bar.

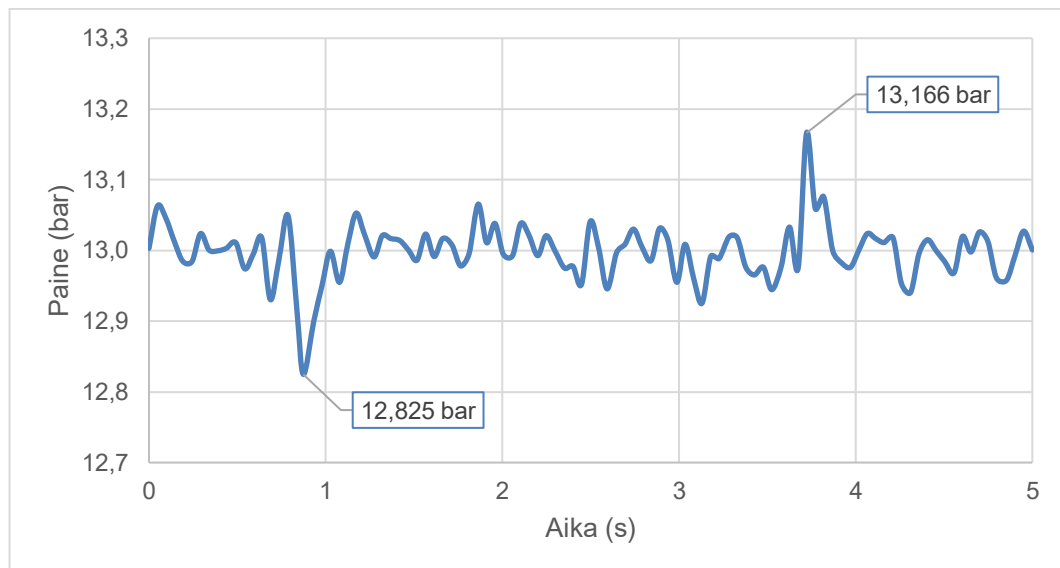


Kuvio 1. Pumpun tuottopaine käynnistyksessä.

Pumppu tavoittaa asetuspaineen noin 1,6 sekunnissa (kuvio 1). Tämän jälkeen paine pysyy tasaisena.

6.2 Ilmaus

Tehokkaan ja turvallisen toiminnan saavuttamiseksi koneikko tulee huolellisesti ilmata. Ylimääräinen ilma koneikossa aiheuttaa kavitaatiota, mikä saattaa aiheuttaa vahinkoa eri komponenteille. Ilmaus on myös erityisen tärkeää turvallisuuden kannalta, kun kyseessä on vaihtoehtoiset polttoaineet. Muun muassa ammoniakkin sekoittuessa ilmaan syntyy helposti räjähtävä seos.



Kuvio 2. Ilmaus ajon aikana.

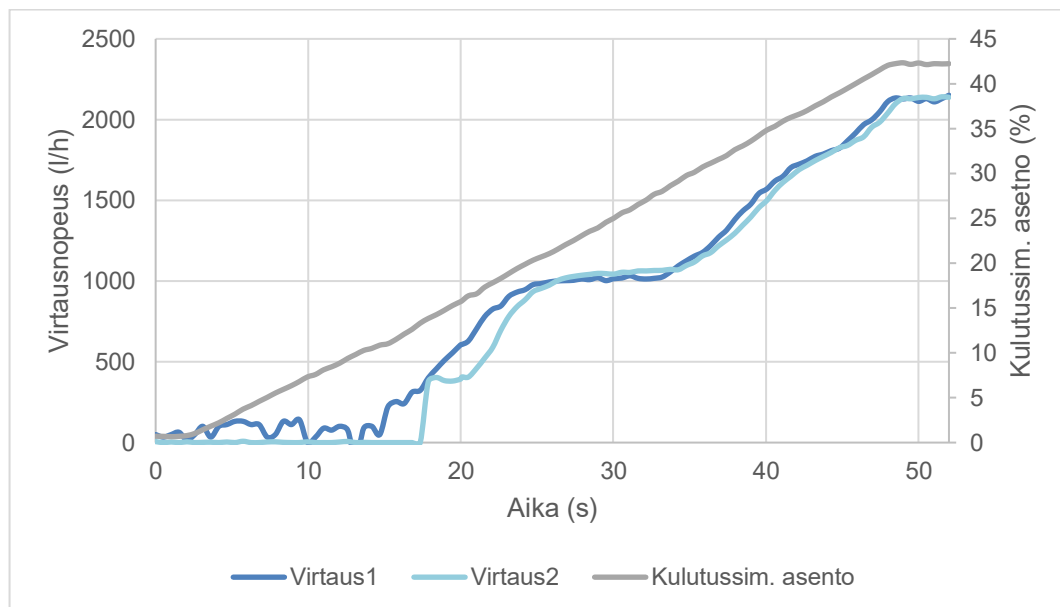
Ilmausventtiilin avaus ja sulkua aiheuttaa hetkellisen paine-eron (kuvio 2). PID-ohjain reagoi paine-eroon ja tuo paineen takaisin asetusarvoon. Paine-ero pysyy kuitenkin toleranssissa, joka tässä tapauksessa on $\pm 0,5$ bar.

6.3 Kulutuksen muutokset

Seuraavissa testeissä tutkitaan, miten koneikko kykenee reagoimaan erityyppisiin kulutuksen muutoksiin. Kulutuksen simulointiin käytettiin sähköistä kulutussimulaatioventtiiliä.

6.3.1 Kulutussimulaatioventtiili

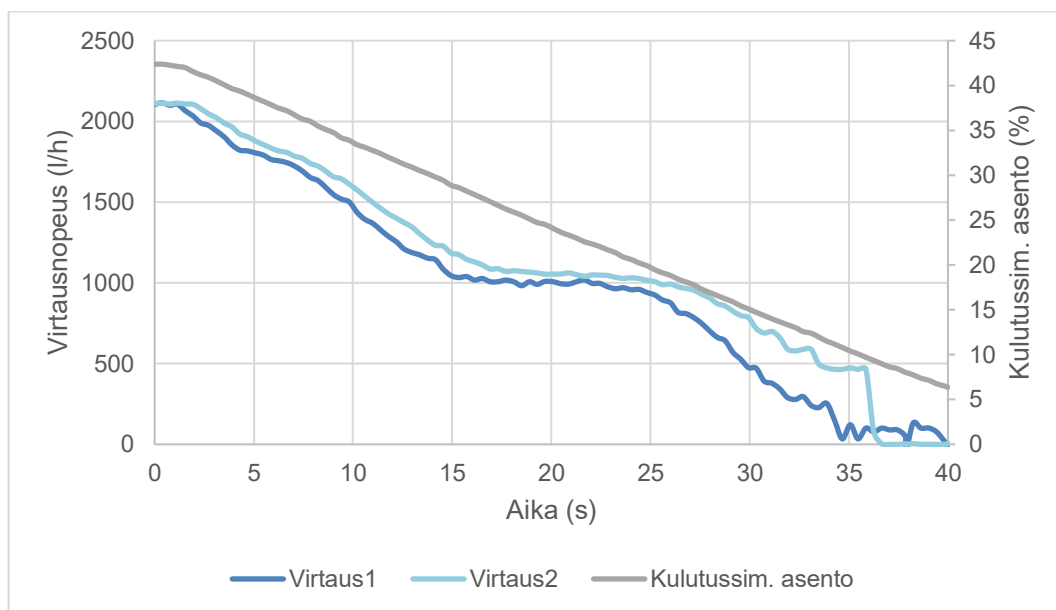
Ennen nopeampia kulutuksenmuutoksia testattiin itse kulutussimulaatioventtiilin toiminta. Asetuspaineen ollessa 13 bar, venttiili ajettiin rauhallisesti täysin suljetusta tilasta täysin auki.



Kuvio 3. Kulutus täysin auki.

Virtauksia mitataan kahdella eri mittausmenetelmällä. Virtaus 1 on mitattu orifice-virtausmittarilla ja Virtaus 2 juoksupyörällä varustetulla virtausmittarilla. Toimintaperiaatteiden erojen takia Virtaus 2 reagoi virtauksen muutoksiin hieman hitaammin. Kulutussimulaatioventtiilin asento 42 %-auki on valittu edustamaan täyttä kulutusta, sillä virtaus vastaa tuolloin potentiaalisen

käyttölaitteen ottamaa kulutusta. Kuten yllä olevasta kuvioista näkyy (kuvio 3), virtausnopeudet koneikossa eivät täydellisesti seuraa kulutussimulaatioventtiilin aukeamista. Tämä todennäköisesti johtuu käytetyn venttiilityypin epätarkkuudesta.

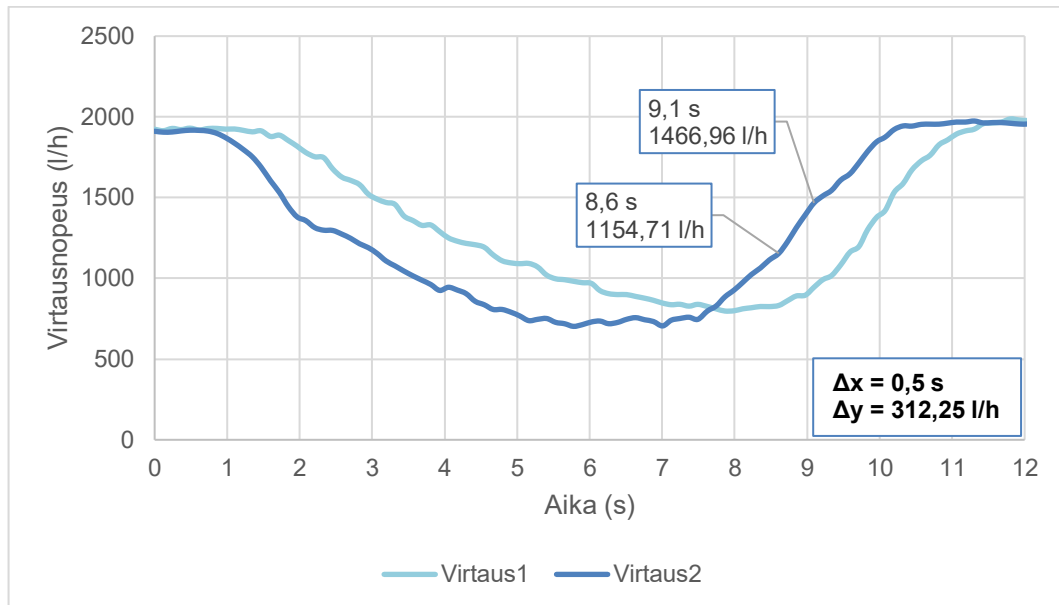


Kuvio 4. Kulutus täysin kiinni.

Sama ilmiö toistuu kulutussimulaatioventtiiliä suljettaessa. Noin 10 sekunnin ajan virtausnopeus pysyy samana, vaikka venttiilin toimilaite on tasaisessa liikkeessä (kuvio 4).

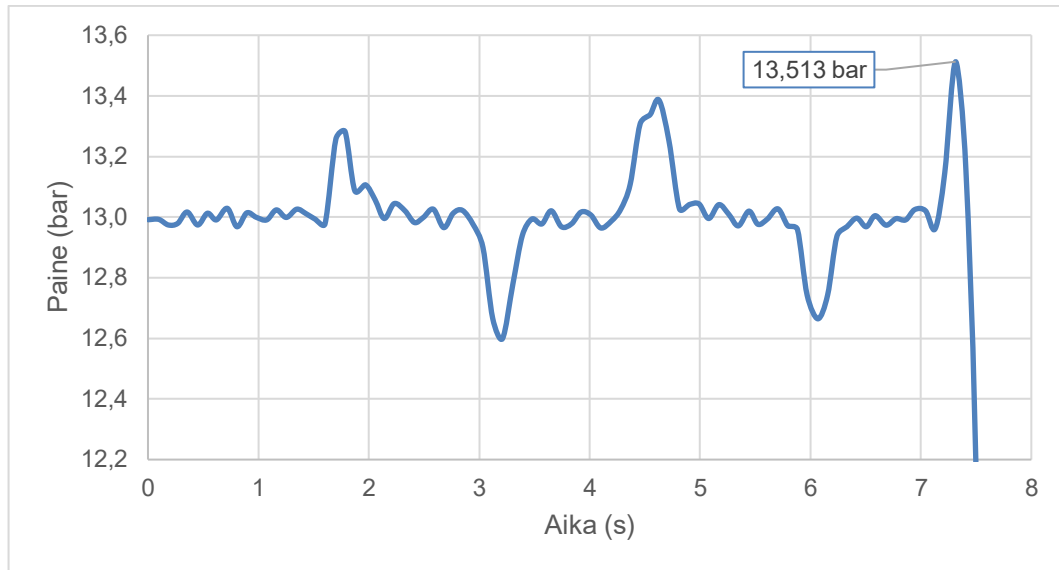
6.3.2 Maksimikulutuksenmuutos

Tällä testivaiheella tutkitaan koneikon kykyä reagoida nopeisiin kulutuksen muutoksiin. Erityisen tärkeää on PID-ohjauksen kyky nopeasti laskea tai nostaa pumpun kierrosnopeutta, jotta järjestelmään ei pääsisi syntymään toleranssin ylittävää paine-eroa. Pumpun käydessä ja asetuspaineen ollessa 13 bar, kulutussimulaatioventtiili ajetaan auki-asennosta maksiminopeudella lähes kiinni asti, ja heti takaisin auki.



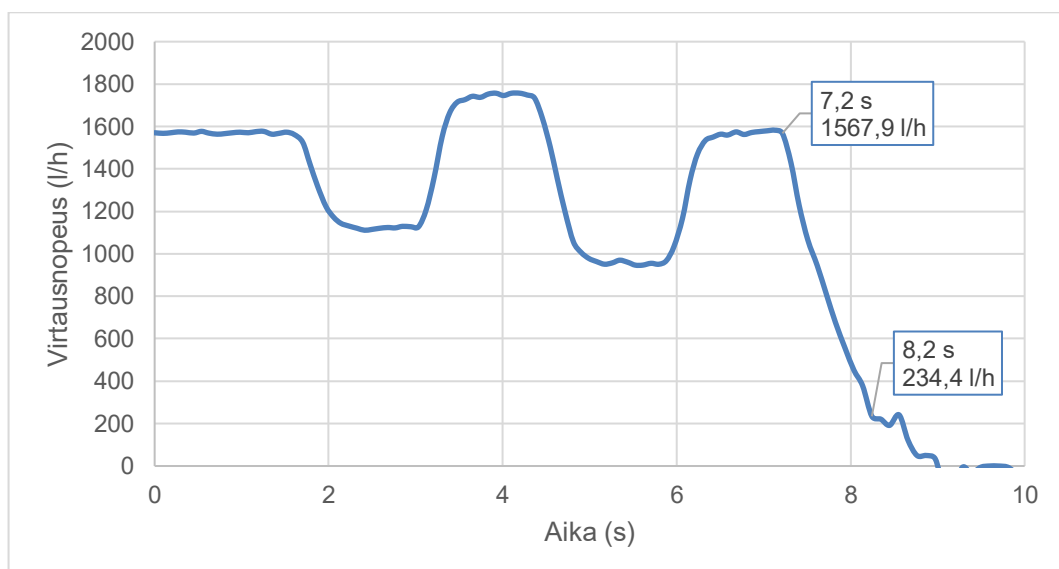
Kuvio 5. Kulutuksenmuutos, virtausnopeus.

Virtausnopeus muuttui suurimmillaan 312,25 l/h puoleessa sekunnissa (kuvio 5). Tämä on jo enemmän kuin tarpeeksi esimerkki käyttötarkoitukseen. Jotta kuitenkin voidaan varmistua, että liian nopean muutoksen seurauksena turvalogiikka pysäyttää pumpun halutulla tavalla, haetaan vielä painetoleranssin rajoittama maksimikulutuksenmuutos.



Kuvio 6. Maksimikulutuksenmuutos 2, paine.

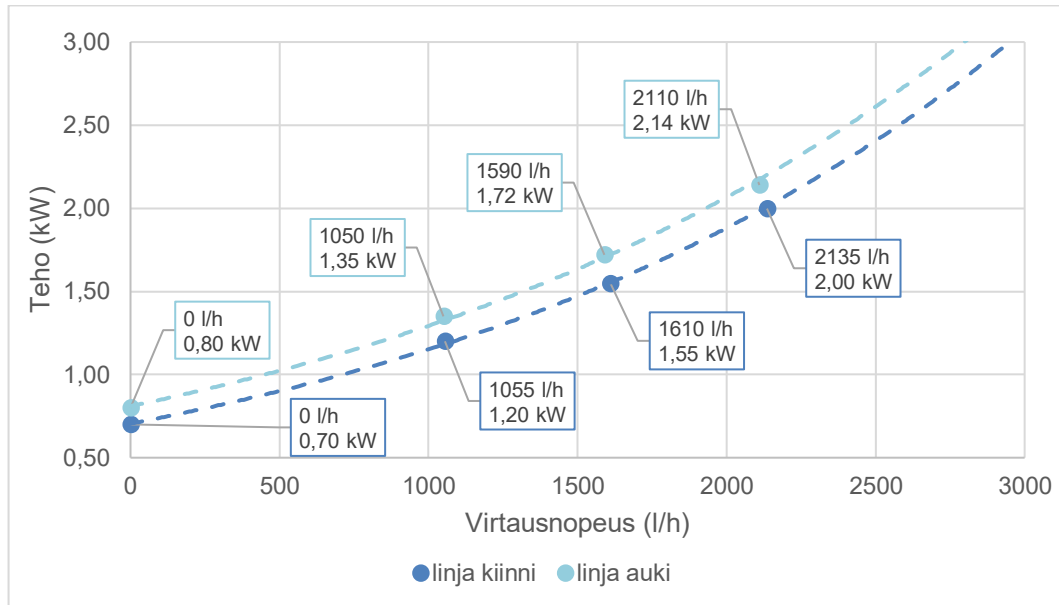
Kulutussimulaatioventtiiliä suljetaan ja avataan kerta toisensa jälkeen entistä nopeammin, kunnes PID-ohjain ei enää ehdi reagoimaan muutokseen tarpeeksi nopeasti (kuvio 6). Painetoleranssi ylittyy, jolloin turvalogiikka pysäyttää pumpun.



Kuvio 7. Maksimikulutuksenmuutos 2, virtausnopeus.

Pumpun pysähtyessä virtausnopeuden muutos oli 1333,51 l/h vain 1,02 sekunnissa (kuvio 7). Tämä muutos on jo paljon suurempi mitä realistisessa käytössä tapahtuisi, koneikko kuitenkin suoriutui testistä.

6.4 Kiertolinja

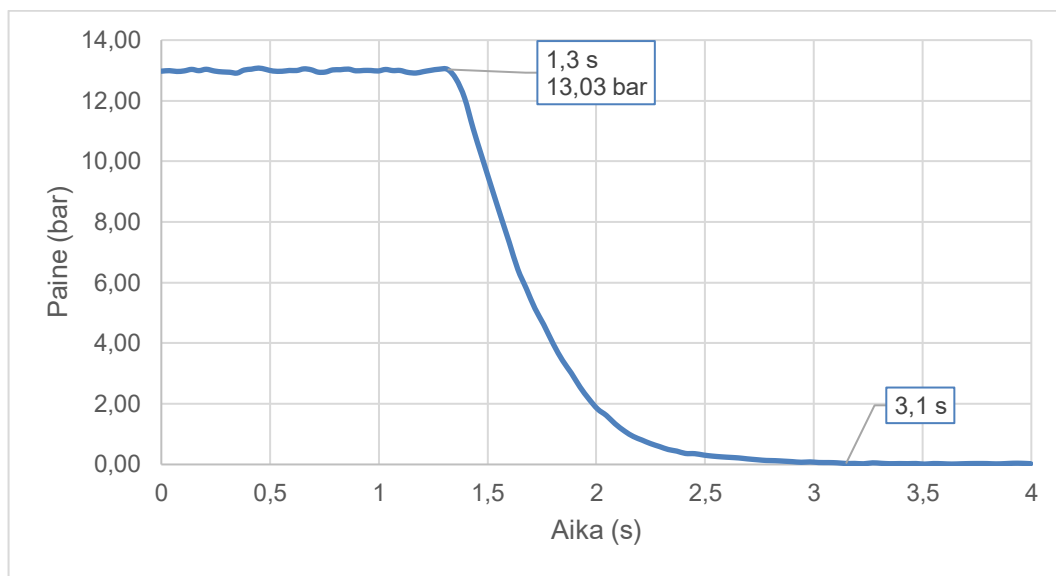


Kuvio 8. Kiertolinjan aiheuttama tehohäviö.

Kiertolinjan käyttö aiheuttaa pienen tehohäviön (kuvio 8). Haaste on löytää kiertolinjan aukeamiselle ja sulkeutumiselle sopivat asetusarvot, jotta tehohäviötä syntyisi mahdollisimman vähän, ja jotta kavitaatiota tai pumpun lämpenemistä ei pääsisi tapahtumaan.

6.5 Pysäytys

Pumpun pysäytyksessä paine putoaa hyvin nopeasti noltaan (kuvio 9). Paineen nopea lasku ei aiheuta ongelmia.



Kuvio 9. Pumpun tuottopaine pysäytyksessä.

Normaalin pysäytyksen lisäksi suoritetaan "shutdown" testi, jossa virtaus pysäytetään äkillisesti siihen tarkoitetulla venttiilillä. Shutdown-testit tulee suorittaa ohjelman viimeisessä vaiheessa, kuitenkin ennen koneikon tyhjennystä.

7 Testausohjelma

Testausdokumentaatio tuotetaan testikoneikon käytön aikana tehtyjen huomioiden, standardien ja vaatimusten, sekä aiemman testausdokumentaation pohjalta. Testausdokumentaatio koostuu testipohjasta ja testausohjeista. Mahdolliset testauksen aikana havaitut ongelmat tai muut huomiot merkataan testipohjan "huomiot" sarakkeelle.

7.1 Testijärjestys

Testiohjeeseen merkatun testausjärjestyksen tarkoituksena on auttaa testaajaa suorittamaan testit järkevässä ja tehokkaassa järjestyksessä. Testaaja voi kuitenkin tarvittaessa tehdä muutoksia järjestykseen, jos se on kannattavaa tai välttämätöntä esimerkiksi koneikkokohtaisten erojen takia. Testipohja on jaettu sähkötesteihin ja toiminnallisiin testeihin. Molempia taulukoita täytetään testiohjeiden mukaisesti osittain samaan aikaan.

7.2 Venttiilit

Venttiilit testataan yksitellen manuaalisesti. Näin varmistutaan venttiilien ja toimilaitteiden oikeasta toiminnasta, sekä oikein tehdyistä kytkennöistä. Testaus tapahtuu ohjaamalla venttiilejä auki- ja kiinniasentoon HMI:stä. Testaaja varmistuu visuaalisesti siitä, että HMI:stä ohjattu venttiili vastaa oikeaa venttiiliä syöttökoneikossa.

7.3 Anturit ja mittarit

Anturit ja mittarit testataan niin ikään niiden toiminnan sekä oikeiden kytkentöjen varmistamiseksi. Tarpeen vaatiessa mittalaitteet kalibroidaan testauksen yhteydessä. Anturien ja mittarien on näytettävä HMI:ssä järkevää arvoa, sekä arvojen on muututtava oikeassa järjestyksessä. Jotkin arvot, kuten lämpötila,

eivät välttämättä muutu testien aikana huomattavasti. Tässä tapauksessa arvoa on muutettava manuaalisesti, esimerkiksi lämmittämällä vedellä. Testattaviin instrumentteihin kuuluvat paineanturit, virtausmittarit, tasokytkimet, sekä lämpötila-anturit.

7.4 Manuaalisten sekvenssien testaus

Yksittäisten venttiilitestien lisäksi testataan syöttökoneikon perustoimintojen sekvenssit. Sekvenssien testaus tapahtuu ohjaamalla venttiilejä HMI:stä ohjeiden mukaisessa järjestyksessä. Testaaja seuraa koneikon toimintaa sekvenssin aikana, ja merkitsee testin tuloksen testipohjaan.

7.5 Automaattisten sekvenssien testaus

Opinnäytetyön tekohetkellä testikoneikosta puuttui automaattiset sekvenssit. Nämä tullaan myöhemmin lisäämään koneikkoon, ja sitä kautta myös testausdokumentaatioon. Automaattiset sekvenssit testataan käynnistämällä ne HMI:stä, jonka jälkeen varmistetaan, että sekvenssi toteutuu toivotulla tavalla.

8 Yhteenveto

Opinnäytetyön tavoitteena oli kehittää testausohjelma vaihtoehtoisen polttoaineen syöttökoneikon toiminnallisen ja sähköisen ohjauksen varmistamiseksi, sekä laatia luotettava dokumentaatio testien toistamiseksi.

Tavoitteen ymmärtämiseksi työssä perehdyttiin perinteisiä sekä vaihtoehtoisia polttoaineita käyttäviin polttoaineen syöttökoneikkoihin, ja niiden eroavaisuuksiin testausohjelman kehittämisen kannalta. Potentiaalsiin vaihtoehtoisiin polttoaineisiin perehdyttiin niiden ominaisuuksien ja niistä aiheutuvien vaatimusten kannalta.

Taustatietojen selvitys suoritettiin tyypillisellä tutkimusmenetelmällä, eri lähdeaineistoja tutkimalla ja niihin viittaamalla. Suurin osa itse kehitystyöstä tehtiin yrityksen sisäisillä resursseilla, testikoneikon toimintaa tutkimalla, sekä aiempaan testausdokumentaatioon perehtymällä.

Työn lopputuloksena syntyi testipohja (liite 1), johon merkitään testauksen aikana saadut tulokset sekä huomiot. Tulosten lisäksi testipohjaan voidaan lisätä mahdolliset testauksen aikana ilmenevät erityishuomiot. Testipohjan täyttämisen ja itse testien suorittamisen helpottamiseksi tehtiin myös testausohje (liite 2). Testausohje etenee vaihe vaiheelta, kertoen testaajalle tarvittavat toimenpiteet sekä optimaalisen järjestyksen niiden suorittamiseen. Testausdokumentaatio ei kuitenkaan ole yleispätevä, sillä syöttökoneikoissa on tapauskohtaisia eroja lähes poikkeuksetta. Testivaiheita on siis mahdollisesti lisättävä tai poistettava tarpeen vaatiessa. Tästä huolimatta luodun dokumentaation pitäisi merkittävästi nopeuttaa testausprosessia, sekä parantaa koneikon luotettavuutta osana laadunvarmennusta.

Tämänhetkisessä tilanteessa testikoneikon toimintoja ei ole vielä automatisoitu. Tulevaisuudessa testausdokumentaatioon on todennäköisesti tehtävä manuaalisen testauksen lisäksi automaatio-osuus, jossa voidaan tarkemmin tutkia todellisen koneikon toimintaa simuloimalla koneikon tyypilliseen toimintaan tai turvatoimiin liittyviä sekvenssejä.

Vaihtoehtoisten polttoaineiden käyttö merenkulussa on vielä hyvin pitkälti tutkimus- ja kehitysvaiheessa. Uusien vaatimusten tai innovaatioiden myötä polttoainejärjestelmiin saatetaan tehdä muutoksia, jolloin myös testausdokumentaatio on todennäköisesti muutosten kohteena. Kehitysluontoisen aihealueen takia saatavilla oleva lähdemateriaali oli melko vähäistä, eikä niissä yleensä menty yksityiskohtiin. Tästä huolimatta olen tulokseen tyytyväinen. Opinnäytetyöksi aihe oli mielenkiintoinen ja opettava, mielestäni se antoi hyvät lähtökohdat tästä jatkuvaan kehitystyöhön.

Lähteet

Bureau Veritas 2022. Methanol & ethanol fuelled ships. NR670. Viitattu 5.9.2023.

https://erules.veristar.com/dy/data/bv/pdf/670-NR_2022-08.pdf

CESP 2022. Overview of ATEX and IECEx certification.

<https://www.cespledex.com/news-events/cesp-ex-wiki/item/229-atex-iecex>

DNV 2023. LNG as marine fuel. Viitattu 7.7.2023.

<https://www.dnv.com/maritime/insights/topics/lng-as-marine-fuel/market-update.html>

EMSA 2022. Potential of ammonia as fuel in shipping. Viitattu 4.7.2023.

<https://www.emsa.europa.eu/publications/reports/item/4833-potential-of-ammonia-as-fuel-in-shipping.html>

EMSA 2023. Classification societies. Viitattu 5.9.2023.

<https://www.emsa.europa.eu/inspections/90-classification-societies.html>

IMO 2023a. Marine environment. Viitattu 25.6.2023.

<https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Default.aspx>

IMO 2023b. Sulphur oxides (SOx) and Particulate Matter (PM) - Regulation 14. Viitattu 25.6.2023.

[https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Sulphur-oxides-\(SOx\)-%E2%80%93-Regulation-14.aspx](https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Sulphur-oxides-(SOx)-%E2%80%93-Regulation-14.aspx)

Methanex 2023. Methanol as a marine fuel. Viitattu 4.7.2023.

<https://www.methanex.com/about-methanol/marine-fuel/>

Sustainable Ships 2023. The State of Methanol as Marine Fuel 2023. Viitattu 4.7.2023.

<https://www.sustainable-ships.org/stories/2023/methanol-marine-fuel>

Van Hoecke, L.; Laffineur, L.; Campe, R.; Perreault, P.; Vertbruggen, S & Silvia, L. 2021. Challenges in the use of hydrogen for maritime applications. Viitattu 5.8.2023.

<https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2021/ee/d0ee01545h>

Testausohjeet

Alkuvalmistelut ja edellytykset

Ennen varsinaisten testien aloittamista, suoritetaan alkuvalmistelut ja varmistetaan, että edellytykset testien aloittamiseen täyttyvät. Koneikon asennusvaiheessa täytyy pitää huolta siitä, että pinnat, jotka tulevat olemaan kontaktissa polttoaineen kanssa (putket, venttiilit, pumput) pysyisivät mahdollisimman puhtaina. Jos koneikko pysyy asennuksen aikana puhtaana, vältetään ylimääräisiltä puhdistustoimenpiteiltä. Jos koneikko kuitenkin joudutaan huuhtelemaan vedellä, se täytyy myös huolellisesti kuivata.

Sähkötestit ennen käynnistystä

Ennen koneikon käynnistystä suoritetaan osa sähkötesteistä, joissa muun muassa varmistetaan koneikon sähköturvallisuudesta.

S0: Sähkökaappi ja sen sisäiset liitännät ovat valmiit. Virtaa ei olla vielä kytketty päälle.

1. Sähköasennusten yleinen silmämääräinen tarkastus. Merkitse tulos ja mahdolliset kommentit taulukkoon 2.
2. Eristysresistanssitesti "kylmänä" testijännitteellä kaikille moottoreille. Mitatun resistanssin tulee ylittää 1 M Ω ja jokaisen testin tulos kirjoitetaan taulukkoon 3.
3. Suojajohtimien jatkuvuustesti. Mitatun resistanssin tulee olla alle 1 Ω ja jokaisen testin tulos kirjoitetaan taulukkoon 3.
4. Käytetyt mittalaitteet ja niiden kalibrointipäivämäärät tulee kirjoittaa taulukkoon 2.

S1: Onnistuneiden S0-testien jälkeen laite yhdistetään verkkovirtaan. PLC on testattu ja VSD:t on parametroitu. Seuraavien testien järjestyksellä ei ole

merkitystä - jotkut niistä voidaan mahdollisuuksien mukaan tehdä samanaikaisesti.

1. PLC:n testaus FAT-pohjaan (Factory Acceptance Test) mukaan. Kun valmis, täytetyn PLC-testiraportin asiakirjan tunnus kirjoitetaan FAT-pohjaan yhdessä ohjelmistoversion kanssa.
2. VSD-parametrit asetetaan ja kirjoitetaan parametriluetteloihin. Parametriluettelon tunnukset kirjoitetaan FAT-pohjaan.
3. VSD-näyttöjen PIN-koodit asetetaan ja ne kirjoitetaan FAT-pohjaan.

Venttiilit ja toimilaitteet

Tämän vaiheen aikana suoritetaan ensimmäiset toimintatestit (T0 FAT-pohjassa) yhdessä venttiilitoimilaitteiden sähköisten testien S2 kanssa. Koneikko on edelleen tyhjä. Koneikko on kytketty 400 V/50 Hz virtalähteeseen.

1. **T0:** Manuaalinen venttiilien kääntö suoritetaan jokaiselle venttiilille, myös sähkökäyttöisille. Kaikkien käännettävien venttiilien tarkistuslista on FAT-pohjassa. Testauksen jälkeen venttiin asentoon asetetaan yksikön PI-kaaviossa ilmoitettuun normaaliasentoon.
2. Moottorikäyttöisen venttiin liikerajakytkin testataan. Toimilaitteen rajakytkin aktivoidaan manuaalisesti ja käyttöliittymän näytöltä tarkistetaan, että oikea rajakytkimen tila on välitetty PLC:lle.
3. Moottorikäyttöisen venttiin ajosuunta tarkistetaan ja tarvittaessa korjataan. Testataan myös, että oikea rajakytkin pysäyttää toimilaitteen.
 - 3.1. Käännä venttiili manuaalisesti keskiasentoon.
 - 3.2. Aloita testi ajamalla venttiiliä jompaankumpaan suuntaan ja tarkkaile, että vastaako käyttöliittymän osoitus toimilaitteen todellista suuntaa.
4. **S2:** Moottorihjattujen venttiilitoimilaitteiden virtojen mittaus käytön aikana ja tulosten merkitseminen FAT-raporttiin.
5. **T0:** Venttiilitoimilaitteiden vääntömomentin rajoittimien testaus.

Yhdistäminen testausjärjestelmään ja täyttö

Tässä vaiheessa testauslaitteet ja putkistot kootaan ja yhdistetään koneikkoon. Koko järjestelmä täytetään sitten vedellä – ensin osittain painovoimalla ja sitten loput pumppaamalla. Toiminnalliset testit T1 ja T2 sekä osa sähkötesteistä S2 suoritetaan näiden täyttötoimenpiteiden aikana. Imupuolen täytön aikana koneikkoa ei tarvitse kytkeä päälle.

Täyttötoimenpiteet T1 ja osa FAT-pohjassa luetelluista toiminnallisista testeistä T2 suoritetaan seuraavasti:

- **T1:** Yksikkö on kytketty ulkoiseen testauslaitteeseen.

1. Täyttö alkaa. IBC-tankki täytetään ensin vedellä yläliittimen kautta.
2. Koneikon imupuolen venttiilit avataan. Osa koneikosta täyttyy painovoiman avulla, veden taso asettuu pumpputornin sisään.
3. Ilmausventtiilit avataan.

- **T2:** Pumppu käynnistetään manuaalisesti HMI näytöltä.

1. Pumpun pyörimissuunta tarkistetaan. Pumppu pysäytetään heti kun pyörimissuunta selviää. Jos suunta on väärä, sähköliitännät korjataan.
2. Koneikon tuotto puolen venttiilit ja testijärjestelmän venttiilit avataan. Loput yksiköstä täytetään pumpulla. Koneikko ilmataan ohjeen mukaan.
3. Varmista kiertolinjaventtiilin toiminta, kääntyykö se määritetyllä minimi- ja maksimivirtauksella.

Pumpun testaus ja loput sähkötesteistä

Pumpun koekäyttö suoritetaan tässä vaiheessa. Loput toiminnalliset testit T2 ja sähkötestit S2 ovat suoritettu.

- **T2:** Pumppu on yhä käynnissä.

1. Kierrosnopeutta lisätään hitaasti, kunnes virtausnopeus vastaa normaalia käyttövirtausta. Virtausnopeus sekä imu- ja tuottopaineet merkitään FAT-pohjaan. Tuottopaineen pitäisi nyt olla normaali asetusarvo tälle pumpulle.
2. **S2:** Mittaa pumpun moottorin virrat ja VSD-taajuus, teho ja virta.
3. Manuaalinen Duty ja Standby (käytössä ja valmiustilassa) suodatinlinjojen vaihto testataan käynnistämällä vaihto HMI näytöstä. Linjan valintaventtiilien tulisi kääntyä vastakkaisiin asentoihin. Testi tehdään molempiin suuntiin.
4. Automaattinen vaihto Duty ja Standby suodatinlinjojen välillä testataan simuloimalla "suodatin tukkeutunut" signaali. Linjanvalintaventtiilien pitäisi nyt siirtyä ohjaamaan virtaus Standby-suodattimen läpi. Testi tehdään molempiin suuntiin.
5. Suodattimen A manuaalinen huuhtelu HMI näytöstä. Suodattimen on oltava Duty-suodatin testin aikana. Huuhteluventtiilin avautumista seurataan. Huuhteluaika merkitään FAT-pohjaan.
6. Suodattimen B manuaalinen huuhtelu HMI näytöstä. Suodattimen on oltava Duty-suodatin testin aikana. Huuhteluventtiilin avautumista seurataan. Huuhteluaika merkitään FAT-pohjaan.

Painetestit

- **T3:** Koneikko on valmis painetestaukseen

1. Hydrostaattinen painekoe suoritetaan ohjeiden mukaan ja tulokset kirjataan ylös.
2. Testaa, että varoventtiili avautuu oikeassa paineessa. Pumpun ylipaineen estävä turvalogiikka on kytkettävä väliaikaisesti pois päältä, jotta riittävän korkea paine voidaan saavuttaa.
3. Varmista, että kaikki painelähettimet seuraavat paineistuspainetta.

Tyhjennys

Viimeisessä vaiheessa yksikkö tyhjennetään nesteistä ensin valuttamalla ja sitten huuhtelemalla paineilmalla.

- **T4:** Yksikkö on valmis tyhjennettäväksi ja puhdistettaviksi

1. Kaikkien tyhjennysventtiilien toiminta testataan avaamalla ja sulkemalla manuaalisesti HMI näytöltä.
2. Kaikkien ilmausventtiilien toiminta testataan avaamalla ja sulkemalla manuaalisesti HMI näytöltä.
3. Manuaalisen tyhjennyssekvenssin testaus.

Testipohja (Factory Acceptance Test)

Ennen valmiin syöttökoneikon käyttöönottoa, se tarkastetaan perusteellisesti. Testit ovat jaettu sähköisiin ja toiminnallisiin osioihin. Vaiheet käydään läpi järjestyksessä, ja tulokset merkataan alla oleviin taulukoihin.

Tätä testipohjaa ei ole luotu suoraan käytettäväksi minkään tietyn vaihtoehdoisen polttoaineen syöttökoneikon testaukseen. Se on kehittäjäversio, jota voidaan tarvittaessa käyttää referenssinä todellisen testipohjan kehityksessä.

Sähkötestit

Sähkötesteillä varmistetaan koneikon sähkölaitteiden oikeinkytkentä ja sähköturvallisuus. Testaajan tulee ottaa testausjärjestyksessä huomioon, että osa toiminnallisista testeistä (taulukko 4) kannattaa käytännön syistä suorittaa osoitettujen sähkötestien välissä.

Taulukko 2. Tarvitut mittauslaitteet.

Tarvitut mittauslaitteet	Kalibroinnin pvm.
Kaksinapainen jännite- ja jatkuvuustesteri	
Sähköasennustesteri	

Taulukko 3. Sähkötestit.

Testi Num.	Testin kuvaus	Tuloksen parametri	Tulos	Huomiot
S0.0	Koneikossa on sähkökaappi ja sisäiset sähköiset kytkennät ovat valmiit. Virta on kytketty pois päältä.			
S0.1	Sähkökaapin tarkastuspöytäkirja	OK		
S0.2	Eristeresistanssitestit, COLD	Resistanssi > 1 MΩ	Katso alempi	
	Pumpun moottori	Resistanssi > 1 MΩ		
	Mahdolliset moottoriohjatut venttiilit	Resistanssi > 1 MΩ		
S0.3	Moottoreiden ja toimilaitteiden suojohtimien jatkuvuustesti	Resistanssi < 1 Ω	Katso alempi	
	Pumpun moottori	Resistanssi < 1 Ω		
	Mahdolliset moottoriohjatut venttiilit	Resistanssi < 1 Ω		
S0.4	Sähköisten komponenttien silmämääräinen tarkastus	OK		
S1.0	Koneikon virta kytketään päälle.			
S1.1	PLC tarkastuspöytäkirja	OK		
S1.2	Pumpun moottorin VSD parametrit	OK, parametrit		
S2.0	Koneikko on täytetty vedellä ja toiminnalliset testit T0.0-T2.0 on saatettu loppuun.			
S2.1	Moottorien virtamittaukset	Kirjoita mitattu virta alas [A]		
	Pumpun moottori	L1:	L2:	L3:
	Mahdolliset moottoriohjatut venttiilit			

(jatkuu)

Taulukko 3 (jatkuu).

S3.0	Toiminnalliset testit T0.0-T3.0 on saatettu loppuun. Virta kytketään pois päältä.			
S3.1	Eristeresistanssitestit, HOT	Resistanssi > 1 MΩ	Katso alempi	
	Pumpun moottori	Resistanssi > 1 MΩ		
	Mahdolliset moottoriohjatut venttiilit	Resistanssi > 1 MΩ		

Toiminnalliset testit

Toiminnallisissa testeissä varmistetaan koneikon komponenttien sekä toimintojen oikeanlainen käyttäytyminen. Toiminnalliset testit suoritetaan alla olevan taulukon mukaisesti.

Taulukko 4. Toiminnalliset testit.

Testi Num.	Testin kuvaus	Tuloksen parametri	Tulos	Huomiot
T0.0	Koneikko on asennettu ja tyhjä.			
T0.1	Käsi käyttöisten venttiilien manuaalinen käyttö	Toimii		
T0.2	Paineohjattujen venttiilien manuaalinen käyttö	Toimii		
T0.3	Moottoriohjattujen venttiilien manuaalinen käyttö	Toimii		

(jatkuu)

Taulukko 4 (jatkuu).

T0.4	Moottoriohjattujen venttiilien pyörimissuunta	Toimii kuten pitää, jos suunta on päinvastainen, korjataan.		
T1.0	Koneikko on kytketty polttoainelähteeseen ja sitä täytetään.			
T1.1	Ilmausventtiilien manuaalinen käyttö	Toimii		
T2.0	Pumppu käynnistetään			
T2.1	Pumpun ja taajuusmuuttajan sähkötestit			
T2.2	Pumpun pinnankorkeusanturi	Toimii		
T2.3	Virtausmittari	Toimii		
T2.4	Kiertolinjaventtiili	Toimii		
T2.5	Suodatinlinjan manuaalinen vaihto	Toimii molempiin suuntiin		
		Oikein HMI näytöllä		
T2.6	Suodatinlinjan automaattinen vaihto simuloimalla tukkeutunutta suodatinta.	Toimii molempiin suuntiin		
		Oikein HMI näytöllä		
		Suodatin tukkeutunut-häly		
T2.7	Suodattimien puhdistus	Toimii		
		Aika		
T2.8	Suodatinlinjan huoltotila estää linjan vaihdon	Toimii molempiin suuntiin		

(jatkuu)

Taulukko 4 (jatkuu).

T2.9	Lämpötila-anturi	Arvo on järkevä ja muuttuu testauksen aikana		
T2.10	Koneikon pysäytyssekvenssi	Toimii		
T2.12	Koneikon käynnistyssekvenssi	Toimii		
T2.13	Kaikkien hälyjen simulointi	Oikea häly HMI näytöllä		
T3.0	Koneikko on valmis painetesteihin			
T3.1	Turvaventtiilin aukeaminen asetusarvossa	Painelukema aukeamishetkellä		
T3.2	Paineanturit	Lukemat seuraavat asetusarvoa		
T3.3	Suodatinlinjan vaihto	Toimii		
T3.4	Kulutuksenmuutostestit	OK		
T3.5	Shutdown	OK		
T4.0	Koneikko tyhjennetään			
T4.1	Tyhjennysventtiilit	Toimii		
T4.2	Manuaalinen puhdistussekvenssi	Toimii		