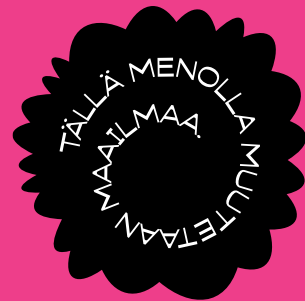


**SAVONIA**



OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO  
TEKNIIKAN ALA

# LÄMPÖPUMPPULABORATORION KEHITTÄMINEN AKKREDITOIN- TIA VARTEN

Standardin SFS-EN 14511 mukainen tehonmittaus

TEKIJÄ

Antti-Ville Pekkalin WU22SM

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala	
Tutkinto-ohjelma Energiatekniikan tutkinto-ohjelma	
Työn tekijä Antti-Ville Pekkalin	
Työn nimi Lämpöpumppulaboratorion kehittäminen akkreditointia varten	
Päiväys	20.11.2024
	33/2
Yhteistyötaho Gebwell Oy	
<p>Opinnäytetyön taustalla oli Gebwell Oy:n uuden lämpöpumppulaboratorion akkreditointivalmiuden saavuttaminen Leppävirran tehtaalla. Työn tarkoituksena oli kehittää laboratorion mittausolosuhteet standardien mukaisiksi akkreditointiprosessin aloittamiseksi. Akkreditointi varmistaa, että testauslaboratorio noudattaa kansainvälisiä standardeja ja menettelytapoja, mikä takaa testitulosten luotettavuuden, jäljitettävyyden ja vertailukelpoisuuden.</p> <p>Opinnäytetyössä tehtiin useita mittauksia ja muutoksia laboratorion putkistoon ja mittausjärjestelmiin. Mittausten avulla analysoitiin lämpötilan hallintaa ja mittaustarkkuutta. Lisäksi asennettiin virtauksen sekoitin parantamaan lämpötilan jakautumista ja vähentämään mittausvirheitä. Mittaustuloksia vertailtiin ennen ja jälkeen muutosten.</p> <p>Tulokset osoittivat merkittäviä parannuksia mittaustarkkuudessa ja lämpötilan hallinnassa. Testiolosuhteet saavutettiin nopeammin ja lämpötilan heilunta väheni. Esimerkiksi lämpöpumpusta ulostulevan lauhteen keskimääräinen lämpötila laski 63,21 °C:sta 63,01 °C:een ja lämpöpumppuun sisään menevän lauhteen keskimääräinen lämpötila laski 53,16 °C:sta 52,98 °C:een, kun tavoitelämpötilat olivat ulostulevalle lauhteelle 63 °C ja sisään menevälle lauhteelle 53 °C. Suurimmat poikkeamat asetetusta lämpötilasta olivat pienemmät ja standardin vaatimissa rajoissa muutosten jälkeen. Jatkotoimenpiteinä suositellaan putkistomuutosten monistamista muihin mittauslinjoihin, putkistojen eristämistä lämpöhäviöiden minimoimiseksi sekä paine-, virtaus- ja lämpötila-antureiden kalibrointia. Jatkotutkimusaiheina voidaan pohtia olosuhteita ylläpitävien höyrystin- ja lauhdevaraajien lämmittämistä sähkökattilalla tai kaukolämmöllä, sekä laboratoriossa syntyvän lauhdehukkalämmön hyödyntämistä tuotantohallin lämmittämisessä.</p>	
Avainsanat Lämpöpumppu, akkreditointi, kalibrointi, mittaustarkkuus	

## SISÄLTÖ

1	JOHDANTO.....	5
1.1	Gebwell Oy.....	5
1.2	Standardien merkitys ja niiden kattavuus.....	5
2	LÄMPÖPUMPPU .....	7
2.1	Maaviilennys.....	8
2.2	Maalämpöpumpun toimintaperiaate.....	9
2.3	Lämpöpumpun COP-arvo .....	10
2.4	Lämpöpumpun SCOP-arvo.....	10
2.5	Uudet luonnolliset kylmäaineet .....	11
3	LÄMPÖPUMPPUJEN TUOTEKEHITYSKESKUS .....	12
3.1	Testausjärjestelmän yleiskuvaus .....	12
3.2	Automaatio ja tiedonkeruu.....	13
3.3	Laboratoriomme suunnitellut pätevyydet .....	14
4	TEOREETTINEN VIITEKEHYS .....	15
4.1	Mittausepävarmuus .....	15
4.1.1	Mittausepävarmuuden analyysi .....	15
4.2	Akkreditoinnin vaatimukset kalibroinnin suhteen .....	16
4.3	SFS-EN 14511-1:2022-standardin merkitys ja kattavuus .....	17
5	TEHON MITTAUKSEN PARANTAMINEN .....	18
5.1	Nykyiset mittausmenetelmät ja niiden haasteet.....	18
5.2	Virtauksen muuttaminen turbulenttiseksi .....	18
5.3	Lämpötilaeromittausten siirto oikeisiin paikkoihin .....	22
6	KÄYTÄNNÖN TOTEUTUS .....	24
6.1	Mittauslaitteet ja -menetelmät .....	25
6.1.1	Lämpötilamittarit.....	25
6.1.2	Paineanturit.....	25
6.1.3	Virtausmittarit .....	25
7	TULOKSET .....	27
7.1.1	Tulosten analysointi .....	28
8	JOHTOPÄÄTÖKSET JA SUOSITUKSET .....	29
8.1	Työn merkitys ja vaikutukset .....	29
8.2	Suosituksat jatkotoimenpiteiksi .....	30

8.2.1	Energiamittarin valinta .....	31
8.3	Mahdolliset jatkotutkimusaiheet .....	31
	LÄHTEET .....	32
	LIITE 1: LABORATORION TOIMINTAKUVAUS (SALATTU) .....	34
	LIITE 2: LABORATORION PI-KAAVIO (SALATTU) .....	35

## KUVALUETTELO

KUVA 1.	Maalämpöjärjestelmä pientalossa. (Gebwell Oy, 2024b) .....	7
KUVA 2.	Samalla maalämpöjärjestelmällä pystytään myös helposti toteuttamaan asunnon jäähdytys puhallinkonvektorin avulla. (Gebwell Oy, 2024b) .....	8
KUVA 3.	Maalämpöpumpun toimintaperiaate, vaiheet numeroitu ja selitetty alla (Gebwell Oy, 2024c) .....	9
KUVA 4.	Täyskaiullinen äänitestaustila (Pekkalin, 2024) .....	12
KUVA 5.	Automaatio järjestelmän aloitusnäky. (Pekkalin, 2024) .....	14
KUVA 6.	ILAC G8 -oppaan mukainen määritelmä vaatimustenmukaisuudesta ja tulosten tulkinnasta (Finas-Akkreditointipalvelu, 2023a) .....	15
KUVA 7.	Virtausmittarihuone, etualalla neljä erikokoista sekoitusventtiiliä ja katossa testipaikoilta 2 ja 3 palaavat putkistot. (Pekkalin, 2024) .....	19
KUVA 8.	Lämpöteipillä teipattu mittauspiste. (Pekkalin, 2024) .....	20
KUVA 9.	DN125 putkiliinan lämpökameramittaukset samalla hetkellä putken ylä- ja alapinnasta. (Pekkalin, 2024) .....	20
KUVA 10.	Sekoittaja DN125 putkeen pistehitsauksella kiinnitettynä. (Pekkalin, 2024) .....	21
KUVA 11.	Sekoittaja putkistoon asennettuna ja lämpötilamittaus siirrettynä heti sen jälkeen. Kuvassa näky myös kaksi pienintä lauhdelinjan virtausmittaria 6–40 kW lämpöteholle. (Pekkalin, 2024) .....	22
KUVA 12.	PI-kaaviossa lauhdutinpiiri 3 ja testipaikka 3. (Liite 2) .....	23
KUVA 13.	Lauhdemittaristo alaputkisto purettuna. Kuvassa näkyvät virtausmittarit ja 3-tie säätöventtiiliryhmät. (Pekkalin, 2024) .....	24
KUVA 14.	Lämpötilaeroa mittaava anturi lämpöpumpun päällä 45° -kulmassa virtaussuuntaan. (Pekkalin, 2024) .....	25
KUVA 15.	Taustalla paineanturi Aplisens ja edessä lämpötila-anturi Krohne Inor. (Pekkalin, 2024) .....	26
KUVA 16.	Comac Calin DN50-virtausmittari ja -lähetin asennettuna mittauslinjaan. (Pekkalin, 2024) .....	26
KUVA 17.	Sininen katkoviiva edustaa lämpöpumpun sisään menevän lauhteen keskilämpötilaa 35 minuutin testin aikana. Varjostettu sininen tausta kuvaa standardin sallimia lämpötilan vaihteluvälejä. ....	27
KUVA 18.	Punainen katkoviiva edustaa lämpöpumpusta ulostulevan lauhteen keskilämpötilaa 35 minuutin testin aikana. Varjostettu punainen tausta kuvaa standardin sallimia lämpötilan vaihteluvälejä. ....	28
KUVA 19.	T-haarassa yhdistyy testipaikoilta 2 ja 3 palaava lämpöpumpun lauhde. (Pekkalin, 2024) .....	30

## 1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön taustalla on Gebwell Oy:n uuden lämpöpumppulaboratorion akkreditointivalmiuden saavuttaminen Leppävirran tehtaalla. Työn tavoitteena on kehittää laboratorion mittaukset, automaatio ja kalibrointikäytännöt SFS-EN 14511 standardin mukaisiksi akkreditointiprosessin aloittamiseksi. Akkreditointi varmistaa, että testauslaboratorio noudattaa kansainvälisiä standardeja ja menettelytapoja, mikä takaa testitulosten luotettavuuden, jäljitettävyyden ja vertailukelpoisuuden.

Opinnäytetyössä keskitytään vedestä-veteen lämpöpumpun lämpötehon mittaukseen automaation avulla, sekä käsitellään mittausepävarmuutta ja akkreditoinnin vaatimuksia kalibroinnin suhteen. Vedestä-veteen lämpöpumppu on laite, joka siirtää lämpöenergiaa vedestä toiseen vesijärjestelmään, esimerkiksi lämmitysjärjestelmään hyödyntäen veden lämpötilaa energianlähteenä ja kohteena. Tavoitteena on kehittää luotettavat ja toistettavat mittaustavat, jotka täyttävät standardien vaatimukset sekä mahdollistaa yhtiön omien laitteiden standardien mukainen testaus ja myöhemmin akkreditoitun palvelun myynti ulkopuolisille asiakkaille.

### 1.1 Gebwell Oy

Gebwell Oy on suomalainen yritys, joka on erikoistunut ympäristöystävällisiin ja energiatehokkaisiin lämmitys- ja jäähdytysratkaisuihin. Yrityksen juuret ovat Leppävirralla Pohjois-Savossa, missä sijaitsevat myös sen pääkonttori ja tuotantotilat. Gebwell Oy valmistaa ja myy laitteita, jotka on suunniteltu liitettäväksi kaukolämpöön ja hyödyntämään maalämpöä. Yrityksen tuotevalikoimaan kuuluvat muun muassa maalämpöpumput, varaajat ja kaukolämmönjakokeskukset.

Gebwell Oy:n toiminta perustuu korkeaan laatuun ja jatkuvaan tuotekehitykseen. Yrityksen oma suunnitteluosasto perustettiin vuonna 2008 ja se vastaa tuotteiden laadusta ja jatkuvasta kehittämisestä. Gebwell Oy:n tuotteet valmistetaan moderneissa 20 000 neliömetrin tuotantotiloissa Leppävirralla ja ne ovat saaneet avainlippu-sertifikaatin merkkinä kotimaisuudesta.

Gebwell Oy työllistää lähes 300 henkilöä ja sen liikevaihto vuonna 2021 oli 41,5 miljoonaa euroa. Yrityksellä on tytäryhtiöt Ruotsissa ja Puolassa sekä myyntitoimistot Tampereella ja Vantaalla. Gebwell Oy:n tavoitteena on olla alan paras kumppani ja auttaa asiakkaitaan kohti puhtaampia lämmitys- ja jäähdytysratkaisuja. (Gebwell Oy, 2024a)

### 1.2 Standardien merkitys ja niiden kattavuus

Standardit ovat keskeisiä laadunvarmistuksen ja luotettavuuden takaamiseksi teollisuuden mittauksissa ja prosesseissa. Ne määrittelevät yhtenäiset vaatimukset ja menetelmät, joiden avulla varmistetaan, että mittaukset ja testaukset ovat vertailukelpoisia ja toistettavia eri toimijoiden välillä. Tämä on erityisen tärkeää akkreditointiprosessissa, jossa laboratorioden on osoitettava noudattavansa kansainvälisiä standardeja.

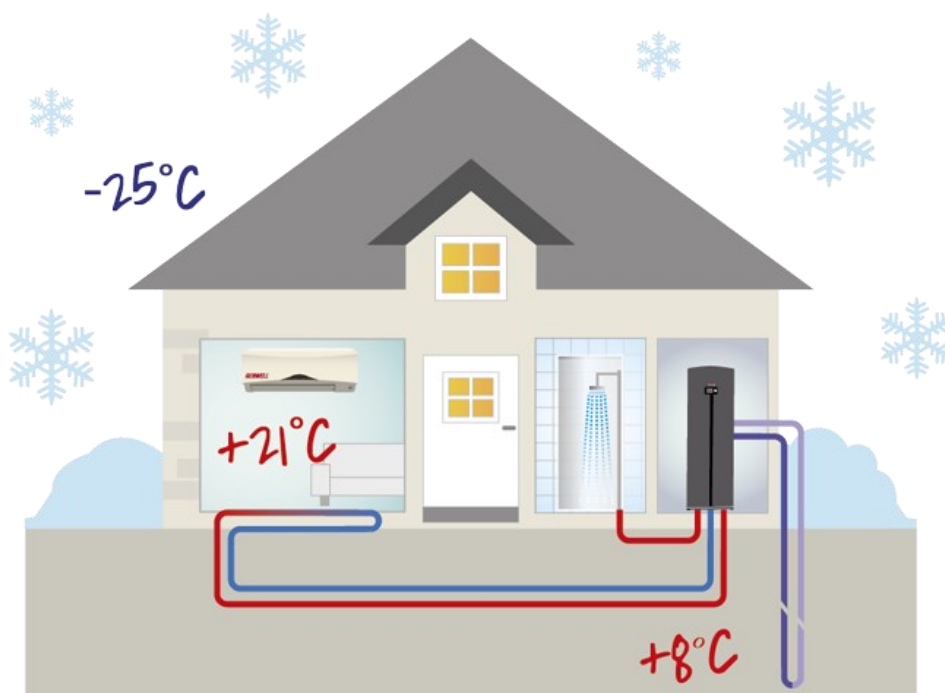
SFS-EN 14511 -standardi määrittelee ilmastointilaitteiden, nestejäähdytyspakettien ja lämpöpumppujen testausolosuhteet ja -menetelmät, kun niitä käytetään tilojen lämmitykseen ja jäähdytykseen. Tämä standardi kattaa muun muassa laitteiden suorituskyvyn mittaamisen, energiatehokkuuden arvioinnin ja ympäristövaikutusten minimoinnin.

Standardien kattavuus ulottuu myös kalibrointikäytäntöihin, jotka ovat olennainen osa mittausepävarmuuden hallintaa. Kalibroinnin avulla varmistetaan, että mittalaitteet toimivat oikein ja tuottavat tarkkoja tuloksia. Akkreditointiprosessissa kalibrointikäytännöt arvioidaan tarkasti ja niiden on täytettävä standardien asettamat vaatimukset. Tämä varmistaa, että kaikki mittaukset tehdään luotettavasti ja että tulokset ovat jäljitettäviä kansainvälisesti. (SFS Suomen Standardit ry, 2022a)

## 2 LÄMPÖPUMPPU

Lämpöpumppu on laite, joka siirtää lämpöenergiaa ympäristöstä, kuten ilmasta, maasta tai vedestä, rakennuksen sisätiloihin tai päinvastoin. Se toimii kuten jääkaappi, mutta käänteisesti. Lämpöpumppu käyttää sähköenergiaa siirtääkseen lämpöä alhaisemman lämpötilan lähteestä korkeampaan lämpötilaan. (Motiva Oy, 2024)

Lämpöpumppu siirtää lämpöä kylmäaineen avulla. Tämä prosessi toimii myös pakkasilla, koska lämpöä on aina jonkin verran saatavilla. Maalämpö hyödyntää maaperään varastoitunutta auringon lämpöä rakennusten ja käyttöveden lämmittämiseen, se on ilmaista ja kaikkien saatavilla. Järjestelmä koostuu lämpöenergian talteenotto- ja jakelulaitteista, ja sen keskiössä on maalämpöpumppu (kuva 1). (Gebwell Oy, 2024b)



KUVA 1. Maalämpöjärjestelmä pientalossa. (Gebwell Oy, 2024b)

Lämpöpumppujen peruseriaate on melko samanlainen kaikissa järjestelmissä, vaikka ne eroavatkin käytetyn väliaineen, lämmön kohteen ja lämmönlähteen osalta. Yleisimpiä lämpöpumpputyyppejä ovat ilmalämpöpumput, ilma-vesilämpöpumput ja maalämpöpumput.

Lämpöä siirretään ulkoilmasta höyrystimen kautta lauhduttavalle sisäyksikölle ilmalämpöpumpun avulla, josta se puhalletaan huoneilmaan. Vesikiertoiseen lämmitysjärjestelmään lämpöä siirretään ulkoilmasta ilma-vesilämpöpumpulla. Maalämpöpumppu puolestaan hyödyntää maahan tai veteen varastoitunutta lämpöä ja siirtää sen vesikiertoiseen lämmitysjärjestelmään

Kompressorin paineistaa kylmäaineen, mikä nostaa sen kiehumispistettä ja muuttaa sen neste-mäiseksi. Paine kattilassa korkeamman paineen ansiosta veden lämpötila voi nousta 120 °C:een ja pysyä nestemäisenä, mikä on samanlainen ilmiö. Kylmäaine luovuttaa lämpöä lauhduttimessa ja tämä lämpö voidaan hyödyntää lämmityksessä.

Seuraavaksi kylmäaine virtaa paisuntaventtiin läpi, joka rajoittaa sen virtausta höyrystimeen. Tämä alentaa painetta ja kiehumispistettä, jolloin kylmäaine höyrystyy. Höyrystyessään kylmäaine sitoo suuren määrän lämpöenergiaa, joka voidaan jälleen luovuttaa lauhduttimessa.

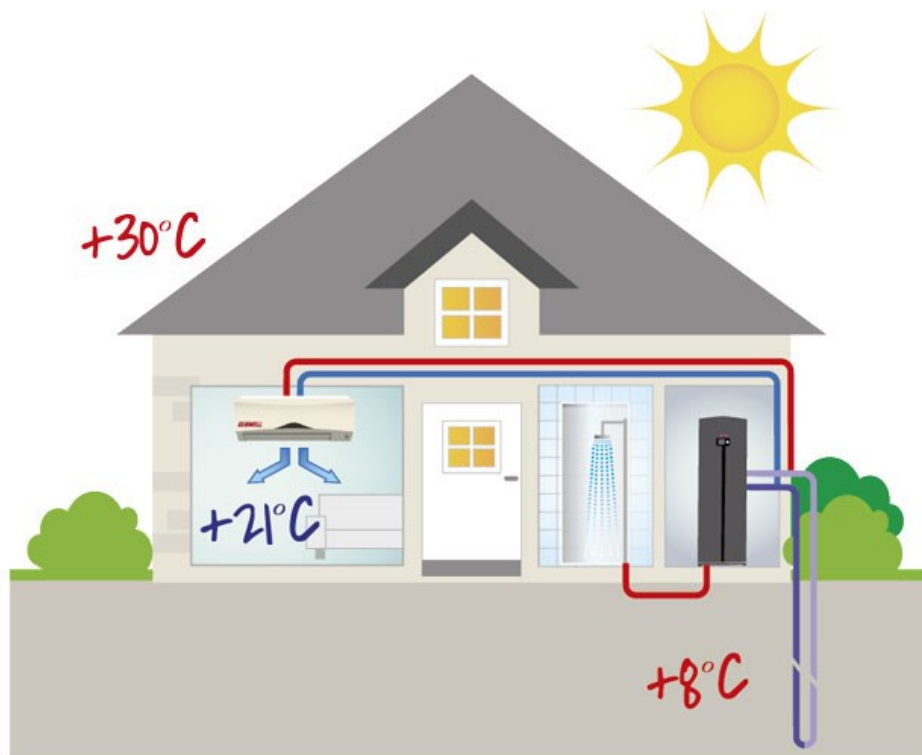
Lämpöpumpun toiminta perustuu faasimuutokseen, jossa aineen olomuoto muuttuu nestemäisestä höyrymäiseksi ja takaisin paineen muutoksen avulla. Tämä prosessi mahdollistaa suurten energiamäärien sitomisen ja luovuttamisen. Esimerkiksi veden höyrystäminen sitoo noin viisinkertaisesti enemmän lämpöä kuin veden lämmittäminen 0 °C:sta 100 °C:een. (Energytech Finland Oy, 2024)

Lämpöpumput voivat myös hyödyntää matalalämpöistä hukkalämpöä, joka syntyy esimerkiksi kylmälaitteiden, teollisuuden koneiden ja ilmanvaihtojärjestelmien toiminnasta. Tämä hukkalämpö voidaan ottaa talteen ja käyttää uudelleen kiinteistön lämmitykseen tai käyttöveden lämmittämiseen.

Hukkalämmön hyödyntäminen vähentää energianhukkaa ja parantaa kiinteistön energiatehokkuutta. Vähentämällä ulkopuolisen energian tarvetta, hukkalämpöä hyödyntävät lämpöpumput voivat merkittävästi pienentää energiakustannuksia. Lisäksi hukkalämmön hyödyntäminen vähentää kasvihuonekaasupäästöjä ja tukee hiilineutraaliustavoitteita. (Kämäräinen, 2023)

## 2.1 Maaviilennys

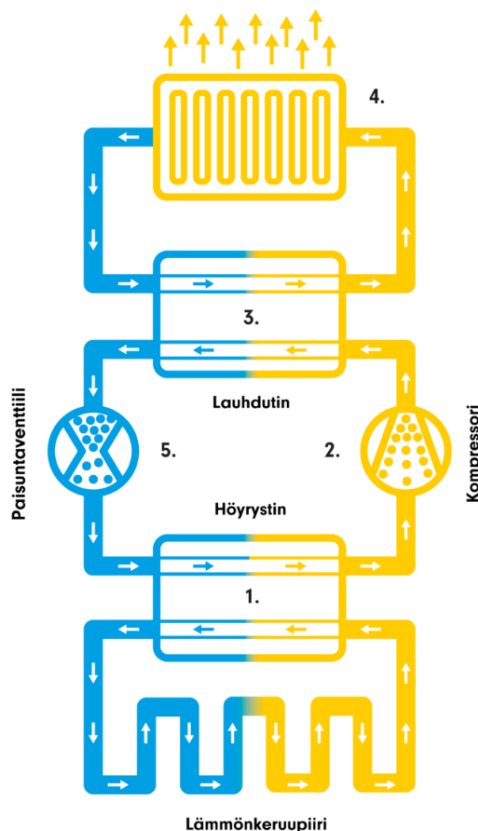
Maaviilennys (kuva 2) on ympäristöystävällinen ja tehokas tapa viilentää kiinteistöjä maalämpöjärjestelmällä. Se tunnetaan myös nimillä passiivi-ilennys, passiivijäähdytys, maakylmä ja maaviileä. Lämpökaivossa kiertävä maaliuos voi kerätä lämpöä ja viilentää kiinteistöä. Maajäähdytyksen hyödyntämiseen tarvitaan lämpökaivo, kiertovesipumppu ja puhallinkonvektori. Maaviileä parantaa asumismukavuutta ja sen käyttökustannukset ovat alle 20 % koneellisen viilennyksen kustannuksista. (Gebwell Oy, 2024b)



KUVA 2. Samalla maalämpöjärjestelmällä pystytään myös helposti toteuttamaan asunnon jäähdytys puhallinkonvektorin avulla. (Gebwell Oy, 2024b)

## 2.2 Maalämpöpumpun toimintaperiaate

Maalämpöpumppu koostuu seuraavista osista: höyrystin, lauhdutin, kompressori, paisuntaventtiili ja kylmäaine. Prosessia ohjaa säädin, joka seuraa jatkuvasti lämpötiloja sisällä ja ulkona, sekä kylmäainepiirin toimintaa. Säätimen tehtävänä on varmistaa, että lämpöpumppu toimii aina optimaalisesti ja parhaalla hyötysuhteella.



KUVA 3. Maalämpöpumpun toimintaperiaate, vaiheet numeroitu ja selitetty alla (Gebwell Oy, 2024c)

1. Lämmönkeruuputkisto: Lämmönkeruuliuos, joka on noin 30 % vesietanoliseos kiertää lämmönkeruuputkistossa ja saapuu höyrystimeen. Höyrystimessä lämmönkeruuliuos kohtaa kylmäaineen, joka on jääkylmää. Tämä saa kylmäaineen höyrystymään. Höyrystimessä kylmäaine tulistetaan yli höyrystymislämpötilan, jotta kylmäainetta ei päädy nestemäisenä kompressorille aiheuttaen vaurioita.
2. Kompressori: Höyrystynyt kylmäaine kaasumaisessa muodossa, johdetaan kompressoriin. Kompressori puristaa kaasun korkeaan paineeseen, mikä nostaa sen lämpötilaa.
3. Lauhdutin: Kuumakaasu siirtyy lauhduttimeen, jossa kiertovesi jäädyttää sen. Tämä jäähdytysprosessi muuttaa kylmäaineen takaisin nesteen ja kaasun seokseksi vapauttaen samalla lämpöä.
4. Talon lämmitysjärjestelmä: Lauhduttimessa vapautunut lämpö siirtyy talon lämmitysjärjestelmään ja käyttöveden lämmitykseen.
5. Paisuntaventtiili: Kylmäaine johdetaan paisuntaventtiiliin, jossa sen paine laskee. Paineen lasku muuttaa kylmäaineen jälleen täysin nestemäiseksi ja prosessi alkaa uudestaan höyrystimessä.

Lämpöpumpun tuottama lämpö jaetaan rakennuksen tiloihin vesikiertoisen lämmitysjärjestelmän avulla, kuten lämpöpattereiden, lattialämmityksen tai ilmalämmityksen kautta. Parhaan hyötysuhteen saavuttamiseksi lattialämmitys on suositeltavaa, sillä se toimii matalammalla ylimmillään 35 °C lämpötilalla, kun taas lämpöpatterilämmitys tarvitsee 55 °C menevää vettä kovimmilla pakkasilla. Lattialämmityksen pinta-ala ja vesitilavuus tekevät siitä tehokkaamman lämmönluovuttajan verrattuna lämpöpattereihin, ja lämmin lattia lisää asumismukavuutta sekä vähentää vedon tunnetta asuintiloissa. (Gebwell Oy, 2024c)

### 2.3 Lämpöpumpun COP-arvo

Lämpöpumpun suorituskykyä mitataan usein lämpökertoimella (COP, Coefficient of Performance), joka on keskeinen suure energiatehokkuuden arvioinnissa. COP-arvo ilmaisee, kuinka paljon lämpöenergiaa lämpöpumppu tuottaa suhteessa sen kuluttamaan sähköenergiaan. Esimerkiksi, jos lämpöpumpun COP-arvo on 4, se tuottaa nelinkertaisesti enemmän lämpöenergiaa kuin mitä se kuluttaa sähköenergiaa.

COP-arvo lasketaan kaavalla:

$$COP = \frac{Q}{W} \quad (1)$$

missä (Q) on tuotettu lämpöenergia kilowatteina ja (W) on kulutettu sähköenergia kilowatteina.

Tämä kaava osoittaa, että mitä korkeampi COP-arvo, sitä tehokkaampi lämpöpumppu on. COP-arvoon vaikuttavat useat tekijät, kuten olosuhteet keruu- ja lämmönluovutus piirissä, kylmäaineen ominaisuudet ja lämpöpumpun komponenttien laatu. COP-arvon parantaminen on tärkeä tutkimusalue, koska se voi merkittävästi vähentää energiankulutusta ja hiilidioksidipäästöjä. Tulevaisuudessa odotetaan, että teknologian kehittyessä lämpöpumppujen COP-arvot paranevat entisestään, mikä tekee niistä entistä houkuttelevamman vaihtoehdon sekä kotitalouksille että teollisuudelle. (Gebwell Oy, 2024d)

### 2.4 Lämpöpumpun SCOP-arvo

Seasonal Coefficient of Performance (SCOP) on lämpöpumpun suorituskyvyn mittari, joka antaa tarkemman kuvan laitteen energiatehokkuudesta kuin pelkkä COP-arvo. SCOP-arvo ottaa huomioon lämmityskausien vaihtelut ja Pohjois-Euroopassa laskenta perustuu Helsingin ilmasto-olosuhteisiin. Tämä tekee SCOP-arvosta luotettavamman mittarin lämpöpumpun kokonaissuorituskyvyn arvioinnissa, sillä se antaa realistisemmän kuvan lämpöpumpun tehokkuudesta eri lämmityskausien aikana. SCOP-arvo helpottaa myös eri valmistajien lämpöpumppujen tai saman valmistajan eri mallien vertailua. (Gebwell Oy, 2024d)

SCOP-arvo lasketaan huomioimalla lämpöpumpun sähköenergiankulutus eri toimintatiloissa, kuten kompressorin ollessa pois päältä, valmiustilassa, kampikammion lämmittimen ollessa päällä ja laitteen ollessa kokonaan pois päältä.

SCOP-arvo lasketaan kaavalla:

$$SCOP = \frac{Q_h}{\frac{Q_h}{SCOP_{on}} + H_{TO} * P_{TO} + H_{SB} * P_{SB} + H_{CK} * P_{CK} + H_{OFF} * P_{OFF}} \quad (2)$$

missä ( $Q_H$ ) on tuotettu lämpöenergia kilowattitunneissa lämmityskauden aikana, ( $SCOP_{ON}$ ) on lämpöpumpun SCOP-arvo, kun se on aktiivisessa tilassa, ( $H_{TO}$ ) on tuntimäärä vuodessa, jolloin lämpöpumpun kompressori on pois päältä, ( $P_{TO}$ ) on lämpöpumpun energiankulutus kilowatteina kompressorin ollessa pois päältä, ( $H_{SB}$ ) on tuntimäärä vuodessa, jolloin lämpöpumppu on valmiustilassa, ( $P_{SB}$ ) on lämpöpumpun energiankulutus kilowatteina valmiustilassa, ( $H_{CK}$ ) on tuntimäärä vuodessa, jolloin kampikammion lämmitin on päällä, ( $P_{CK}$ ) on kampikammion lämmittimen energiankulutus kilowatteina, ( $H_{OFF}$ ) on tuntimäärä vuodessa, jolloin lämpöpumppu on kokonaan pois päältä ja ( $P_{OFF}$ ) on lämpöpumpun energiankulutus kilowatteina ollessaan kokonaan pois päältä. (SFS Suomen Standardit ry, 2022b)

## 2.5 Uudet luonnolliset kylmäaineet

Euroopan Unionin uusi F-kaasuasetus astui voimaan maaliskuussa 2024. Tämä asetus on osa EU:n laajempaa Green Deal -ohjelmaa, jonka tavoitteena on saavuttaa hiilineutraalius vuoteen 2050 mennessä. Asetuksen tavoite on vähentää fluorattujen kasvihuonekaasujen käyttöä ja edistää luonnollisten kylmäaineiden käyttöä.

Fluoratut kylmäaineet, kuten R410A ovat olleet laajalti käytössä niiden tehokkuuden vuoksi, mutta niiden korkea GWP-arvo (Global Warming Potential) tekee niistä haitallisia ilmaston kannalta. Esimerkiksi R410A:n GWP-arvo on 2088, mikä tarkoittaa, että sen vaikutus ilmaston lämpenemiseen on huomattava. Uusi asetus kieltää näiden kylmäaineiden käytön useissa laitteissa siirtymäaikaan jälkeen, mikä luo tarpeen löytää ympäristöystävällisempiä vaihtoehtoja.

Gebwell on vastannut tähän haasteeseen tuomalla markkinoille uuden G-Eco-sarjan maalämpöpumput, jotka käyttävät luonnollista R290-kylmäainetta, eli propaania. Propaanin GWP-arvo on vain 0,02, mikä tekee siitä huomattavasti ympäristöystävällisemmän vaihtoehdon. Propaanin käyttö kylmäaineena ei ainoastaan vähennä ilmastovaikutuksia, vaan se on myös erittäin tehokas ja turvallinen vaihtoehto kun sitä käytetään asianmukaisesti.

G-Eco-sarjan lämpöpumput on suunniteltu erityisesti suurempien rakennusten, kuten toimistorakennusten ja taloyhtiöiden, lämmittämiseen ja viilentämiseen. Näiden laitteiden käyttö voi tuoda merkittäviä etuja paitsi ympäristön myös talouden kannalta. Energiatehokkuuden parantuminen ja alhaisemmat käyttökustannukset tekevät niistä houkuttelevan vaihtoehdon yrityksille ja yhteisöille, jotka pyrkivät vähentämään hiilijalanjälkeään ja säästämään energiakustannuksissa.

Gebwellin strategiana on laajentaa koko tuotevalikoimansa vastaamaan uuden F-kaasuasetuksen vaatimuksia asteittain. Tämä tarkoittaa, että tulevaisuudessa yhä useammat Gebwellin tuotteet tulevat käyttämään luonnollisia kylmäaineita, mikä tukee yrityksen sitoutumista kestäväan kehitykseen ja ympäristöystävällisiin ratkaisuihin. (Gebwell Oy, 2024e)

### 3 LÄMPÖPUMPPUJEN TUOTEKEHITYSKESKUS

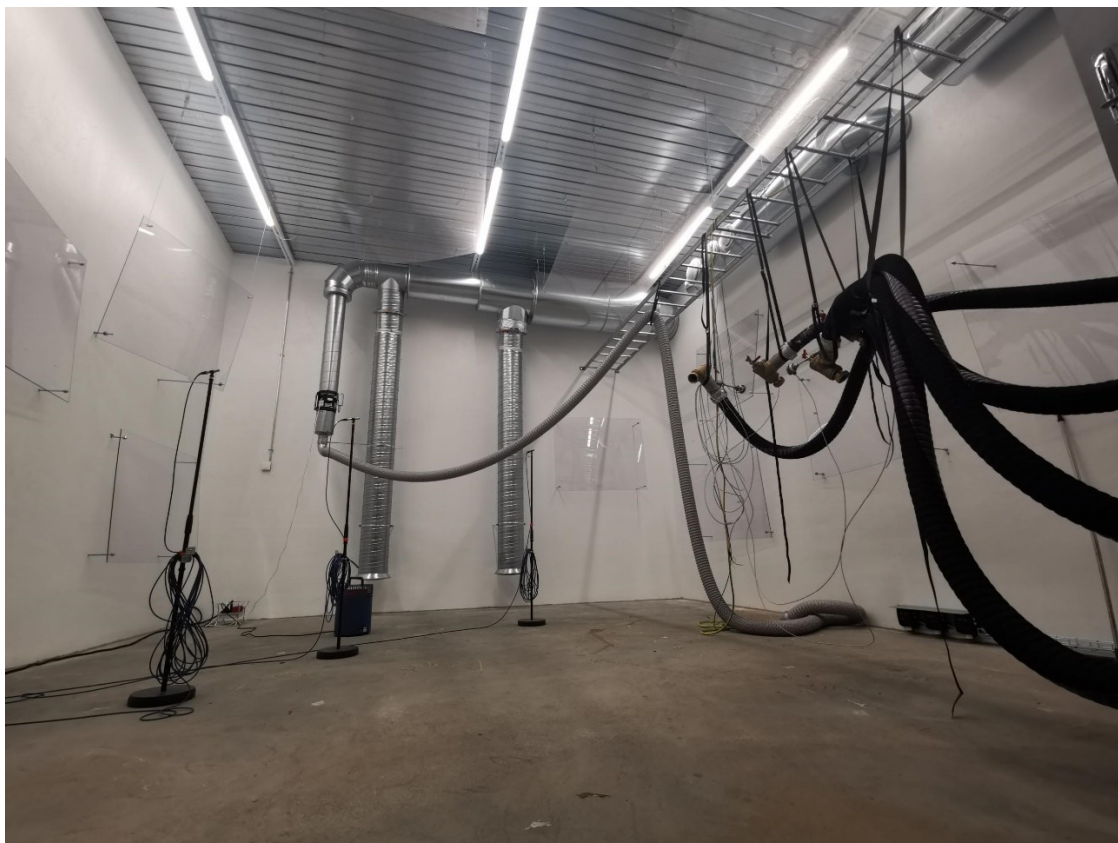
Gebwell Oy:n tuotekehityslaboratoriossa testataan maalämpöpumppujen ja muiden tuotteiden, kuten lämminvesivaraajien suorituskykyä. Laitteistolla voidaan suorittaa sekä automatisoituja standardimukaisia testejä, että manuaalisia tuotekehitystestejä. Painopiste on automatisoiduissa testeissä, mutta manuaalista testausta voidaan suorittaa operaattorin määrittämällä parametreilla. Järjestelmä tallentaa mittaustulokset sekä graafiseen että taulukkomuotoon. (Liite 1)

#### 3.1 Testausjärjestelmän yleiskuvaus

Testausjärjestelmä koostuu viidestä prosessiteknisestä kokonaisuudesta: höyrystinpiiri, lauhdutinpiiri, höyrystinpiirin lämmitys, lauhdutinpiirin jäähdytys ja testipaikat. Höyrystinpiirin lämmityskierto on yhteydessä kaukolämpöpiiriin ja lauhdutinpiirin jäähdytys on yhteydessä rakennuslämmityspiiriin ja maaliuoskiertoon. Höyrystinpiirin vettä voidaan myös lämmittää lauhdutinpiirin lämmöllä erillisessä lämmönvaihtimessa.

Höyrystin- ja lauhdutinpiirit on varustettu 4 m<sup>3</sup> varaajilla, jotka tasaavat lämpövaihteluita. Molempien piirien lämpötilansäätöperiaatteet ovat samankaltaiset: osa nesteestä kierrätetään varaajien kautta ja tilalle otetaan lämmitettyä tai jäähdytettyä nestettä, jotta lämpöpumpulle menevän veden lämpötila saadaan halutuksi.

Testijärjestelmässä on kolme testipaikkaa: T1 ja T2 päätestitilassa sekä T3 äänitestitilassamme kuvassa 2, joka on äänieristetty melutestausta varten. Testilaitteisto on mitoitettu 500 kW maalämpöpumpun kokonaislämpöteholle, mikä mahdollistaa erikokoisten lämpöpumppujen samanaikaisen testauksen. (Liite 1)



KUVA 4. Täyskaiullinen äänitestauktila (Pekkalin, 2024)

### 3.2 Automaatio ja tiedonkeruu

Testijärjestelmä tallentaa sähköjärjestelmän puolelta testipaikkakohtaisesti useita eri tietoja. Näihin kuuluvat vaihevirratt, vaihejännitteet, tehokerroin, loisteho ja ottoteho laitteen omalta energiamittarilta. Lisäksi järjestelmässä on mahdollisuus kytkeä verkkoanalysointilaite, jolla voimme testipaikka kohtaisesti mitata samat sähkösuureet, mutta laite on tarkempi, luotettavampi ja kalibroitu. Kuvassa 5 automaation aloitusnäky, näyttöjä valvomossa on kaiken kaikkiaan 7 kappaletta prosessin valvontaan.

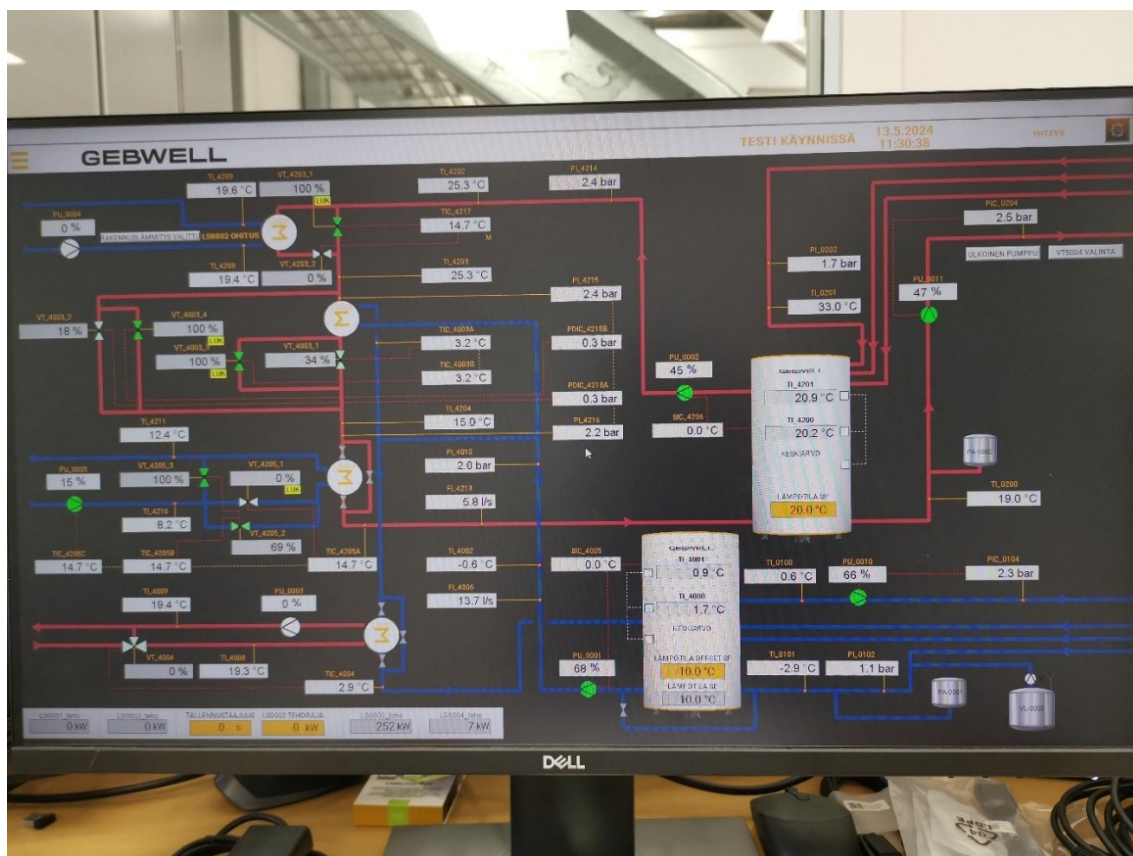
Loisteho on sähkötehon komponentti, joka ei tee varsinaista työtä, kuten valon tai lämmön tuottamista. Se syntyy vaihtovirtapiireissä jännitteen ja virran vaihe-eron vuoksi. Loisteho värähtelee edestakaisin kuorman ja siirtoverkon välillä ja sen yksikkö on volttilamppu-reaktiivinen (var). Loistehoa syntyy esimerkiksi loistelampuissa ja suurissa moottoreissa. (Sähköturvallisuuden edistämiskeskus, 2024) Loisteho on tärkeä seurattava suure suuri tehoisissa lämpöpumpuissa, koska sähköverkkoa ylläpitävä toimija laskuttaa liian suuresta loistehon määrästä.

Järjestelmään voidaan myös liittää ulkopuolisia mittalaitteita äänen ja värinän mittaukseen. Näiden mittausravat tallennetaan järjestelmään. Mittalaitteilla voidaan mitata ympäristön lämpötilaa, suhteellista kosteutta, staattista painetta sekä äänitehoa taajuusalueella 125–10 000 Hz.

Värinänmittaus sisältää kiihtyvyyden ja siirtymän mittaukset. Kiihtyvyyden osalta tallennetaan RMS keskiarvo, G-voiman keskiarvo, korkein piikkiarvo ja G-voiman piikkiarvo. Siirtymän osalta tallennetaan RMS keskiarvo ja korkein piikkiarvo.

Maalämpöpumpun tiedot saadaan väylän kautta ja ne tallennetaan järjestelmään. Näihin tietoihin kuuluvat kompressorin tilatiedot, kuten kompressorin on-off-tila, kompressorin nopeus (% / hZ), lataus-, keruu- ja tulistuspumpun nopeus prosentteina. Lisäksi tallennetaan paineet, kuten lauhdepaine ja höyrystymispaine, sekä lämpötilat kuten kuumakaasu, imukaasu, neste, lauhtumislämpötila, höyrystymislämpötila, tulistus höyrystimessä, lataus meno ja paluu, keruu sisään ja ulos sekä tulistus meno ja paluu.

Operaattori voi muuttaa mittaustulosten tallennustaajuutta 1 ja 60 sekunnin välillä ennen testin aloittamista. Kaikki data on mahdollista tarkastella järjestelmässä sekä taulukkona että graafisesti. (Liite 1)



KUVA 5. Automaatio järjestelmän aloitusnäky. (Pekkalin, 2024)

### 3.3 Laboratoriomme suunnitellut pätevydet

Laboratorion mittaukset perustuvat kansainvälisiin ja eurooppalaisiin standardeihin, mikä takaa mitausten tarkkuuden ja luotettavuuden. Akkreditointi noudattaa standardia SFS-EN ISO/IEC 17025:2017, joka määrittelee yleiset vaatimukset testaus- ja kalibrointilaboratorioiden pätevyydelle.

Lämpöpumppujen tehon mittaukset suoritetaan standardien "SFS-EN 378-1:2016 + A1:2020 Kylmäkoneistot ja lämpöpumput. Turvallisuus- ja ympäristövaatimukset." ja "SFS-EN 14511-1:2022 Tilojen lämmitykseen ja jäähdytykseen tarkoitetut huoneilmastointikoneet, nestejäähdyttimet ja lämpöpumput sekä prosessijäähdytyslaitteet, joissa on sähkökäyttöinen kompressori." mukaisesti. Näiden standardien avulla varmistetaan, että lämpöpumppujen suorituskyky vastaa laskennallisia arvoja ja että ne toimivat tehokkaasti eri olosuhteissa. Äänitasojen mittauksissa noudatetaan standardia "SFS-EN ISO 3741:en Acoustics. Determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure. Precision methods for reverberation test rooms (ISO 3741:2010)", joka määrittelee menetelmät ääniteho tasojen mittaamiseksi. Tämä varmistaa, että laitteiden melutaso pysyy hyväksyttävissä rajoissa ja täyttää asiakkaiden-, sekä säädösten vaatimukset.

Näiden standardien mukaiset mittaukset mahdollistavat sen, että tuotteita voidaan kehittää jatkuvasti paremmiksi ja varmistaa niiden luotettavuuden sekä tehokkuuden markkinoilla. (Gebwell Oy, 2024f)

## 4 TEOREETTINEN VIITEKEHYS

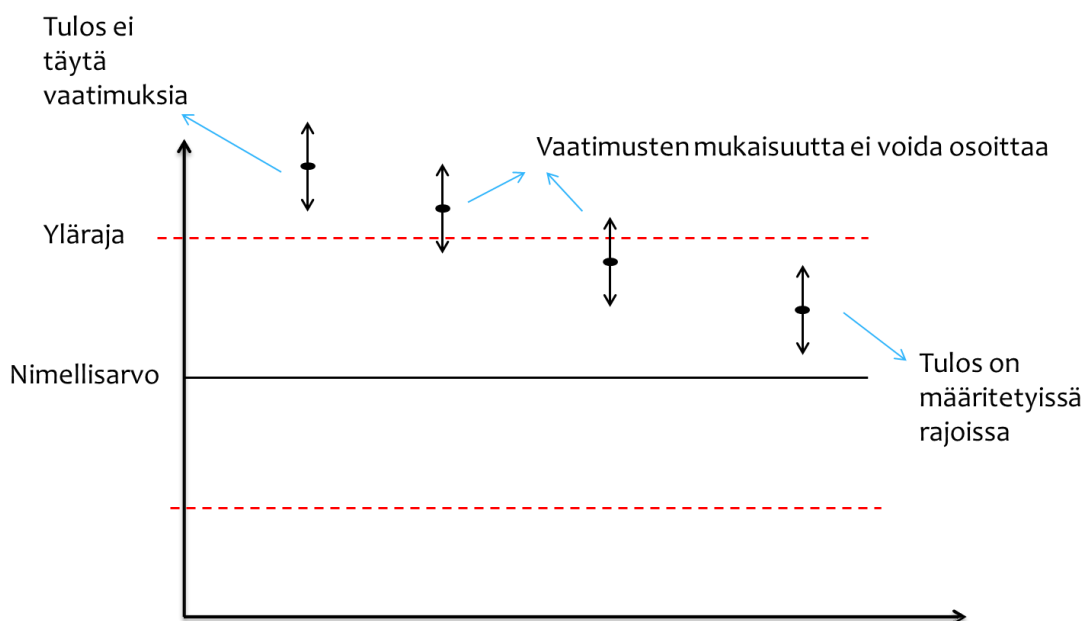
### 4.1 Mittausepävarmuus

Jokainen mittaustulos sisältää aina jonkin verran epävarmuutta. Tulosten hyödyllisyyden varmistamiseksi on tärkeää, että mittausepävarmuus pysyy hyväksyttävällä tasolla ja että se otetaan huomioon tulosten raportoinnissa.

Mittaustuloksiin vaikuttaa useita tekijöitä, joita ei voida täysin tarkasti tuntea. Tämän vuoksi kaikki mittaustulokset sisältävät tietyn epävarmuuden, joka kuvastaa tuloksen mahdollisia vaihteluita.

Mittausepävarmuuden arviointi on välttämätöntä tulosten luotettavuuden arvioimiseksi, tulosten vertailukelpoisuuden varmistamiseksi, vaatimustenmukaisuuden osoittamiseksi, menetelmien vertailuun ja mittausten jäljitettävyyden varmistamiseksi.

Mittausepävarmuuteen vaikuttavien tekijöiden tunnistaminen, arviointi ja laskeminen auttaa ymmärtämään mittaustuloksiin vaikuttavia tekijöitä ja niiden vaikutusmekanismeja. Tieto mittausepävarmuudesta tarjoaa perustan mittausten kehittämiseksi todellisten tarpeiden mukaisiksi. (Finas-Akkreditointipalvelu, 2023a)



KUVA 6. ILAC G8 -oppaan mukainen määritelmä vaatimustenmukaisuudesta ja tulosten tulkinnasta (Finas-Akkreditointipalvelu, 2023a)

#### 4.1.1 Mittausepävarmuuden analyysi

Mittausepävarmuuden analyysi on prosessi, joka varmistaa mittaustulosten tarkkuuden ja luotettavuuden. Ensimmäinen askel on määritellä matemaattisesti, miten mittaussuure riippuu lähtösuureista. Tämä voidaan esittää funktiona, joka kuvaa mittaussuureen riippuvuuden eri muuttujista.

$$Y = f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n) \quad (3)$$

missä (Y) on mittaussuure ja (X<sub>n</sub>) on muuttuja. Mittausyhtälöissä käytetään usein kerto-, jako- tai potenssilaskua (Kärhä, 2004).

Seuraavaksi on tärkeää tunnistaa ja tehdä korjaukset mittaustuloksiin. Tämä voi sisältää esimerkiksi kalibrintikorjaukset ja muut havaitut virheiden korjaukset, jotka voivat vaikuttaa mittaustuloksiin.

Mittausepävarmuuden arvioinnissa on tärkeää luetteloida kaikki mahdolliset epävarmuuslähteet. Näitä voivat olla esimerkiksi mittalaitteiden tarkkuus, ympäristöolosuhteet ja mittausmenetelmät. Tämän jälkeen voidaan laskea standardiepävarmuus toistettavasti mitatuille suureille tilastollisin menetelmin. Standardiepävarmuus voidaan laskea keskihajonnan avulla:

$$u_A = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (4)$$

missä (s) on mittausten keskihajonta ja (n) on mittausten lukumäärä.

Tyyppin B epävarmuudet arvioidaan muilla menetelmillä, kuten valmistajan antamien tietojen, kalibroitodistusten tai asiantuntija-arvioiden perusteella. Näitä epävarmuuksia ei voida arvioida tilastollisesti, mutta ne ovat silti merkittäviä mittaustulosten tarkkuuden kannalta.

$$u_B = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (5)$$

missä (a) on puolet vaihteluvälistä, jonka sisällä suureen uskotaan olevan.

Yhdistetty mittausepävarmuus lasketaan kaikkien epävarmuuskomponenttien neliöllisenä summana:

$$u(y) = \sqrt{(u(x_1))^2 + u(x_2)^2 + \dots + u(x_n)^2} \quad (6)$$

Lopuksi lasketaan laajennettu epävarmuus kertomalla yhdistetty standardiepävarmuus halutulla kattavuuskertoimella. Laajennettu epävarmuus saadaan seuraavasti:

$$U = k * u_c \quad (7)$$

missä (k) on kattavuuskerroin, joka yleensä valitaan siten, että se kattaa 95 % luotettavuusvälin yleensä k on 2. (Kärhä, 2004)

#### 4.2 Akkreditoinnin vaatimukset kalibroinnin suhteen

Akkreditoinnin saavuttaminen lämpöpumppulaboratoriolle vaatii useiden erityisvaatimusten täyttämistä kalibroinnin suhteen, jotka eroavat tavanomaisen akkreditoimattoman laboratorion käytännöistä.

Ensinnäkin akkreditoitun laboratorion on noudatettava standardia SFS-EN ISO/IEC 17025:2017, joka määrittelee yleiset vaatimukset testaus- ja kalibrointilaboratorioiden pätevyydelle. Tämä standardi edellyttää, että kaikki mittauslaitteet kalibroidaan jäljitettävästi kansallisiin tai kansainvälisiin mittanormaaleihin. Tämä tarkoittaa, että mittaustulosten on oltava vertailukelpoisia ja jäljitettäviä hyväksytyihin referensseihin aukottoman vertailuketjun avulla, jossa ilmoitetaan kaikkien vertailujen epävarmuudet.

Kalibrointien metrologinen jäljitettävyys on varmistettava. Tämä tarkoittaa, että jokaisen kalibroinnin on oltava dokumentoitu ja jäljitettävissä kansallisiin tai kansainvälisiin standardeihin. Lisäksi kalibrointitulosten epävarmuudet on ilmoitettava selkeästi ja niiden arvioinnissa on noudatettava standardia EA-4/02 M:2022, joka käsittelee mittausepävarmuuden arviointia ja ilmoittamista kalibroinnissa.

Akkreditoitun laboratorion on myös noudatettava ILAC P10:07/2020-ohjetta, joka käsittelee mittaustulosten metrologista jäljitettävyyttä, sekä ILAC P14:09/2020-ohjetta, joka tarkentaa periaatteita mittaustulosten jäljitettävyyden määrittämiseen ja ilmoittamiseen kalibroinnissa. Nämä ohjeet varmistavat, että kalibroinnit suoritetaan korkeiden laatuvaatimusten mukaisesti ja että tulokset ovat luotettavia ja jäljitettäviä.

Lisäksi akkreditoitun laboratorion on varmistettava, että kaikki kalibrointilaitteet ja -menetelmät ovat asianmukaisesti dokumentoituja ja että henkilöstö on pätevää ja koulutettua suorittamaan kalibrointeja.

Toisin kuin akkreditoimattomassa laboratoriossa, akkreditoitun laboratorion on myös osallistuttava säännöllisiin vertailumittauksiin ja laadunvarmistusohjelmiin, jotka varmistavat mittaustulosten vertailukelpoisuuden ja luotettavuuden. Tämä auttaa tunnistamaan ja korjaamaan mahdolliset poikkeamat mittaustuloksissa.

Näiden vaatimusten täyttäminen auttaa varmistamaan, että lämpöpumppulaboratoriomme mittaukset ovat tarkkoja, luotettavia ja kansainvälisesti hyväksytyjä, mikä on olennaista akkreditoinnin saamiseksi ja ylläpitämiseksi. (Finas-Akkreditointipalvelu, 2023b)

#### 4.3 SFS-EN 14511-1:2022-standardin merkitys ja kattavuus

Maalämpöpumppujen testausolosuhteet määritellään tarkasti, jotta niiden suorituskyky voidaan arvioida luotettavasti ja vertailukelpoisesti. Testausolosuhteet perustuvat standardiin SFS-EN 14511-1:2022, joka asettaa vaatimukset lämpöpumppujen suorituskyvyn mittaamiselle.

Testauksessa käytetään erilaisia lämpötilaolosuhteita, jotka simuloivat todellisia käyttötilanteita. Esimerkiksi höyrystinpiirin ja lauhdutinpiirin lämpötilat säädetään tarkasti, jotta voidaan arvioida lämpöpumpun tehokkuutta ja suorituskykyä eri lämpötilaeroissa. Tyypillisesti höyrystinpiirin lämpötila voi olla esimerkiksi 0°C ja lauhdutinpiirin lämpötila 35°C, mutta testauksessa voidaan käyttää myös muita lämpötiloja riippuen testin tavoitteista. Lisäksi testauksessa otetaan huomioon virtausnopeudet ja paine-erot, jotka vaikuttavat lämpöpumpun suorituskykyyn. (SFS Suomen Standardit ry, 2022a)

Testausolosuhteet voivat myös sisältää erilaisia kuormitusolosuhteita, kuten osakuormitustestit, joissa arvioidaan lämpöpumpun suorituskykyä osittaisella kuormituksella. Tämä on tärkeää, koska lämpöpumput toimivat harvoin täydellä teholla jatkuvasti ja niiden suorituskyky osakuormituksella vaikuttaa energiatehokkuuteen ja käyttökustannuksiin.

## 5 TEHON MITTAUKSEN PARANTAMINEN

Lämpöpumpun teho voidaan mitata virtaaman ja lämpötilaeron avulla. Lämpöpumpun tuottama lämpöteho ( $Q$ ) voidaan laskea seuraavalla kaavalla:

$$Q = \dot{m} * c_p * \Delta T \quad (8)$$

missä ( $\dot{m}$ ) on massavirta kg/s, ( $c_p$ ) on nesteen ominaislämpökapasiteetti kJ/kg\*K ja ( $\Delta T$ ) on lämpötilaero kelvineissä ennen ja jälkeen lauhduttimen.

Lauhdeputkistossa väliaineena on puhdas vesi ja höyrystinputkistossa noin 30 % vesietanoliseos, joka estää höyrystin putkiston jäätyksen ja luo maalämpökeruuliuksen kaltaiset olosuhteet lämmönsiirrossa. 30 % vesietanoliseos alkaa hyhmyä eli jäätyä noin -15 °C-asteen jälkeen. Höyrystin tehonmittauksessa pystymme käyttämään kaavaa (8), mutta lisänä täytyy ottaa huomioon etanolipitoisuus tiheyden laskennassa. (Liite 1)

Tehonmittauksessa tärkeää on mitata myös kompressorin-, pumppujen ja laitteiston ottoteho, jotta voimme laskea kaavan (1) mukaisesti COP-arvon. Kompressorin sähkötehon saamme laskettua seuraavasti:

$$P = V \cdot I \cdot \cos(\phi) \quad (9)$$

missä ( $V$ ) on jännite, ( $I$ ) on virta ja ( $\cos(\phi)$ ) on tehokerroin. Tämä kaava ottaa huomioon sähkötehon, joka syötetään kompressoriin. Tehokerroin ( $\cos(\phi)$ ) kuvaa, kuinka tehokkaasti sähköenergia muunnetaan mekaaniseksi energiaksi.

### 5.1 Nykyiset mittausmenetelmät ja niiden haasteet

Laboratorion laaja testausalue (6–500 kW) aiheuttaa haasteita, koska putkistojen koko on suunniteltu suurin teho huomioiden. Tällöin pienellä teholla ja virtaamalla havaittiin aiheutuvan kerrostumisilmiöitä. Anturien sijoittelu ja virtaaman hallinta tarkasti valituissa kohdissa voisivat vähentää mittausvirheitä. Ennen lämpötila-anturia turbulентtinen virtaus auttaa tasaamaan lämpötilan jakautumista putkessa ja ehkäisee kerrostumien syntyä ylä- ja alaosan välillä, mikä takaa tarkemman lämpötilamittauksen. Lisäksi lämpötila-anturit tulisi standardin SFS-EN 14511 mukaisesti sijoittaa 45 asteen kulmaan virtaukseen nähden ja paineanturit asentaa lämpöpumppujen yläpuolelle, mikä vähentäisi liitosputkiston aiheuttamaa häiriötä ja parantaisi mittauksien luotettavuutta. (SFS Suomen Standardit ry, 2022a)

### 5.2 Virtauksen muuttaminen turbulenttiseksi

Huomasimme lämpökameralla mitatessa, että isoissa DN100-DN125 lauhdepuolen putkistoissa oli paikoin noin 5–7 °C lämpötilaero putken ylä- ja alaosan välillä. Käytimme mittauksiin Flir Cx5 lämpökameraa, jonka mittausepävarmuus 0-100 °C mitta-alueella on  $\pm 5$  °C (Teledyne Flir, 2022). Mittauksissa toistui sama lämpötilaero eri mittauspisteiden välillä, jonka erotti myös kädellä kokeillessa. Haasteena mittauksessa oli ruostumattomasta teräksestä valmistettu putkisto, jota lämpökamera ei pysty mittaamaan materiaalin takia. Ruostumattomalla teräksellä on alhainen emissiivisyys, mikä tarkoittaa, että se heijastaa suurimman osan infrapunasäteilystä eikä emittoi sitä tehokkaasti (Fluke, 2024). Tämä tekee lämpötilan mittaamisesta vaikeaa ilman erityisiä toimenpiteitä, kuten teippausta.

Alhaisen emissiivisyyden omaava materiaali lähettää vain pienen osan siitä säteilystä, jonka se vastaanottaa ja heijastaa suurimman osan takaisin ympäristöönsä. Emissiivisyys kuvaa materiaalin kykyä lähettää omaa lämpösäteilyään suhteessa täydelliseen säteilijään, jonka emissiivisyys on yksi. Esimerkiksi kiiltävillä pinnoilla, kuten kirkkaalla alumiinilla emissiivisyys voi olla hyvin alhainen, jopa 0,05. (Puustinen, 2019)

Valitsimme mittapisteen putkiston pisimmiltä, yli DN125 putkikoon vaakaosuuksilta testipaikan ja 3-tie sekoitusventtiilien väliltä, noin 3–5 pisteestä lauhteen meno- ja paluuputkesta. Kuvassa 7 on esitetty virtausmittarihuone, huoneen katossa testipaikkojen paluulinjat. Testipaikan mukaan putkimetrejä kertyy 5–15 metriä maalämpöpumpun ja lauhdetta viilentävän sekoitusventtiilin välillä.

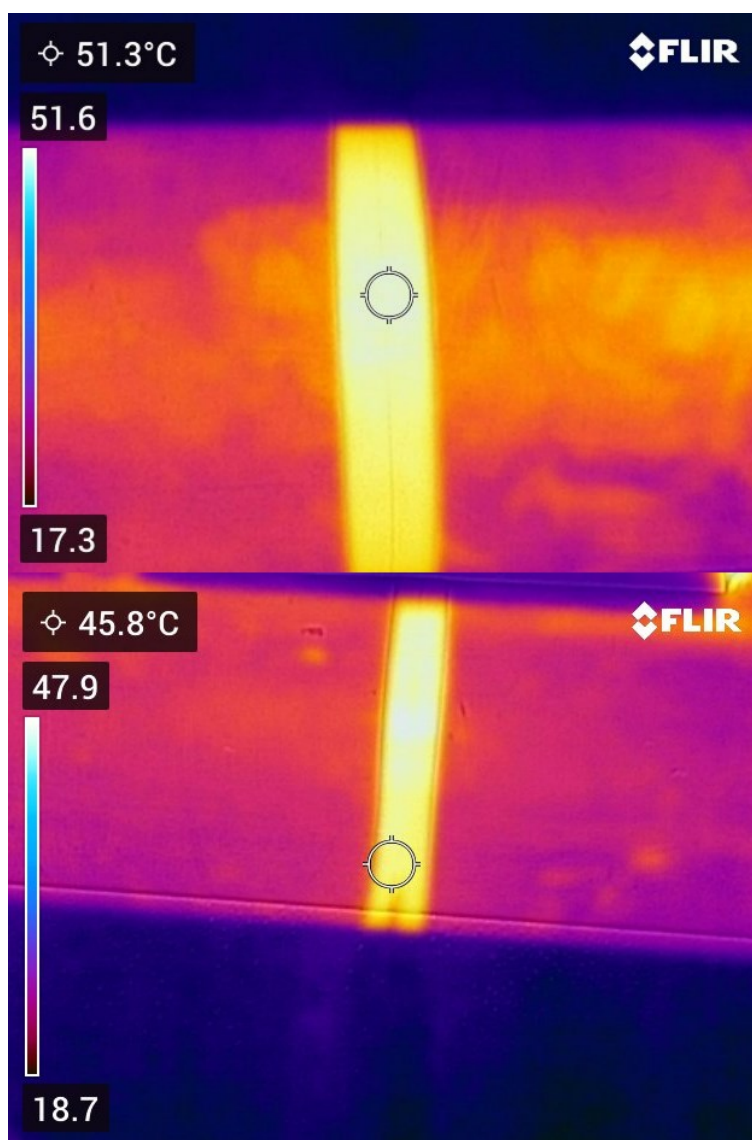
Teippasimme mittauskohdat lämpöä johtavalla teipillä, jota käytämme putken pintaan asennettavien lämpötila-antureiden ja putken välisissä asennuksissa. Kuvassa 8 teipattu mittauskohta. Mittasimme lämpötilaa putken ylä- ja alapinnasta mittapisteissä. Kuvassa 9 on esitetty yksi lämpökameravertailumittaus. Veden kerrostumista esiintyi putkistossa yli 40 °C lämpötiloissa. Standardi ehdottaa isommissa putkistoissa joko kuristusta tai virtauksen sekoittamista ennen lämpötilamittausta (SFS Suomen Standardit ry, 2022a).



KUVA 7. Virtausmittarihuone, etualalla neljä erikokoista sekoitusventtiiliä ja katossa testipaikoilta 2 ja 3 palaavat putkistot. (Pekkalin, 2024)

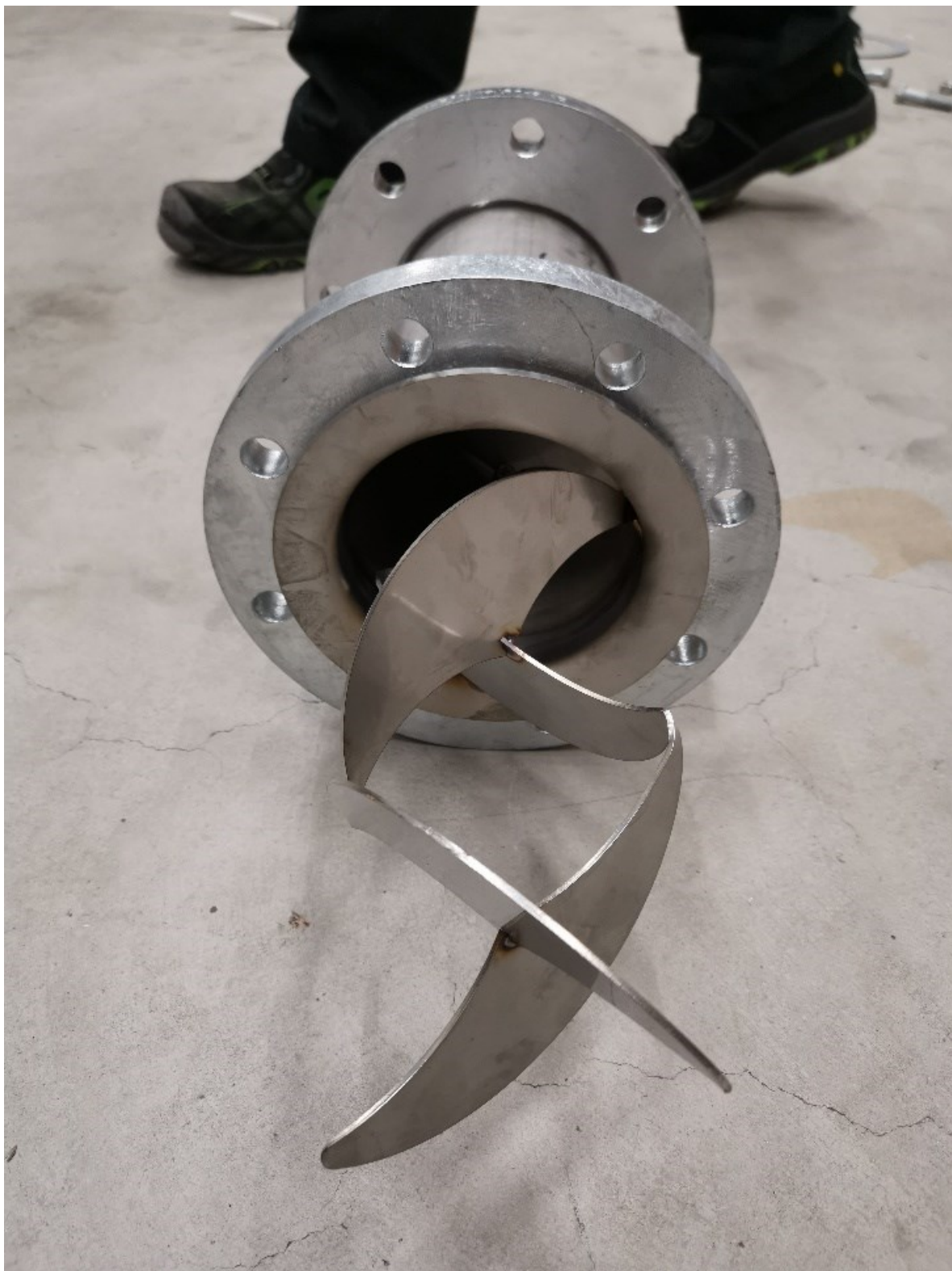


KUVA 8. Lämpöteipillä teipattu mittauspiste. (Pekkalin, 2024)



KUVA 9. DN125 putkilinjan lämpökameramittaukset samalla hetkellä putken ylä- ja alapinnasta. (Pekkalin, 2024)

Päädyimme asentamaan kuvassa 10 näkyvän sekoittimen yhteen lauhdemittariston putkeen, mikä auttoi tasaamaan lämpötilan jakautumista putkessa ja paransi mittaustarkkuutta. Samalla siirsimme lauhdelämpötilaa säättävän lämpötilamittauksen (kuvassa 11) lähemmäksi säätöventtiiliä heti sekoittimen jälkeen, tämä muutos lyhensi säädön reagointiaikaa ja rauhoitti linjalämpötilan heilahteluja.



KUVA 10. Sekoittaja DN125 putkeen pistehitsauksella kiinnitettynä. (Pekkalin, 2024)



KUVA 11. Sekoittaja putkistoon asennettuna ja lämpötilamittaus siirrettynä heti sen jälkeen. Kuvassa näkyy myös kaksi pienintä lauhdelinjan virtausmittaria 6–40 kW lämpöteholle. (Pekkalin, 2024)

### 5.3 Lämpötilaeromittausten siirto oikeisiin paikkoihin

Lämpötilamittaukset sijaitsivat aiemmin kiinteissä DN125 putkistolinjoissa ennen laitteen kytkentäletkuja, noin 2–3 metrin päässä mitattavasta lämpöpumpusta. Näillä neljällä anturilla mitataan lämpötilaeroa höyrystimessä ja lauhduttimessa. Toinen anturi mittaa aina sisään menevän ja toinen ulos tulevan nesteen lämpötilaa kaavan (8) mukaisesti. Suunnittelussa ei ollut huomioitu, että standardi SFS-EN 14511-1:2022 olisi vaatinut lämpötilamittauksia ennen virtauksen sekoittamista ja antureiden kääntämistä 45 asteen kulmaan virtausta kohti. Lisäksi lämpöhäviöt olisi pitänyt ottaa huomioon kytkentäletkuissa lämpöpumpun ja mittausten välillä.

Päätimme siirtää anturit suoraan mitattavan lämpöpumpun päälle ja kääntää ne 45 asteen kulmaan. Putkikoko kytkentäletkuissa pienenee  $2\frac{2}{3}$ -3 tuumaan, jolloin standardi ei vaadi linjan kuristamista tai virtauksen sekoittamista. Tämä ratkaisu poistaa tarpeen huomioida lämpöhäviöitä, mikä parantaa mittaustarkkuutta. Mittausten viive pieni, mikä paransi liuos- ja latauspumppujen säätöä ja vakautti prosessin nopeammin asetettuun olosuhteeseen.

Kuvassa 12 esitellään PI-kaavio suurimmasta lauhdemittauslinjasta 3 ja kuvan alaosassa testipaikka 3, joka sijaitsee äänitestitilassa. Kuvassa punaiset nuolet osoittavat lämpötilamittausten siirrot putkistossa ja sekoittajan paikan ennen lämpötilamittausta TI-3200. Kuva havainnollistaa myös virtausmittarien ja sekoitusventtiilien sijoittelun mittaristossa. Nuolet osoittavat virtaussuunnan. Kaikkien mittaristojen rakenne on samanlainen. (Liite 2)



## 6 KÄYTÄNNÖN TOTEUTUS

Ennen putkistomuutoksia käytössä oli dataa aiemmista lämpöpumppujen tehonmittauksista, joten pääsisimme hyvin vertaamaan mittaustarkkuutta suunniteltujen muutosten jälkeen. Käytännön toteutus oli helppohko tehdä, koska tarvitsimme purkaa yhden lauhdemittariston ja asentaa sinne sekoittajan, joka tekisi virtauksesta turbulenttisen mittaristoryhmän alimmassa DN125 putkessa. Lisäksi siirsimme lämpötilamittaukset uusiin suunniteltuihin paikkoihin. Kuvassa 14 on lämpötilaeroa mittaava anturi asennettuna lämpöpumpun päälle 45-asteen kulmassa. Automaation osalta tämä ei vaatinut muutoksia mittauksissa tai venttiilien ohjauksessa. Sekoitusventtiilin PID-säätöön jouduttaisiin ehkä tekemään pientä säätöä, kun 3-tie venttiiliä ohjaava lämpötilamittaus muuttuu lähemmäksi. Kuvassa 13 on esitetty virtausmittaristo purettuna.



KUVA 13. Lauhemittaristo alaputkisto purettuna. Kuvassa näkyvät virtausmittarit ja 3-tie säätöventtiiliryhmät. (Pekkalin, 2024)



KUVA 14. Lämpötilaeroa mittaava anturi lämpöpumpun päällä 45° -kulmassa virtaussuuntaan. (Pekkalin, 2024)

## 6.1 Mittauslaitteet ja -menetelmät

### 6.1.1 Lämpötilamittarit

Krohne Inor Optitemp TRA-S 12 on kierreliitännällä varustettu RTD-lämpötila-anturi, joka soveltuu nesteiden ja kaasujen lämpötilan mittaamiseen. Sen mittausalue laboratoriossamme on  $-25^{\circ}\text{C}$  -  $125^{\circ}\text{C}$  ja se tuottaa 4–20 mA signaalin. Anturi on suunniteltu kestävämmän matalia ja keskisuuria paineita sekä virtausnopeuksia. (Krohne, 2024) Anturi ja lähetin esitelty kuvassa 15 etummaisena.

### 6.1.2 Paineanturit

Aplisens PCE-28 Smart mittaa paineen, alipaineen ja absoluuttisen paineen arvoja. Sen mittausalue laboratoriossamme on 0–4 bar ja se tuottaa 4–20 mA signaalin. Anturi käyttää piezoresistivistä piianturia, joka on erotettu mitattavasta väliaineesta kalvolla ja manometrisella nesteellä. (Aplisens, 2023) Anturi ja lähetin esitelty kuvassa 15 takimmaisena.

### 6.1.3 Virtausmittarit

Comal Cal Flow38H on induktiivinen virtausmittari, joka on suunniteltu sähköä johtavien nesteiden virtausmittauksiin. Sen mittausalue laboratoriossamme vaihtelee antureittain välillä  $1\text{--}122\text{ m}^3/\text{h}$  ja se tuottaa 4–20 mA signaalin. Mittari voidaan varustaa erilaisilla prosessiliitännöillä, kuten laippa- ja kierreliitännöillä. (Comac Cal, 2018) Anturi ja lähetin kuvassa 16.



KUVA 15. Taustalla paineanturi Aplisens ja edessä lämpötila-anturi Krohne Inor. (Pekkalin, 2024)



KUVA 16. Comac Calin DN50-virtausmittari ja -lähetin asennettuna mittauslinjaan. (Pekkalin, 2024)

## 7 TULOKSET

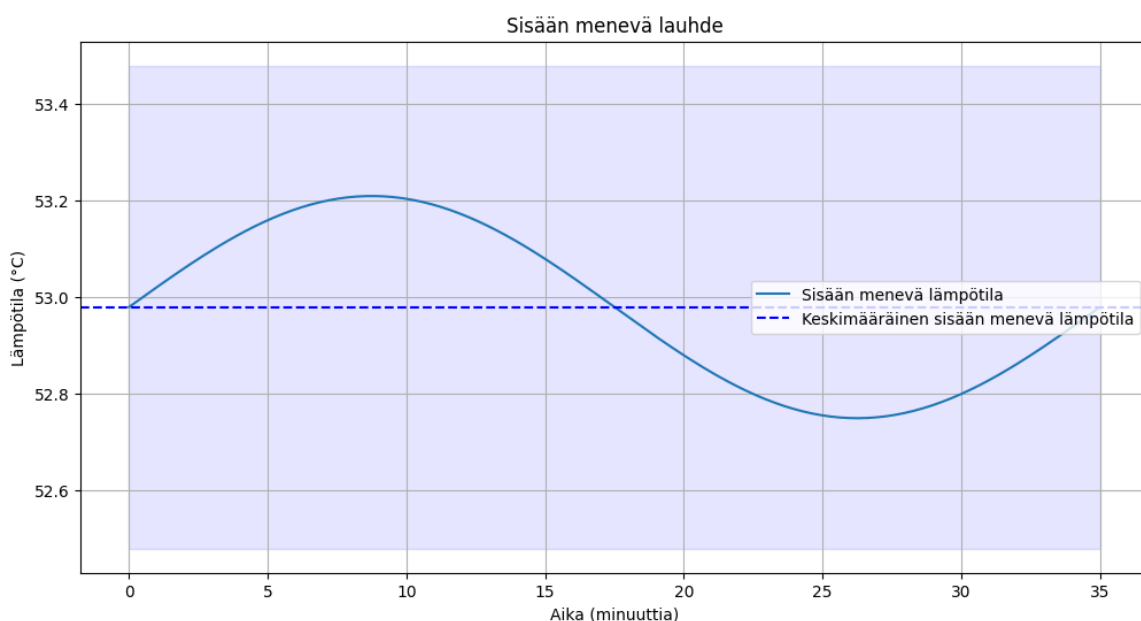
Esimerkkiolosuhteena käytettiin tilannetta, jossa höyrystimen lämpötila oli 0 °C ja lauhteen lämpötila 63 °C. Standardi SFS-EN 14511-1:2022 sallii lämpöpumppuun sisään tulevassa nesteessä  $\pm 0,5$  °C:n ja ulos tulevassa  $\pm 0,6$  °C:n heilunnan yksittäisissä lämpötilamittausarvoissa 10 sekunnin välein kerättävässä datassa ja  $\pm 0,2$  tai  $\pm 0,3$  °C:n aritmeettisen keskiarvoheilunnan 35 minuutin testin aikana asetetusta olosuhteesta. Jos nämä arvot ylittyvät, testi on aloitettava alusta 30 minuutin rauhoitusajalla, jonka aikana lämpötilan tulee pysyä sallituissa rajoissa. (SFS Suomen Standardit ry, 2022a)

Aiemmissa mittauksissa testiolosuhdetta ei saavutettu standardin asettaman 3 tunnin aikaikkunan sisällä, koska 30 minuutin rauhoitusajalla lämpötila karkasi yli 0,5 °C-asteen päähän asetetusta. Heilunta oli noin  $\pm 1,3$  °C-astetta, virtausnopeuden ollessa 1,8 litraa sekunnissa lauhdeputkistossa. Tämä tarkoittaa DN125-putkessa virtausnopeutena noin 0,15 m/s kun suositeltu virtausnopeus olisi 1–2 m/s (Salhydro, 2024). Vertailumittaukset tehtiin samoilla putkiston virtaamilla 1,8 l/s. Virtausnopeuden laskemiseen putkessa voidaan käyttää seuraavaa kaavaa:

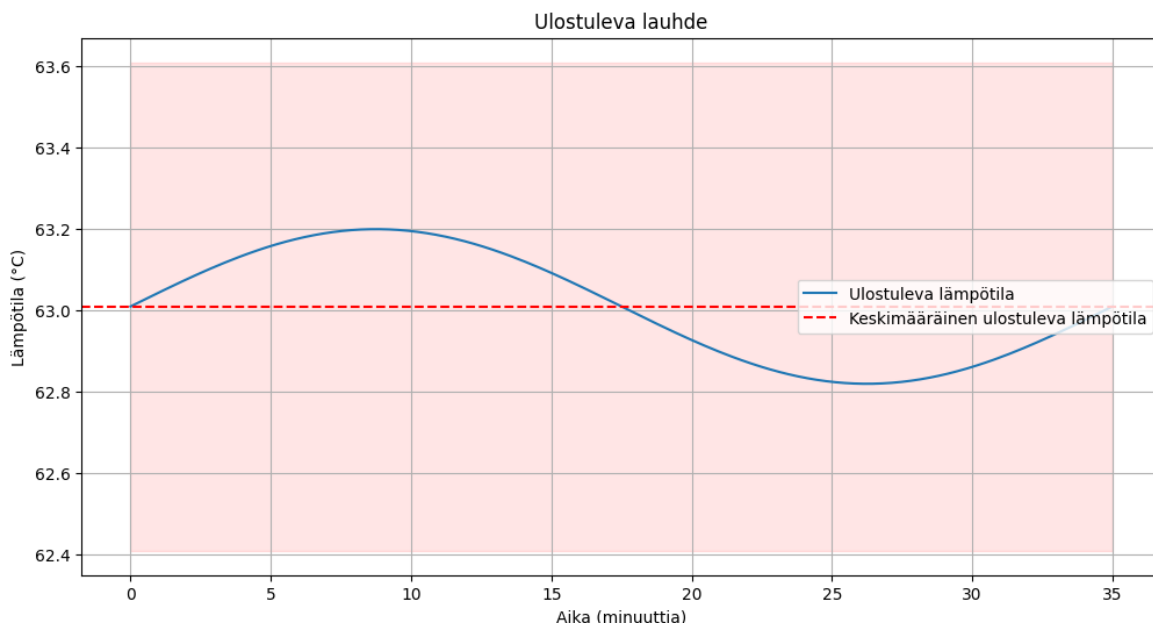
$$v = \frac{Q}{A} \quad (10)$$

missä, ( $v$ ) on virtausnopeus (m/s), ( $Q$ ) on tilavuusvirtaama ( $m^3/s$ ) ja ( $A$ ) on putken poikkipinta-ala ( $m^2$ ).

Muutosten jälkeen havaitsimme heti säädön paremman reagoinnin ja haluttu olosuhde saavutettiin nopeammin, noin 30–40 minuutissa. Rauhoitusaikana heilunta tasaantui  $\pm 0,25$  °C-asteeseen ennen testiajan alkamista. 35 minuutin testijakson aikana, 10 sekunnin välein mitattavan lämpötilan keskiarvoksi saimme 63,01 °C ulostulevasta lauhteesta ja 52,98 °C lämpöpumpun sisään menevästä lauhteesta. Suurimmat mitatut poikkeamat asetetusta lämpötilasta sisään menevässä nesteessä olivat  $\pm 0,23$  °C ja ulostulevassa  $\pm 0,19$  °C. Kuvissa 17 ja 18 graafisesti esitettynä lämpötilavaihtelut ja standardin asettamat rajat.



KUVA 17. Sininen katkoviiva edustaa lämpöpumppuun sisään menevän lauhteen keskilämpötilaa 35 minuutin testin aikana. Varjostettu sininen tausta kuvaa standardin sallimia lämpötilan vaihteluvälejä.



KUVA 18. Punainen katkoviiva edustaa lämpöpumpusta ulostulevan lauhteen keskilämpötilaa 35 minuutin testin aikana. Varjostettu punainen tausta kuvaa standardin sallimia lämpötilan vaihteluvälejä.

### 7.1.1 Tulosten analysointi

Analysoimme mittaustuloksia vertaamalla ennen ja jälkeen muutosten saatuja arvoja. Ennen muutoksia lämpötilan heilunta oli huomattavasti suurempaa, mikä vaikeutti testin suorittamista standardin mukaisesti. Muutosten jälkeen lämpötilan hallinta parani merkittävästi ja mittaustulokset pysyivät sallituissa rajoissa. Lämpötilan tarkkuus parani huomattavasti, mikä mahdollisti testin suorittamisen standardin mukaisesti. Antureiden oikea sijoittelu ja sekoittajan käyttö paransivat lämpötilan hallintaa ja vähensivät heiluntaa. Säädön nopeampi reagointi auttoi saavuttamaan halutut olosuhteet nopeammin ja pitämään ne vakaampina.

Höyrystipuolen putkistossa ei ole ollut vastaavaa ongelmaa virtauksen sekoittumisessa, koska lämpötilat ovat matalammat, pääsääntöisesti  $-3 - +10$  °C, jolloin nesteen tiheyden vaihtelut ovat pienempiä. Tämän takia matalissa lämpötiloissa nesteen tiheys pysyy suhteellisen vakaana, mikä vähentää virtauksen sekoittumisongelmia. Korkeammassa lämpötiloissa, kuten lauhdepuolella tiheyden vaihtelut ovat suurempia, mikä voi aiheuttaa virtauksen epätasaisuutta ja kerrostumisongelmia suuressa putkistossa pienellä virtausnopeudella. (U.S. Geological Survey, 2018)

## 8 JOHTOPÄÄTÖKSET JA SUOSITUKSET

### 8.1 Työn merkitys ja vaikutukset

Työn aikana suoritettavat mittaukset ja tehdyt muutokset osoittivat parannuksia mittaustarkkuudessa ja lämpötilan hallinnassa.

Testiolosuhteen saavuttaminen oli haaste ennen muutoksia. Testiolosuhdetta ei saavutettu standardin asettaman kolmen tunnin aikaikkunan sisällä, koska 30 minuutin rauhoitusajalla lämpötila karkasi yli 0,5 °C-asteen päähän asetetusta. Heilunta oli noin ±1,3 °C-astetta, virtausnopeuden ollessa 1,8 litraa sekunnissa lauhdeputkistossa. Muutosten jälkeen havaittiin heti säädön parempi reagointi ja haluttu olosuhde saavutettiin nopeammin, noin 30–40 minuutissa. Rauhoitusaikana heilunta tasaantui ±0,25 °C-asteeseen ennen testiajan alkamista.

Keskimääräinen lämpötila 35 minuutin testin aikana vaikutti myös parantuneen. Ennen muutoksia ulosmenevän lauhteen keskimääräinen lämpötila oli 63,21 °C, kun taas muutosten jälkeen se oli 63,01 °C. Sisään menevän lauhteen keskimääräinen lämpötila oli ennen muutoksia 53,16 °C ja muutosten jälkeen 52,98 °C. Nämä tulokset osoittavat, että lämpötilan hallinta parani, mikä mahdollisti testin suorittamisen standardin SFS-EN 14511-1:2022 mukaisesti.

Suurimmat poikkeamat asetetusta lämpötilasta olivat myös pienemmät ja standardin rajoissa muutosten jälkeen. Ennen muutoksia sisään menevän nesteen suurimmat poikkeamat asetetusta lämpötilasta olivat ±1,3 °C, kun taas muutosten jälkeen ne olivat ±0,23 °C. Ulosmenevän nesteen suurimmat poikkeamat olivat ennen muutoksia ±1,27 °C ja muutosten jälkeen ±0,19 °C. Tämä osoittaa, että antureiden oikea sijoittelu ja sekoittajan käyttö paransivat lämpötilan hallintaa ja vähensivät heiluntaa.

Lämpötiloissa tulee huomioida mittausepävarmuutta järjestelmän ja vielä kalibroimattomien lämpötila-antureiden osalta ±0,6 °C asetetusta lämpötilasta (Gebwell Oy, 2024f). Lämpöpumppujen päälle asennetut lämpötila-anturit ovat parikalibroituja ja niiden mittausepävarmuudeksi toisiinsa nähden valmistaja ilmoittaa ±0,05 °C. Mittausten toistettavuuden tarkkuudeksi valmistaja ilmoittaa ±0,1 °C mittausalueella -25°C - 125°C, jolloin pystyimme luottamaan vertausmittauksiimme samoissa lämpötiloissa. Lämpötila-antureiden mittausepävarmuuden muutos voi olla ±0,1 % vuodessa mittausalueella. (Krohne, 2024)

Yhteenvedon voidaan todeta, että tehdyt muutokset paransivat mittaustarkkuutta ja lämpötilan hallintaa, mikä mahdollistaa testien suorittamisen standardin mukaisesti. Nämä parannukset ovat olennaisia laboratorion akkreditoinnin kannalta ja tukevat Gebwell Oy:n tavoitteita energiatehokkuuden ja ympäristöystävällisyyden edistämiseksi.

Opinnäytetyöni aikana vastasin kaikista keskeisistä tehtävistä, mukaan lukien tutkimuksen suunnittelusta, mittauksista, aineiston keräämisestä ja analysoinnista sekä tulosten raportoinnista. Lisäksi huolehdin projektin aikataulutuksesta ja yhteistyöstä eri sidosryhmien kanssa. Kokeneet kollegani auttoivat minua määrittämään, mitä ja miten mitata lämpöpumpuista. Automaatiojärjestelmän ja putkiston muutoksissa sain tukea Elomatic Oy:ltä.

## 8.2 Suositukset jatkotoimenpiteiksi

Jatkotoimenpiteinä aiotaan monistaa sama putkistomuutos myös muihin mittauslinjoihin, jolloin kaikki kolme testipaikkaa saadaan yhtäaikaiseen käyttöön. Kaksi linjoista on samankokoisia 6–250 kW ja yksi isompi 20–500 kW. Tämän jälkeen testataan koko prosessin toiminta yhtäaikaaisesti ja selvitetään, tarvitaanko prosessiputkistoon vielä lisämuutoksia.

Lämpötilan hallintaa parannetaan asentamalla takaiskuventtiilit T-haaroihin (kuva 19), joissa kaksi testipaikkaa yhdistyy samalle virtausmittaristolle. Lämpökameramittauksissa havaittiin, että kuuma vesi siirtyy vaakaputkistoa pitkin toisen testipaikan suuntaan, vaikka kyseisen testipaikan käsiventtiilit olivat kiinni.



KUVA 19. T-haarassa yhdistyy testipaikoilta 2 ja 3 palaava lämpöpumpun lauhde. (Pekkalin, 2024) Kun putkistomuutokset on saatu valmiiksi, kaikki putkistot eristetään lämpöhäviöiden minimoimiseksi. Kuumissa olosuhteissa sekoitusventtiiliin säätämä lämpötila ehtii laskea jopa 0,9 °C-astetta ennen testipaikan saavuttamista. Eristämisen ja virtauksen ohjauksen jälkeen arvioidaan, kuinka paljon sekoitusventtiiliin lämpötilaa joudutaan säätämään korkeammaksi kuin asetettu olosuhde, jotta lämpöpumpun sisään tuleva neste saavuttaa halutun lämpötilan. Tämä säätö suoritetaan automaatiojärjestelmässä muuttamalla offset-arvoa, joka tarkoittaa järjestelmän perusasetuksen poikkeamaa tai korjausta.

Lisäksi paine-, virtaus- ja lämpötila-antureiden kalibrointi on tärkeä jatkotoimenpide. Kalibrointitarjouksien pyytämässä haasteena on niiden jäljitettävyyden ja se, että kalibroivan laboratorion tulee olla akkreditoitu. Mietinnässä on myös oman kalibraattorin hankkiminen, jolla pystyttäisiin kalibroimaan paine- ja lämpötilamittaukset itsenäisesti, sekä varmistamaan sisäinen laatu.

Mittausepävarmuuden laskenta on tärkeää tehdä kalibroinnin jälkeen, kun saadaan tarkka tieto anturin ja lähettimen aiheuttamasta epävarmuudesta mittauksessa. Mittausepävarmuudessa tulee huomioida myös mittasignaalin 4–20 mA virhe. Automaation laskentaa tulee tarkastella myös kaavojen virheiden varalta. Mittausten toistettavuus ja vertailu toisen laboratorion tuloksiin on myös tärkeää (Finas-Akkreditointipalvelu, 2023b).

Menetelmätapaohjeiden laatiminen on tärkeää mittausten yhdenmukaisuuden varmistamiseksi. Ohjeiden tulee olla selkeitä ja yksityiskohtaisia, kattaen kaikki mittauksen vaiheet, kalibroinnin, mitausolosuhteet, laitteiden käsittelyn ja mittausprotokollan. On tärkeää määritellä, kuinka usein laitteet kalibroidaan ja kuka on vastuussa siitä. Mittausolosuhteet, kuten lämpötila ja kosteus, tulee kuvata tarkasti. Mittaajien tulee saada riittävä koulutus ja ohjeiden tulee sisältää virheiden käsittelyohjeet. Dokumentointi on olennaista, ja kaikki mittaukset, kalibroinnit ja poikkeamat tulee kirjata tarkasti. Laadunvalvontamenettelyt, kuten säännölliset tarkastukset ja vertailumittaukset, auttavat varmistamaan mittausten jatkuvan tarkkuuden. Palaute ja parannusehdotukset mittaajilta ovat tärkeitä ohjeiden ajan tasalla pitämiseksi ja käytännöllisyyden varmistamiseksi. (SFS Suomen Standardit Ry, 2017)

### 8.2.1 Energiamittarin valinta

Energiamittarin valinnassa laboratorionkäyttöön on tärkeää varmistaa, että mittari pystyy mittaamaan vaihevirrat- ja jännitteet, tehonkertoimen, lois- ja ottotehon tarkasti ja luotettavasti. Mittarin tulee täyttää kansainväliset ja paikalliset standardit, kuten IEC 61010 ja IEC 61557 ja sen on oltava kalibroituissa akkreditoitusti. Liitettävyys automaatiojärjestelmään väylän kautta on olennainen tekijä. Mittarit tarvitaan kaikille kolmelle testipaikalle.

### 8.3 Mahdolliset jatkotutkimusaiheet

Jatkotutkimusaiheena voidaan pohtia höyrystin- ja lauhdevaraajien lämmittämistä, kun halutaan testata kuumempia LTO-olosuhteita tai valmistettavia kaukolämpösiirtimiä. On tärkeää arvioida, onko järkevämpää lämmittää kaukolämmöllä vai tiloissa olevalla sähkökattilalla. Valmius tähän on jo olemassa, mutta se vaatii vielä putkiston rakentamista.

Toinen jatkotutkimusaihe voisi olla laboratorion hukkalämmön hyödyntäminen lämpöpumpputuotantohallia lämmittämässä. Tähän on jo valmius, mutta olisi tärkeää laskea onko siitä oikeasti hyötyä ja mikä on laboratorion hukkalämmön määrä. Tämä tutkimus voisi sisältää laboratorion käyttöasteen tarkastelun, jolla selvitämme laboratorion hukkalämmön määrän useamman kuukauden tarkastelujaksolla. Tämän jälkeen voimme verrata hukkalämmön määrää tuotantohallin lämmöntarpeeseen ja analysoida toteutus kustannuksia saatuun hyötyyn nähden. Tämä voisi parantaa energiatehokkuuttamme ja vähentää lämmityskustannuksia.

## LÄHTEET

- Aplisens, 2023. *USER'S MANUAL*. [Online]  
Available at: <https://aplisens.com/pdf/produktty/EN.IO.PCE.PRE.28.SMART.Revision.01.A.003.pdf>  
[Haettu 3 11. 2024].
- Comac Cal, 2018. *INDUSTRIAL FLOW METER - FLOW-38*. [Online]  
Available at: <https://www.comacal.com/wp-content/uploads/2019/02/INDUSTRIAL-FLOW-METER-FLOW-38.pdf>  
[Haettu 3 11. 2024].
- Energytech Finland Oy, 2024. *Mistä lämpöpumpun lämpö tulee?*. [Online]  
Available at: <https://www.energytech.fi/mista-lampopumpun-lampo-tulee>  
[Haettu 15 10. 2024].
- Finas-Akkreditointipalvelu, 2023a. *Mittausepävarmuus*. [Online]  
Available at: <https://www.finas.fi/akkreditointi/jaljitettavyys/Sivut/Mittausepavarmuus.aspx>  
[Haettu 25 10. 2024].
- Finas-Akkreditointipalvelu, 2023b. *Akkreditointi*. [Online]  
Available at: <https://www.finas.fi/akkreditointi/Sivut/default.aspx>  
[Haettu 27 10. 2024].
- Fluke, 2024. *Understanding and fixing infrared thermography issues on reflective surfaces*. [Online]  
Available at: <https://www.fluke.com/en-us/learn/blog/thermal-imaging/fixing-thermography-reflectivity>  
[Haettu 1 11. 2024].
- Gebwell Oy, 2024a. *Yrityksestä*. [Online]  
Available at: <https://gebwell.fi/meista/>  
[Haettu 13 10. 2024].
- Gebwell Oy, 2024b. *Maalämpö*. [Online]  
Available at: <https://gebwell.fi/maalampo/>  
[Haettu 14 11. 2024].
- Gebwell Oy, 2024c. *Miten maalämpö toimii?*. [Online]  
Available at: <https://gebwell.fi/maalampo/miten-maalampo-toimii/>  
[Haettu 20 10. 2024].
- Gebwell Oy, 2024d. *SCOP vai COP? Ota tehojen vertailun keskeiset termit haltuun!*. [Online]  
Available at: <https://gebwell.fi/ajankohtaista/scop-vai-cop-ota-tehojen-vertailun-keskeiset-termit-haltuun/>  
[Haettu 22 10. 2024].
- Gebwell Oy, 2024e. *F-kaasuasetus ohjaa luonnollisten kylmäaineiden käyttöön*. [Online]  
Available at: <https://gebwell.fi/ajankohtaista/f-kaasuasetus-ohjaa-luonnollisten-kylmaaineiden-kayttoon/>  
[Haettu 6 11. 2024].
- Gebwell Oy, 2024f. *Laboratorion sisäinen toimintakuvaus*, Leppävirta: Gebwell Oy.
- Gebwell Oy, 2024g. *Laboratorion tiedonkeruun tietokanta*. Leppävirta: s.n.
- Krohne, 2024. *OPTITEMP TRA-S12*. [Online]  
Available at: <https://ge.krohne.com/en/products/temperature-measurement/temperature-assemblies/resistance-rtd-temperature-assemblies/optitemp-tra-s12>  
[Haettu 3 11. 2024].
- Kämäräinen, N., 2023. *Energiatekniikan diplomityö*. [Online]  
Available at:

- [https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/166043/Diplomityo\\_Kamarainen\\_Niko.pdf?sequence=1](https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/166043/Diplomityo_Kamarainen_Niko.pdf?sequence=1)  
[Haettu 15 10. 2024].
- Kärhä, P., 2004. *Luento 7: Mittausjärjestelmän kalibrointi ja mittausepävarmuus*, s.l.: Aalto yliopisto.
- Motiva Oy, 2024. *Lämpöpumpputeknologiat*. [Online]  
Available at: [https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva\\_energia/lampopumput/lampopumpputeknologiat](https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/lampopumput/lampopumpputeknologiat)  
[Haettu 13 10. 2024].
- Pekkalin, A.-V., 2024. *Tuotekehityskeskus*. [Kuvat] (Gebwell Oy).
- Puustinen, E., 2019. *Emissiivisyys*. [Online]  
Available at: <https://laari.info/wp-content/uploads/2022/09/emissiivisyys.pdf>  
[Haettu 14 11. 2024].
- Salhydro, 2024. *Suosittelut virtausnopeudet*. [Online]  
Available at: <https://www.salhydro.fi/fi/virtausnopeus>  
[Haettu 15 11. 2024].
- SFS Suomen Standardit Ry, 2017. *SFS-EN ISO/IEC 17025:2017 Testaus- ja kalibrointilaboratorioiden pätevyys. Yleiset vaatimukset*. [Online]  
Available at: <https://sales.sfs.fi/fi/index/tuoteuutiset/sfs-enisoiec17025testaus-jakalibrointilaboratorioidenpatevyysvaatimukset.html.stx>  
[Haettu 16 11. 2024].
- SFS Suomen Standardit ry, 2022a. *SFS-EN 14511*. [Online]  
Available at: <https://sales.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFS/CEN/ID2/1/1156592.html.stx>  
[Haettu 13 10. 2024].
- SFS Suomen Standardit ry, 2022b. *SFS-EN 14825:2022:en*. [Online]  
Available at: <https://sales.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFS/CEN/ID2/1/1134896.html.stx>  
[Haettu 22 10. 2024].
- Sähköturvallisuuden edistämiskeskus, 2024. *Loisteho, mitä se on?*. [Online]  
Available at: [https://www.sahkoturva.info/sahkon\\_kaytto\\_kotona/sahkoa\\_monessa\\_muodossa/fi/fi/loisteho\\_mita\\_se\\_on/](https://www.sahkoturva.info/sahkon_kaytto_kotona/sahkoa_monessa_muodossa/fi/fi/loisteho_mita_se_on/)  
[Haettu 23 11. 2024].
- Teledyne Flir, 2022. *Flir Cx5*. [Online]  
Available at: [file:///C:/Users/avpek/Downloads/Cx5%20Datashet\\_LTR.pdf](file:///C:/Users/avpek/Downloads/Cx5%20Datashet_LTR.pdf)  
[Haettu 15 11. 2024].
- U.S. Geological Survey, 2018. *Water density*. [Online]  
Available at: <https://www.usgs.gov/special-topics/water-science-school/science/water-density>  
[Haettu 4 11. 2024].

LIITE 1: LABORATORION TOIMINTAKUVAUS (SALATTU)



59818-TE-0500-3 Toimintakuvaus\_Elomatic.pdf

## LIITE 2: LABORATORION PI-KAAVIO (SALATTU)



59818-PI-1001, 28.11.2023.pdf