

Opinnäytetyö (AMK)

Energia- ja ympäristötekniikka

NYMTES13

2017

Antti Mattila

MONITOIMILÄMPÖPUMPPU JÄTEVEDEN LÄMMÖNTALTEENOTTO- JÄRJESTELMÄSSÄ

– Kannattavuuden todentaminen ja optimointi

OPINNÄYTETYÖ (AMK) | TIIVISTELMÄ

TURUN AMMATTIKORKEAKOULU

Energia- ja ympäristötekniikka

2017 | 56 + 2

Ohjaajat: Juha-Pekka Paavola, Paavo Paju

Antti Mattila

MONITOIMILÄMPÖPUMPPU JÄTEVEDEN LÄMMÖNTALTEENOTTOJÄRJESTELMÄSSÄ: KANATTAVUUDEN TODENTAMINEN JA OPTIMOINTI

Tämän insinööri työn tarkoitus oli tutkia ja kehittää Finess Energyn toteuttaman teollisuuspesulan jäteveden lämmöntalteenottojärjestelmän osana olevan monitoimilämpöpumpun toimintaa ja kannattavuutta. Tutkimusongelman selvittämiseksi yritykselle hankittiin kannettava mittauslaitteisto, joka soveltuu myös jätevesien lämpövirtojen mittaamiseen. Lämpöpumpun teknis-taloudellista toimintaa kuvataan COP-arvolla. Kyseinen lämpöpumppuinvestointi toteutettiin ESCO-palvelun avulla, joten COP-luvun suuruudella on suora vaikutus Finess Energyn liikevaihtoon.

Tutkimusta varten Finess Energylle vuokrattiin lämpövirtojen mittaamiseen soveltuva kannettava clamp on -antureilla varustettu Fluxus F601E. Jatkotutkimuksia varten hankittiin lämpötiladatalogger-mittauslaitteet. Tutkimus suoritettiin kahtena erillisenä ajankohtana vuoden 2016 aikana.

Mittauslaite mittasi monitoimilämpöpumpun tuottaman lämpöenergian määrän sekä hetkellisten lämpövirtojen suuruuden. Mittausjaksojen aikana kerättiin myös lämpöpumpun sähkönkulutuslukemat COP-arvon laskemista varten.

Tämän työn aikana suoritettujen mittausten perusteella monitoimilämpöpumpun ei voida varmasti olettaa toimivan valmistajan ilmoittamalla COP-arvolla. Luotettavan COP-arvon selvittämiseksi, järjestelmää tulee mitata pidemmän ajanjakson ajan. Lämpöenergia- ja sähkömittarit on hyvä varustaa dataloggereille, jotta monitoimilämpöpumpun toimintaa on helpompi arvioida ja seurata.

Kannettava clamp on -mittauslaitteisto soveltuu hyvin varsinkin alle 1 % kiintoainetta sisältävien jätevesijärjestelmien mitoittamiseen ja toiminnan todentamiseen. Mittalaitteistoa valittaessa tulee ensisijaisesti huomioida laitteiston helppokäyttöisyys sekä korkeat hankintakustannukset. Mittausepävarmuuden pienentämiseksi tulee suosia laitetta, jolla voidaan mitata sekä virtaus- että lämpömäärä. Varsinkin pienissä yrityksissä clamp on -virtaus ja lämpövirtamittarien korkea hinta saattaa estää mittauslaitteiston hankinnan.

ASIASANAT:

ESCO-palvelu, Clamp on -mittaus, Hukkalämpö, Lämmöntalteenotto, lämpöpumppu, Lämmönsiirrin, Jäteveden lämmöntalteenotto

BACHELOR'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Energy- and environmental engineering

2017 | 56 + 2

Instructors Juha-Pekka Paavola, Paavo Paju

Antti Mattila

MULTIFUNCTIONAL HEAT PUMP AS A PART OF WASTEWATER HEAT RECOVERY SYSTEM: OPTIMIZING COST-EFFECTIVE OPERATION

The purpose of the Bachelor's thesis was to study and optimize cost-effective operation of a multifunctional heat pump, which is a part of a wastewater heat recovery system, supplied by Finess Energy to an industrial laundry facility. To determine the research problem a portable thermal energy meter suitable for wastewater systems was purchased. The technical and economical operation of the heat pump is represented by COP value. The heat pump investment was carried out by ESCO service, which means that the heat pump COP value affects directly the company turnover.

For this measurement Finess Energy rented a Fluxus F601E thermal energy meter. For further studies the company purchased temperature-measuring data loggers.

The study was carried out in two separate periods during the year 2016. On both occasions the system was measured approximately for three days. During these measurements electrical power consumed by the heat pumps was collected and used to calculate the COP value of the heat pump.

Based on the results of the study it is difficult to estimate the COP value and economical operation of a multifunctional heat pump. The heat pump should be under monitoring and evaluation for a longer period of time in order to verify the optimal performance of the heat pump. Also, the thermal energy meter and electricity meter should be equipped with a data logger; this would facilitate the follow-up study on the heat pump operation.

The study proved, though that the portable clamp-on measuring equipment is suitable for measuring wastewater systems which contain less than 1 % of solid matter. High costs of investment and a user-friendly system should be top priority when choosing the equipment. One system which measures, both volume flow and heat flow rate, makes the measurement more user-friendly and it reduces the inaccuracy of measurement. Especially for small companies one of the greatest barriers of purchase is the high price of the clamp-on measuring equipment.

KEYWORDS:

ESCO service, Clamp-on energy meter, Heat pump, Heat exchanger, Waste heat recovery, Wastewater heat recovery

SISÄLTÖ

KÄYTETYT LYHENTEET TAI SANASTO	7
1 JOHDANTO	8
1.1 Tausta	8
1.2 Tavoite	9
2 FINESS ENERGY OY	10
2.1 ESCO-palvelu	10
3 LÄMMÖNTALTEENOTTO	13
3.1 Jäteveden lämmöntalteenotto	13
3.2 Sovelluskohteet	14
3.2.1 Lämmöntalteenotto rakennuksen sisältä	15
3.2.2 Lämmöntalteenotto viemäriverkosta	16
3.2.3 Lämmöntalteenotto jätevedenpuhdistamolla	17
3.3 Rakennusmääräykset Suomessa	17
4 LÄMMÖNTALTEENOTTOTEKNIIKAT	19
4.1 Lämmönsiirtimet	20
4.1.1 Rekuperatiiviset lämmönsiirtimet	21
4.2 Lämpöpumput	24
4.2.1 Toimintaperiaate	25
4.2.2 Log p, h-tilapiirros	26
4.2.3 Kylmäaineet	28
5 MITTAUSLAITTEISTON HANKINTA JA LÄMPÖVIRRRAN MITTAUSPERIAATE	30
5.1 Lämpövirran mittaaminen	32
5.1.1 Virtausmittaus	33
5.1.2 Ultraäänimittaus	34
5.1.3 Seinämäpaksuuden mittaus	35
5.1.4 Lämpötilanmittaus	36
5.2 Dataloggerit	38
6 TUTKIMUSKOHTEIDEN KENTTÄMITTAUKSET	40
6.1 Tutkimuskohteet	40

6.2 Mittausvalmistelut	41
6.3 Tutkimuskohteen 1. kenttämittaukset	42
6.4 Tutkimuskohteen 2. kenttämittaukset	44
6.4.1 Tutkimuskohteen 2. jatkomittaukset	47
7 MITTAUSTULOKSET	49
7.1 Mittausten virhetarkastelu	49
8 PÄÄTELMÄT	51
9 POHDINTAA	53
LÄHTEET	54

LIITTEET

Liite 1. Mittauslaitteiston vertailu.

Liite 2. Lämmön talteenotto-laite- ja järjestelmätoimittajat

KAAVAT

Kaava 1. Lämpöpumpun lämpökertoimen laskeminen (Hakala & Kaappola 2007, 224).

26

Kaava 2. Lämpövirran määrittäminen (Tekniikan taulukkokirja 2012, 241, muokattu). 33

KUVAT

Kuva 1. ESCO-sopimus (Koski & Lappalainen 2005). 10

Kuva 2. ESCO-hankkeen vaiheet (Koski & Lappalainen 2005). 11

Kuva 3. Jäteveden lämmön talteenoton hyödyntämismahdollisuudet. 15

Kuva 4. Esimerkki toteutuksesta, joilla voidaan taata, etteivät terveydelle vaaralliset aineet pääse vesilaitteistoon. 18

Kuva 5. Ylijäämälämmön hyödyntäminen lämpötilatasojen mukaan (Heikkilä & Kiuru 2014, 13). 19

Kuva 6. Lämmönsiirtimien virtaustyytit. 21

Kuva 7. Levylämmönsiirtimen toimintaperiaate. (Separation Equipment 2016). 22

Kuva 8. Erimallisia levy- ja putkilämmönsiirtimiä (Fercher 2016; Huber Technology 2016; Thermac Engineering 2016). 23

Kuva 9. Putkilämmönsiirtimen periaate. (Dairy and Food Engineering 2013). 23

Kuva 10. Lämpöpumpun pääkomponentit (Industrial Heat Pumps 2016, muokattu). 25

Kuva 11. Log p, h-tilapiirros ja teoreettinen kylmäprosessi (Hakala & Kaappola 2007, 12).	27
Kuva 12. Flexim Fluxus F601E-mittauslaite (Flexim 2015, 11).	32
Kuva 13. Virtausprofiilit (Blue-White Industries 2015. muokattu).	34
Kuva 14. Kulkeaika- ja Doppler-virtausmittauksen periaatteet (Greyline 2015).	34
Kuva 15. Vastuslämpöanturi.	36
Kuva 16. Termoparianturin osat	37
Kuva 17. Kuvassa vasemmalla Delta Ohm -lähetin ja lämpötiladataloggeri, oikealla Pietikon termoparianturi.	38
Kuva 18. Virtausanturin kaksi lähetintä asennettuna paikalleen.	41
Kuva 19. Tutkimuskohteen 1. mittausjärjestelyt.	42
Kuva 20. Tutkimuskohteen 1. mittausten PI-kaavio.	43
Kuva 21. Monitoimilämpöpumppu.	45
Kuva 22. Monitoimilämpöpumpun toimintatilat	45
Kuva 23. Tutkimuskohteen 2. mittausjärjestelyt.	46
Kuva 24. Tutkimuskohteen 2. mittausten PI-kaavio.	47
Kuva 25. Monitoimilämpöpumpun ohjauspaneeli.	48

TAULUKOT

Taulukko 1. Kylmäaineiden ominaisuuksia (Hakala & Kaappola 2007, 24, Hundy 2008, 32).	28
Taulukko 2. Fluxus-lämpötila-antureiden tekniset tiedot(Flexim 2015, 23).	37
Taulukko 3. LCP 164PL -lämpöpumpun tekniset tiedot.	44

KÄYTETYT LYHENTEET TAI SANASTO

Ω	Resistanssi
a	Vuosi
°C	Celsius aste, lämpötilan yksikkö
Clamp on	Putken pintaan kiinnitettävä anturi
CO ₂	Hiididioksidi
COP	Lämpökerroin (Coefficient of Performance)
GWP	Global Warming Potential
IV	Ilmanvaihto
kW	Kilowatti, tehon yksikkö
kWh	Kilowattitunti, energianyksikkö
Log	Logaritmi
LP	Lämpöpumppu
LTO	Lämmöntalteenotto
MW	Megawatti, tehon yksikkö
ODP	Ozon Depletion Potential
ORC	Organic Rankine cycle
RESCA	Renewable Energy Solutions in City Areas
TEG	Thermo Electric Generator
TS	Total solids
TWh	Terawattitunti, energian yksikkö
YK	Yhdistyneet kansakunnat

1 JOHDANTO

1.1 Tausta

Maapallolla käytetään runsaasti vettä niin teollisuuden prosesseissa kuin yksityisten ihmisten arjessa. Samalla tämän veden mukana kulkee paljon hyödyntämätöntä, käyttökelpoista energiaa, maaperään, meriin ja vesistöihin. Jotta tämä energia ei mene hukkaan, tulee se ottaa talteen ja hyödyntää energiankulutuksen pienentämiseksi.

Tekesin tutkimuksen mukaan lämmöntalteenotto jätevedestä on varsin yksinkertaista ja siihen tarvittava tekniikkakin on ollut käytössä jo pitkään. Esimerkiksi Euroopassa ensimmäiset tähän tarkoitukseen tehdyt sovellukset ovat jo yli 20 vuotta vanhoja. Tästä huolimatta vasta viime aikoina kyseiset sovellukset ovat saaneet osakseen laajempaa kiinnostusta ja uusia käyttökohteita on alettu tuoda esille. (Tekes 2013, 1.) Yksi tärkeimmistä tekijöistä lämmön talteenoton lisääntymisessä on ollut energian hinnan nousu pitkällä aikavälillä. Rahallisen säästön lisäksi kiinnostusta hukkalämmön hyödyntämiseen ovat myös lisänneet halu laskea CO₂-päästöjä ja vähentää fossiilisten polttoaineiden käyttöä.

Jäteveden mukana poistuva lämpöenergia on yksi suurimmista kiinteistöjen hukkaenergian lähteistä. Esimerkiksi tyypillinen suomalainen elementtikerrostalo hukkaa lämpöä viemäriin 21–24 %, vastaavasti ikkunoista lämpöenergiaa vuotaa 15–25 % ja ulkoseinistä 17–21 % (Tekes 2013, 1). Kiinteistöjen lisäksi jätevettä syntyy paljon myös muun muassa teollisuudessa, sairaaloissa, kylpylöissä ja pesuloissa. Näissä kohteissa jäteveden määrä ja tämän sisältämä lämpöenergia vaihtelee paljon.

Monien tutkimusten mukaan jäteveden lämpöä hyödyntämällä pystytään säästämään huomattavia määriä energiaa. Esimerkiksi Ruotsissa on tehty arviota, joiden mukaan vuodessa voidaan säästää 0,27 TWh energiaa, jos kiinteistöistä lähtevän jäteveden lämpötilaa alennettaisiin yhdellä asteella koko Ruotsin väestön osalta. Vastaavasti Saksassa verkostoon päätyvän jäteveden teoreettisen lämpöpotentiaaloin on laskettu olevan noin 11 TWh vuodessa. Tämän lämmön hyötykäytöllä voidaan vähentää asuinkiinteistöjen öljylämmitystarvetta 6 %. (Tekes 2013, 1.)

Erilaiset ohjauskeinot ja säännökset vaikuttavat ja tulevat vaikuttamaan yleisesti lämmön talteenoton lisääntymiseen. Tästä esimerkkeinä ovat YK:n ilmastotavoitteet ja Euroopan

Unionin 2020-tavoitteet. Euroopan unionin 2020 yleistavoitteiden avulla pyritään parantamaan energiatehokkuutta 20 %:lla sekä lisäämään uusiutuvan energian käyttöä 20 % (Euroopan komissio 2015). YK:n Ilmastotavoitteiden avulla pyritään hillitsemään CO₂-päästöjen lisääntymistä. Tähän päästään esimerkiksi lisäämällä uusiutuvien energioiden käyttöä sekä parantamalla energiatehokkuutta. Näissä jätevesien lämmön talteenotolla on tärkeää.

Teknisesti jäteveden sisältämän lämpöenergian hyödyntämiseksi voidaan käyttää joko pelkää lämmönsiirintä tai lämmönsiirintä ja lämpöpumppua. Pelkän lämmönsiirtimen avulla voidaan muun muassa esilämmittää prosessia tai raakavettä. Kun lämmönsiirtimen lisäksi hankitaan lämpöpumppu, voidaan lämmöntalteenottoa tehostaa ja tuottaa esimerkiksi kuumaa vettä aina 95 °C:seen asti.

Lainsäädännön avulla jäteveden lämmön talteenotosta on pyritty tekemään turvallista. Tähän on päästy luomalla ohjeet muun muassa jäteveden ja käyttöveden sekoittumisen estämiseksi.

1.2 Tavoite

Tämän Työn tavoitteena oli tutkia ja kehittää Finess Energyn toteuttamaa teollisuuspesulan jäteveden lämmöntalteenottojärjestelmän osana olevan monitoimilämpöpumpun toimintaa ja kannattavuutta. Tutkimusongelman selvittämiseksi Finess Energylle hankittiin kannettava mittauslaitteisto, joka soveltuu myös jätevesien lämpövirtojen mittaamiseen. Mittausten avulla laskettiin lämpöpumpun hyötysuhdetta kuvaava lämpökerroin (COP). Kyseinen lämpöpumppuinvestointi on toteutettu Finess Energyn ESCO-palvelun avulla, minkä vuoksi COP-luvun suuruudella on suora vaikutus siihen, kuinka nopeasti asiakas maksaa investoinnin takaisin Finess Energylle.

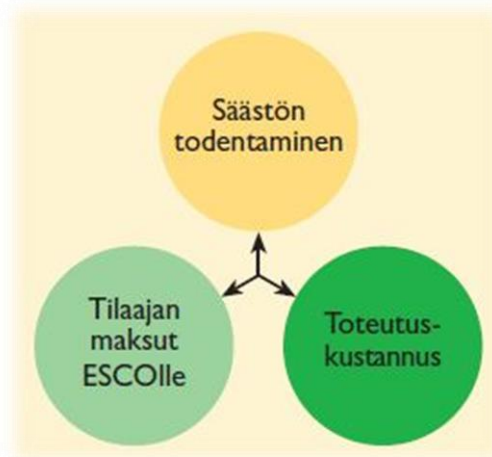
Mittauksia suoritettiin myös toisessa teollisuuspesulassa, jossa on Finess Energyn toimittama jäteveden lämmöntalteenottojärjestelmä. Näiden mittausten avulla oli tarkoitus tutustua mittauslaitteistoon sekä soveltaa mittauslaitteiston käyttöä jäteveden LTO-järjestelmän optimipisteen selvittämiseen. Työn jälkeen mittauslaitteistoa on tarkoitus käyttää Finess Energyn tulevien hankkeiden mitoittamisessa ja vanhojen järjestelmien toiminnan todentamisessa. Yksi työn tavoitteista oli myös esitellä jäteveden lämmöntalteenottoa sekä siihen liittyvää tekniikkaa ja lainsäädäntöä.

2 FINESS ENERGY OY

Finess Energy Oy on vuonna 2011 perustettu turkulainen energia-alan energiansäästö-
ratkaisuja tarjoava yritys. Yritys on erikoistunut energiatehokkuuspalveluihin, teollisuu-
den lämpöpumppuihin ja energiantuotantoratkaisuihin. Yrityksessä työskentelee tällä
hetkellä neljä työntekijää.

2.1 ESCO-palvelu

Nimi ESCO tulee sanoista Energy Service Company. Siinä erillinen energia-alan asian-
tuntijayritys toteuttaa asiakasyritykseen energiansäästöhanke (kuva 1.). ESCO-yritys
saattaa olla esimerkiksi energia- tai materiaalitehokkuuden kehittämiseen erikoistunut
yritys, laitetoimittaja tai energiayhtiö. Hanke voidaan toteuttaa esimerkiksi energiakatsel-
muksen jatkeena, jolloin asiakas voi valita yhteistyökumppanin suunnittelemaan hank-
keen toteutuksen. Energiansäästötoteutus on myös mahdollista kilpailuttaa, tällöin
hanke määritellään tarjouspyyntöjen perusteella. Tässä tapauksessa tärkeitä huomioon
otettavia seikkoja ovat kohteen tiedot, toteutuksen rajaukset, säästötavoitteet ja tarjous-
ten vertailuperusteet. (Koski & Lappalainen 2005, 2.)

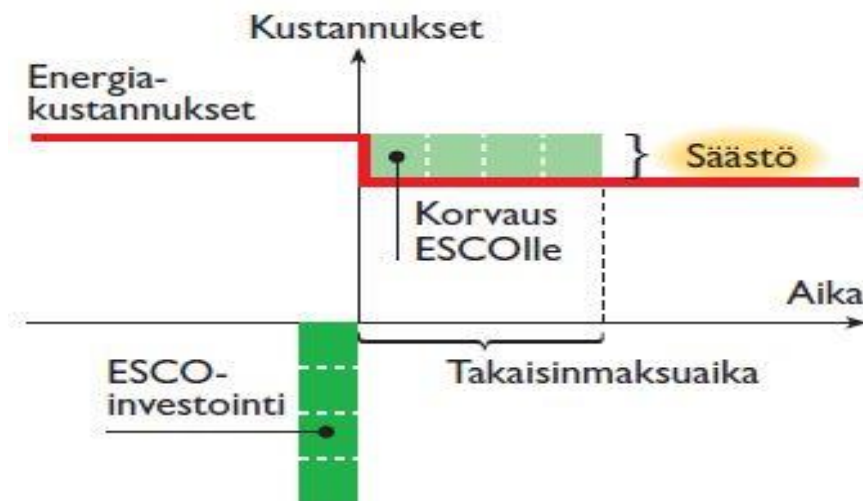


Kuva 1. ESCO-sopimus (Koski & Lappalainen 2005).

Sopimus on ESCO-hankkeen ensimmäinen askel. Siinä ESCO-yritys sitoutuu vastaa-
maan hankkeen toteutuksesta ja asiakas sitoutuu kustantamaan hankkeen energiaku-

luissa saatavilla säästöillä. ESCO-sopimus sisältää ainakin tiedon sopimuskauden pituudesta, säästöjen todentamismenetelmistä ja takaisinmaksuun vaikuttavista muutostekijöistä. Sopimuskauden pituus riippuu hankkeesta. Yleensä se on kuitenkin useampia vuosia. Seuraavaksi seuraa toteutusvaihe, jolloin hanke suunnitellaan, asennetaan, otetaan käyttöön, toteutetaan koulutukset ja todennetaan säästö sopimuksessa sovitulla tavalla. Hankkeen aikana ESCO-yrityksellä on kokonaisvastuu rahoituksesta ja toteutuksesta. ESCO-yritys voi kuitenkin teettää esimerkiksi suunnittelu- tai urakointitehtäviä ulkopuolisilla. Hankkeen valmistuttua syntyneitä säästöjä seurataan ja toteutuksen toimivuus varmennetaan. (Koski & Lappalainen 2005, 2.)

ESCO-hankkeen päämäärä on energiakustannusten pienentäminen sekä tästä syntyvät taloudelliset säästöt, joiden avulla maksetaan ESCO-palvelu ja energiansäästöinvestointi. Säästöinvestointia varten on myös mahdollista saada esimerkiksi investointitukea, jonka avulla tavallisesti voidaan lyhentää takaisinmaksuaikaa. Kun investointi on kokonaan maksettu, siirtyy omistajaoikeus yleensä asiakkaalle. (Koski & Lappalainen 2005, 2.) Kuvan 2. mukaisesti hanke alkaa ESCO-investoinnilla, jonka toteuduttua asiakasyrityksen energiakustannukset pienenevät. Energiakustannuksissa syntyneiden säästöjen perusteella ESCO-investointi maksetaan takaisin ESCO-yritykselle.



Kuva 2. ESCO-hankkeen vaiheet (Koski & Lappalainen 2005).

Finess Energy näkee ESCO-palvelun tuotteena, joka mahdollistaa energiasäästöhanke toteutumisen nopealla aikataululla varsinkin tilanteissa, joissa asiakkaalla ei ole omaa rahaa investointiin tai kyseisen vuoden investointirahat on jo käytetty. Palvelulla

voidaan myös vakuuttaa asiakas Finess Energyn ratkaisusta, jotka saavat olla uusia ja innovatiivisia.

ESCO-konseptilla toteutetut hankkeet ovat monesti suuria kokonaisuuksia kuten esimerkiksi kaupungin kaikkien hallinnoimien kiinteistöjen energiatehokkuuden kehittäminen. Finess Energy pyrkii hyödyntämään ESCO-palvelua pienempien energiansäästökoh-teissa kuten esimerkiksi yksittäisen lämmönsiirtimen tai lämpöpumpun hankinnassa. Tä-män lisäksi yritys toteuttaa myös isompia hankkeita ESCO-palveluna.

3 LÄMMÖNTALTEENOTTO

Termodynamiikan toisen lain mukaan lämpöenergia siirtyy aina korkeammasta lämpötilasta matalampaan. Laki on lämmön talteenoton perusta, jonka pohjalta suunnitellaan ja asennetaan laitteisto taloudellisesti kannattaviin kohteisiin. Hyödyntämällä sekä hukka- että ylijäämälämpöjä voidaan saada aikaan huomattavia energiasäästöjä. Prosesseissa ja systeemeissä syntyy yleensä kahdenlaisia lämpövirtoja. Huonosti eristetyt lämpökatilat tai käytössä lämpiävät mekaaniset laitteet synnyttävät lämpöhäviötä. Sen sijaan esimerkiksi kuumat palamiskaasut, poistoilmavirrat ja viemärissä virtaavat kuumat tai kylmät vedet sisältävät lämpövirtoja, jotka voidaan ottaa talteen. (Heikkilä ym. 2008, 52.)

Käytännössä jokainen hukka- tai ylijäämälämpökohde tarkastellaan yksilöllisesti. Hyödyntämismahdollisuudet riippuvatkin useista tekijöistä, joita ovat muun muassa lämpötilataso, lämpötehon (entalpiavirta) suuruus, väliaineen kemialliset ominaisuudet, väliaineen puhtaus, väliaine ja faasi (esim. neste, ilma, kaasu ja höyry). Lämmön hyödyntäminen voi muuttua kannattamattomaksi tai mahdottomaksi, mikäli jokin edellä mainituista tekijöistä on riittävän epäsuotuisa. (Heikkilä & Kiuru 2014, 10.)

Energiateollisuus ry:n ja työ- ja elinkeinoministeriön vuonna 2010 teettämän Teollisuuden ylijäämälämmön hyödyntäminen kaukolämmössä-selvityksen mukaan teknisesti ylijäämälämpöä voidaan hyödyntää 11,1 TWh/a (alle 55 °C) ja 7,8 TWh/a (yli 55 °C). Karkean arvion mukaan kaukolämpöverkoissa pystytään käytännössä hyödyntämään vain noin 4-5 TWh/a ylijäämälämpöä. (YIT Teollisuus- ja verkkopalvelut Oy 2010, 46, 57.) Hyödyntämistä tarkastellessa teollisuuskohteissa edetään yleensä seuraavasti: 1. hyödyntämismahdollisuudet sisäisesti sekundäärienergiana, 2. hyödyntämismahdollisuudet ulospäin eli myydään lämpöä tai 3. muutetaan lämpö sähköenergiaksi. (Heikkilä & Kiuru 2014, 11.) Tässä opinnäytetyössä keskitytään jätevesissä kulkeviin lämpövirtoihin ja niiden sisältämän lämmön talteen ottamiseen ja hyödyntämismahdollisuuksiin.

3.1 Jäteveden lämmöntalteenotto

Ympäristönsuojelulaki määrittelee jäteveden seuraavasti: *”jätevedellä sellaista käytöstä poistettua vettä, pilaantuneelta alueelta johdettavaa vettä tai ympäristön pilaantumisen vaaraa aiheuttavaan toimintaan käytetyltä alueelta johdettavaa vettä, josta voi aiheutua ympäristön pilaantumista;”*. (527/2014, 5§.) Jätevesi jaotellaan harmaaseen ja mustaan

jäteveeten. Harmaa jätevesi sisältää esimerkiksi keittiössä, suihkussa, pesu- ja tiskikoneessa syntyvää jätevettä, kun taas musta jätevesi sisältää käymäläjätettä (virtsa, uloste tai suotoneste). (Rakennustieto 2014.)

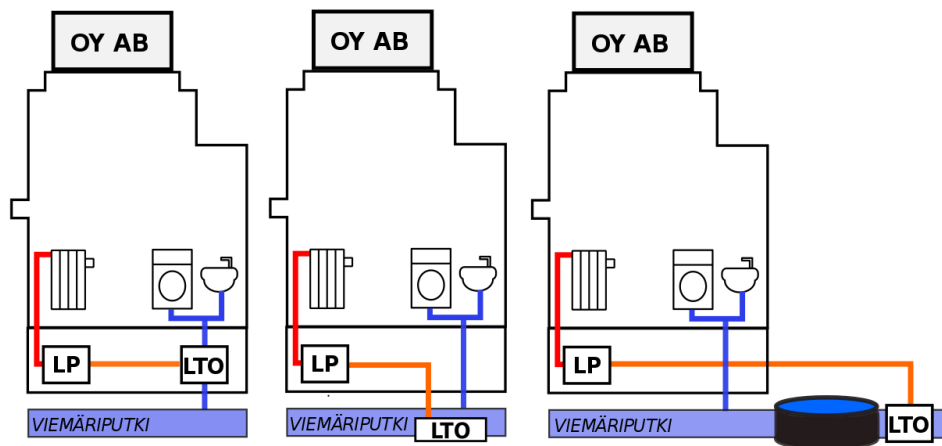
Jäteveden sisältämän lämmön potentiaali huomattiin ensimmäisen kerran 1970-luvulla tapahtuneiden öljykriisien jälkeen. Öljyn korkea hinta ohjasi tutkimusta vaihtoehtoisten energialähteiden suuntaan. Jäteveden lämmön talteen ottamiseksi tehtiin tänä aikana muutamia pilottihankkeita. Tämän jälkeen 1990-luvulla Suomessa toteutettiin muutamia jäteveden LTO-ratkaisuja, ja esimerkiksi uimahalleissa vettä esilämmitettiin suihkuvesien lämmön avulla. Lisäksi Lapuan ja Kiteen vedenpuhdistamoilla laitoksien omat lämpöpumput hyödynsivät puhdistusprosessin lämpöä. (Salminen 2011, 18.)

Euroopassa jäteveden lämpöä on hyödynnetty 1980-luvulta lähtien. Tällöin Ruotsissa ja Norjassa toiminta lähti liikkeelle laajalla skaalalla. Keski-Eurooppa seurasi perässä; varsinkin Saksa ja Sveitsi ovat pyrkineet työskentelemään järjestelmällisesti, jotta jäteveden lämmön hyötykäyttö saataisiin merkittävään rooliin primäärienergian korvaajana. (Salminen 2011, 18.)

Jätevesien lämpötila vaihtelee tyypillisesti 5–80 °C:seen riippuen siitä, mistä jätevesi on peräisin. Vesihuoltolaitoksen yleisten toimitusehtojen mukaan asiakas ei kuitenkaan saa johtaa viemäriin suurta vesimäärää tai suurta määrää vettä, jonka lämpötila on yli 40 °C (Vesi- ja viemärlaitosyhdistys 2001, 20). Asuinkiinteistöjen jäteveden lämpötila on keskimäärin 20–30 °C, kun se lähtee viemäriverkkoon (Tekes 2013, 7). Vastaavasti viemäriverkossa kulkevan jäteveden lämpötila vaihtelee suuresti vuorokauden- ja vuodenaikasta sekä paikkakunnasta riippuen. Teollisuudessa syntyvien jätevesien lämpötilat vaihtelevat tapauskohtaisesti, esimerkiksi pesuloissa lämpötilat ovat 40–70 °C ja elintarviketeollisuudessa 30–80 °C.

3.2 Sovelluskohteet

Lämmön talteenoton näkökulmasta mielenkiintoisimpia ovat ne kohteet, joissa jätevettä syntyy suhteellisen paljon melko tasaisena virtauksena. Hyviä esimerkkejä tämän kaltaisista kohteista ovat sairaalat, uimahallit, teollisuuskiinteistöt, pääviemärit sekä jätevedenpuhdistamot. Jäteveden lämmön talteenoton sovelluskohteet voidaan jakaa kolmeen eri periaatteeseen. Lämmöntalteenotto voi tapahtua kuvan 3. mukaisesti joko rakennuksen sisätiloissa, viemäriverkossa tai puhdistetusta jätevedestä. (Tekes 2013, 6.)



Kuva 3. Jäteveden lämmön talteenoton hyödyntämismahdollisuudet.

3.2.1 Lämmöntalteenotto rakennuksen sisältä

Rakennuksen sisätiloissa jäteveden lämmöntalteenotto tapahtuu hyvin lähellä hukkalämmön syntyistä. Useimmiten saatu lämpö hyödynnetään kyseisen rakennuksen tai käyttöveden lämmittämiseen. Mikäli harmaa-vesi kerätään erikseen, voidaan sitä käyttää uudelleen esimerkiksi kasvien kasteluun tai vessan huuhteluun. Pienissä kiinteistöissä ja asuinrakennuksissa hyödynnetään useimmiten ainoastaan harmaanveden sisältämä lämpöenergia, jolloin yleisimpiä ovat vain suihkuveden lämpöenergiaa hyödyntävät laitteet. Laitteistoina käytetään erilaisia suihkun läheisyyteen asennettavia lämmönsiirtimiä, jotka esilämmittävät suihkuun tulevan veden tai lämminvesivaraajalle menevän veden. Kyseisillä järjestelmillä säästetään noin 40–60 % veden lämmityskustannuksissa. (Tekes 2013, 8.) Työssäni ei paneuduta tämän tarkemmin pieniin kiinteistöihin asennettaviin laitteisiin.

Markkinoilla on useita yrityksiä, jotka valmistavat ja suunnittelevat teollisen mittakaavan jäteveden lämmöntalteenottolaitteita tai -järjestelmiä. Kyseiset yritykset tarjoavat lämmönsiirtimiä, lämpöpumppuja tai lämmön talteenoton kokonaisratkaisuja (nämä yritykset on merkitty taulukoon, joka on liitteestä 2). Monet markkinoilta olevat teolliset jäteveden LTO-laitteet ovat niin sanottuja passiivisia laitteita, jolloin osa jätevedestä saattaa mennä viemäriin ilman, että siitä otetaan lämpöä talteen. Finess Energy:n jäteveden LTO-järjestelmä on aktiivinen, minkä ansiosta jäteveden lämmön talteenoton vuosihyötysuhde on passiivisia laitteita parempi.

3.2.2 Lämmöntalteenotto viemäriverkosta

Jäteveden sisältämä lämpöenergia voidaan ottaa talteen myös viemäriverkosta ennen veden päätymistä jätevedenpuhdistamolle. Viemäristä lämpöenergiaa ottavia sovelluksia on runsaasti Keski-Euroopassa, kun taas Suomessa on toteutettu vuoteen 2013 mennessä ainoastaan yksi esiselvitys sekä pilottihanke asiaan liittyen. Pilottihanke toteutettiin Marja-Vantaan asuinalueella, selvityksessä vertailtiin kahta vaihtoehtoista järjestelmää. Ensimmäinen järjestelmä kytkettiin suoraan jäteveeseen, tällöin lämpöpumpuasema sijoitettiin lähelle jätevesiviemäriä ja kaukolämpöverkkoa. Kyseinen vaihtoehto tuotti vuodessa lämpöenergiaa 22 000 MWh. Toisessa järjestelmässä viemäriin asennettiin lämmönsiirtimet, joiden avulla tuotettiin lämpöenergiaa lämpöpumpuasemalla. Tämä vaihtoehto tuotti vuodessa lämpöenergiaa 9 500 MWh. Kyseinen selvitys ja pilottihanke toteutettiin RESCA-hankkeen yhteydessä, jossa todettiin lämpöenergian talteenoton olevan kannattavampaa vasta jätevesipuhdistamon jälkeen. (Tekes 2013, 20, 30–31.)

Keski-Euroopassa toteutetut hankkeet ovat pääsääntöisesti hyödyntäneet viemäristä talteen otettua hukkalämpöä, yksittäisten kohteiden lämmitykseen (liikehuoneistot, uimahallit ja julkiset rakennukset). Parhaimmillaan hankkeiden takaisinmaksuajat ovat olleet 2–4 vuoden luokkaa. Suurimpien viemäriin hukkalämpöä hyödyntävien lämpölaitosten lämmöntuottoteho on 50 MW luokkaa. (Tekes 2013, 20.) Viemäristä sekä rakennusten sisällä tapahtuvan lämmöntalteenoton yksi parhaista puolista on se, että näiden teknikkoiden avulla voidaan pienentää viemäriverkostossa syntyviä lämpöhäviötä.

Suomessa on arveltu, että viemäristä talteen otettava lämpö saattaa alentaa veden lämpötilaa liikaa ja täten aiheuttaa haittaa jätevedenpuhdistamoiden typenpoistolle. Keski-Euroopassa kertyneiden käyttökokemusten perusteella verkoston lämpötilan laskeminen alle 0,5 °C riittää kannattavan lämmöntalteenottosysteemin rakentamiseen. Sveitsissä ja Saksassa sovelletaan ohjeistusta, jonka mukaan jäteveden lämpötila ei saa kokonaisuudessa laskea yli 0,5 °C ja puhdistamolle tulevan veden täytyy olla vähintään 10 asteista. Hukkalämpö voidaan ottaa talteen viemäristä kahden eri perusratkaisun avulla, viemäriin asennettavan lämmönsiirtimen tai ulkoisen lämmönsiirtimen avulla. Ulkoiseen lämmönsiirtimeen vaaditaan lisäksi yhdistetty jäteveden pumppaus- ja suodatuslaitteisto. (Tekes 2013, 20, 38.) Vaikka tällä hetkellä lämmöntalteenotto ei aiheuta ongelmia suomalaisille jätevedenpuhdistamoille, tulevaisuudessa lämmöntalteenoton aiheuttama verkoston lämpötilan laskua joudutaan luultavasti seuraamaan tarkemmin.

3.2.3 Lämmöntalteenotto jätevedenpuhdistamolla

Hukkalämmön hyödyntäminen puhdistetusta jätevedestä tarjoaa suuremman talteenottopotentiaalin kuin puhdistamaton jätevesi, koska puhdistetun jäteveden lämpötilaa voidaan laskea merkittävästi enemmän kuin puhdistamattoman, jopa 6–8 Kelviniä (Schmid 2008, 6).

Veden loppulämpötila määräytyy aina niiden olosuhteiden mukaan, jotka vallitsevat vastaanottavassa vesistössä. Monesti lämmöntalteenoton avulla voidaan vähentää vesistön lämpökuormaa. Jätevedenpuhdistamoilla talteen otettu lämpö hyödynnetään yleensä kaukolämmön tai -kylmän tuotannossa. Mikäli puhdistamo on sijoitettu alueelle, jossa ei ole potentiaalisia hyödyntäjiä, voidaan lämpö hyödyntää esimerkiksi laitoksen omiin prosesseihin tai tilojen lämmitykseen. (Tekes 2013, 31.)

Lämpöpumpun avulla kaukolämpöä tai -kylmää tuottavia laitoksia on Suomesta useita. Näistä suurimmat ovat Helsingin Katri Valan laitos, jonka kaukolämpöteho on 90 MW ja kaukokylmäteho on 60 MW, sekä Turun Kakolan laitos, jonka kaukolämpöteho on 40 MW ja kaukokylmäteho on 28 MW (Valor 2016, 16). Myös Euroopasta on useita yli 1 MW:n jäteveden lämmöntalteenottolaitoksia.

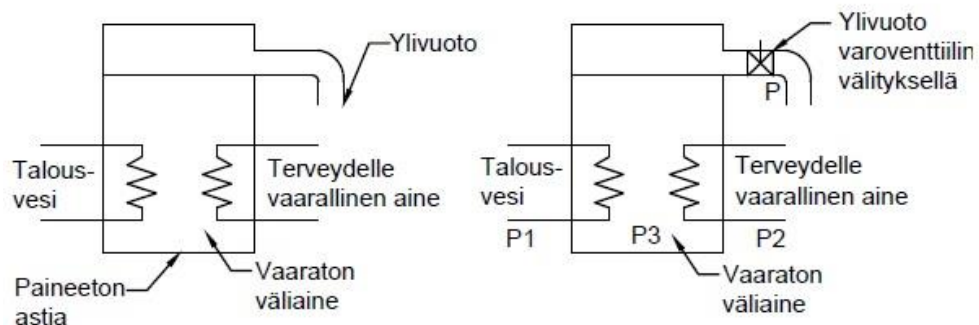
3.3 Rakennusmääräykset Suomessa

Suomen rakennusmääräyskokoelmaan on koostettu rakentamista koskevat säädökset ja ohjeet. Jokainen on veloitettu noudattamaan ministeriön säädöksiä, kun taas ohjeet eivät ole velvoittavia. (Ympäristöministeriö 2016.) Jäteveden lämmöntalteenottojärjestelmiä suunnitellessa tulee huomioida rakennusmääräyskokoelma D1. Kyseisessä kokoelmassa on säädökset ja ohjeet, joiden mukaan vesi- ja viemärilaitteistot tulee suunnitella ja asentaa, sekä määritelmä siitä minkälainen vedenlaadun tulee olla.

D1-osa antaa seuraavat määräykset jätevesilaitteistolle. Kiinteistön jätevesilaitteistoa suunniteltaessa ja asennettaessa on varmistettava, ettei siitä aiheudu vaaraa terveydelle, epämiellyttävää hajua, viemäritulvia, melua taikka muuta haittaa. Laitteiston tulee olla tarpeeksi kestävä, käyttövarma, ja se tulee sijoittaa käyttötarkoitukselle sopivaan paikkaan. Mikäli jätevesilaitteistoon liitetään jokin toinen laite, ei tämä saa kasvattaa viemärin kuormitusta tai aiheuttaa melua. Jäteveden tulee olla sellaista, että se ei sisällä

jätevesijärjestelmälle tai vesihuoltolaitoksen toiminnalle vahingollisia aineita. (Ympäristöministeriö 2007, 19.)

Laitteistojen asennuksessa tulee huomioida se seikka, etteivät vesijohdot saa joutua kosketuksiin jäteveden, kylmäaineen tai glykolin kanssa. Näiden aineiden vuotaminen tai diffundoituminen voi aiheuttaa veden saastumisen. (Ympäristöministeriö 2007, 7.) LTO-laitteistoja suunniteltaessa tulee noudattaa kuvan 4. periaatteita:



Varoventtiilin avautumispaine P valitaan siten, että vuoto kierukassa huomataan ($P3 < P < P1$ tai $P2$).

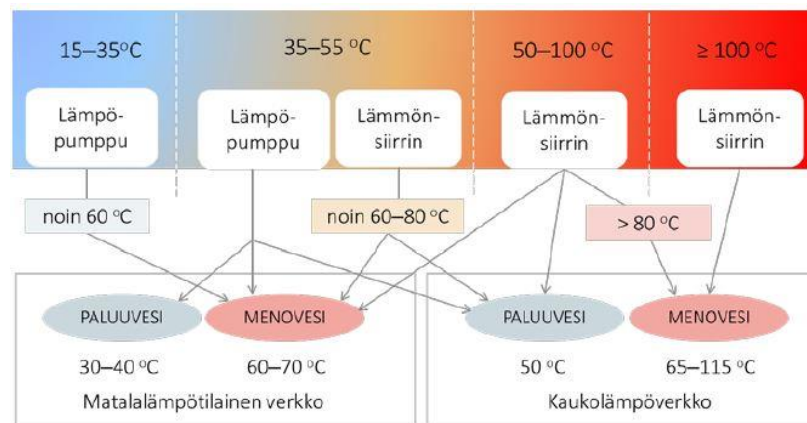
Vuoto kierukassa huomataan ylivuodosta. Ylivuoto varustetaan hälytyksellä.

Kuva 4. Esimerkki toteutuksesta, joilla voidaan taata, etteivät terveydelle vaaralliset aineet pääse vesilaitteistoon.

Toinen huomioitava seikka lämmöntalteenottolaitteistoita suunniteltaessa ja asennettaessa on takaisinimusuojaus. Suojauksen tarkoitus on estää veden saastumisvaara, jonka aiheuttaa veden takaisinimeytyminen sekä kaasujen ja nesteiden tunkeutuminen vesijohtoverkoston. Ilmaväli on ensisijainen tapa toteuttaa takaisinimusuojaus, mikäli tämä on teknisesti toteutettavissa. Ilmavälin lisäksi suojaus voidaan toteuttaa neljällä eri tapaa: 1. tyhjäventtiilillä ja yksisuuntaventtiilillä, 2. pelkällä tyhjäventtiilillä, 3. yksisuuntaventtiilillä tai 4. vaihdinjuoksuputkella. (Ympäristöministeriö 2007, 7.)

4 LÄMMÖNTALTEENOTTOTEKNIIKAT

Prosessin hukka- tai ylijäämälämpö voidaan hyödyntää suoraan lämpöenergiana tai se voidaan muuttaa sähköksi. Kuvassa 5. on esitetty neljä lämpötilatasoa tyypilliselle teollisuuden ylijäämäenergialle sekä näiden lämpötilojen hyödyntämiseen käytettäviä tekniikoita. Ylijäämäenergian hyödyntäminen toisen prosessin esilämmitykseen tai kaukolämpöverkossa toteutetaan yleensä lämmönsiirtimien tai lämpöpumppujen avulla.



Kuva 5. Ylijäämälämmön hyödyntäminen lämpötilatasojen mukaan (Heikkilä & Kiuru 2014, 13).

Mikäli ylijäämäenergiaa ei pystytä hyödyntämään lämpönä, voidaan se muuttaa sähköksi. Sähkön tuotantotapoja on olemassa useita. Korkealämpöiset eli yli 350 asteiset ylijäämälämmöt voidaan muuntaa sähköksi perinteisen höyryvoimaproessin avulla. Ylijäämäenergian lämpötilojen ollessa matalampia, voidaan sähköä tuottaa ORC-prosessin, TEG-elementin tai matalalämpö Stirling-moottorin avulla. (Heikkilä & Kiuru 2014, 16.)

Edellä mainituista tekniikoista kahdella jälkimmäisellä on toteutettu vasta joitakin pienemmän mittakaavan hankkeita, eikä niillä ole vielä kaupallista potentiaalia. Vastaavasti ORC-prosessilla toimivia laitoksia on Suomessa neljä ja maailmalla useampia. Sähköteholtaan nämä laitokset ovat 200 kW-15 MW:n kokoisia (Turboden 2016). Suomessa Ämmässuon kaasuvoimala sekä Viikinmäen jätevedenpuhdistamo hyödyntävät ORC-prosessia savukaasujen lämmön talteenotossa. Ämmässuon Laitoksen ORC-prosessi tuottaa sähköä noin 1,3 MW:n teholla (HSYa 2016). Viikinmäen puhdistamon kaasumotto-rien savukaasujen lämpöä hyödyntävä ORC-laitteisto tuotti vuonna 2015 sähköä 8,9 gigawattituntia (HSYb 2016). ORC-prosessi toimii kuten perinteinen Rankine-prosessi,

sillä poikkeuksella, että veden tilalla käytetään kohteeseen soveltuvaa orgaanista ainetta. Tämä orgaaninen aine höyrystyy ja lauhtuu veden tavoin prosessin eri kohdissa. Orgaaninen aine höyrystyy kuitenkin vettä alemmassa lämpötilassa. Täten valitsemalla oikeanlainen orgaaninen aine ORC-prosessilla voidaan tuottaa sähköä hyvällä hyötysuhteella jopa 100 °C alemmissa lämpötiloissa. Yleisimpiä käytettyjä orgaanisia aineita ovat pentaani, silikoniöljyt ja tolueeni. (Kataikko & Maaskola 2014, 38, 45.) Suomessa ja Euroopassa ORC-laitosten yleistymisen suurimpia esteitä on ollut matala sähkön markkinahinta.

Jäteveden sisältämä lämpö voidaan hyödyntää kahden eri menetelmän keinoin. Ensimmäisessä menetelmässä hyödynnetään lämmönsiirintä toisen prosessin suoraan esilämmittämiseen. Toisessa menetelmässä lämmönsiirtimen lisäksi käytetään hyväksi myös lämpöpumppua. Lämpöpumpun tuottama energia voidaan hyödyntää lämmön tuoton tehostamisessa sekä jäähdytyksen tuottamisessa. (Salminen 2011, 18.)

4.1 Lämmönsiirtimet

Useissa teollisuuden prosesseissa lämpö on siirrettävä yhdestä virtaavasta nesteestä toiseen, kiinteään esteen erottaessa nämä kaksi nestettä. Tähän tarkoitukseen käytetään lämmönsiirintä. Lämmönsiirintä suunniteltaessa tutkitaan pääasiassa konventiota eli johtumista. (Kothandaraman 2006, 521.) Pienet investointikustannukset ovat suurin syy siihen, että ensisijaisesti ylijäämäenergian hyödyntämiseen käytetään pelkkää lämmönsiirintä.

Lämmönsiirtimet voidaan jaotella toiminnan mukaan kolmeen ryhmään. Ensimmäistä ryhmää kutsutaan rekuperatiiviseksi lämmönsiirtimiksi. Tämän kaltaisessa siirtimessä seinämä erottaa toisistaan kaksi nestettä. Lämpö siirtyy seinämän läpi nesteestä toiseen.

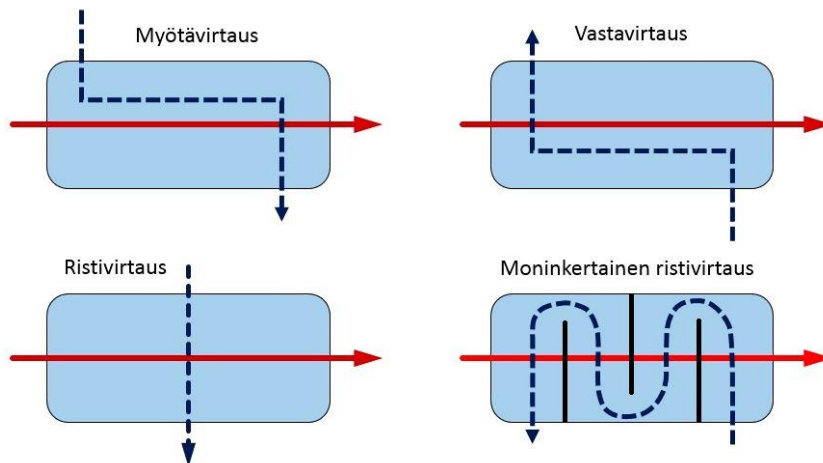
Toinen ryhmä on regeneratiiviset tai lämpöä varastoivat lämmönsiirtimet, joissa ainevirrat kulkevat edestakaisin kiinteän rakenteen läpi. Tämä kiinteä rakenne sekä varastoi lämpöä ainevirrasta, että luovuttaa sitä. Regeneraattorin hyvä puoli on se, että pieneen tilaan saadaan paljon lämmönsiirtopintaa. Huonona puolena voidaan pitää, että regeneraattorista ei saada estettyä kaikkia vuotoja. Tästä johtuen regeneraattoreita ei voida käyttää jätevesisovelluksissa. (Kothandaraman 2006, 521–524; Seppänen 2001,

223.) Yksi esimerkki regeneraattorien käytöstä on kiinteistöjen LTO-laitteet, joissa lämpimällä sisäilmalla esilämmitetään kylmää ulkoilmaa.

Kolmas lämmönsiirrinryhmä on sekoituslämmönsiirtimet. Näissä siirtimissä ainevirrat sekoitetaan keskenään, jolloin virrat saavuttavat saman lämpötilan. (Kothandaraman 2006, 524.) Sekoituslämmönsiirtimiä ei ole käytössä jätevesien lämmöntalteenottojärjestelmissä.

4.1.1 Rekuperatiiviset lämmönsiirtimet

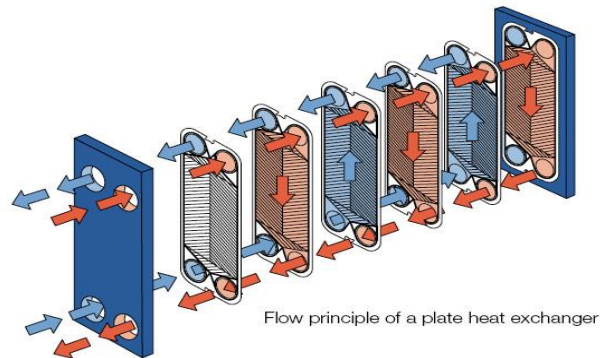
Ainevirtojen suunnan mukaan nämä lämmönsiirtimet voidaan jakaa myötä-, vasta- ja ristivirtalämmönsiirtimiin. Myötävirtalämmönsiirtimessä ainevirrat kulkevat samansuuntaisesti, kun taas vastavirtalämmönsiirtimessä ainevirrat kulkevat vastakkaisesti suuntiin. Ristivirtalämmönsiirtimessä toinen ainevirta kulkee poikittain toiseen ainevirtaan nähden. Joissakin lämmönsiirtimissä tapahtuu ns. moninkertaista ristivirtausta, eli ainevirrat kulkevat useita kertoja ristikkäin ja vastavirtaan, kuten kuva 3. havainnollistaa. (Pihkala 2013, 105.):



Kuva 6. Lämmönsiirtimien virtaustyytit.

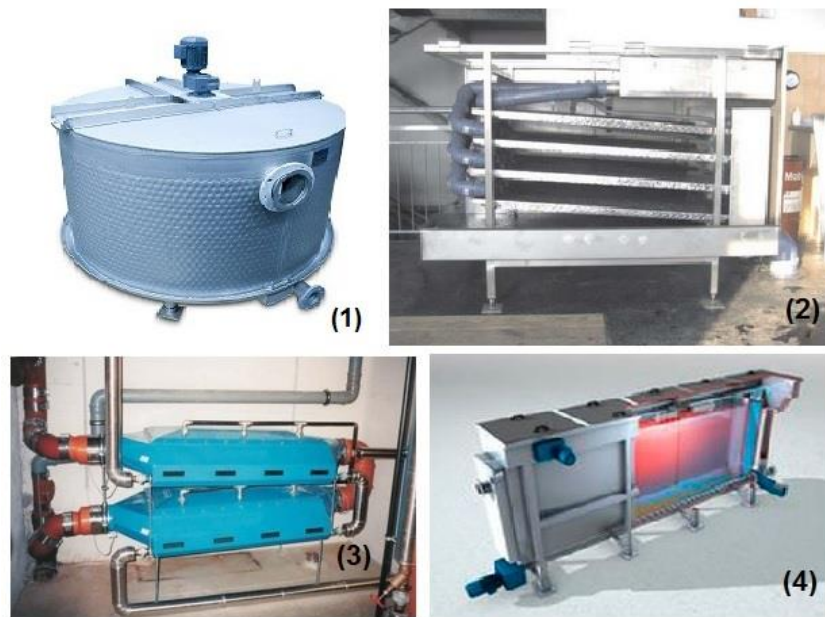
Ainevirtojen suunnan lisäksi rekuperatiiviset lämmönsiirtimet voidaan jakaa edelleen muun muassa levy- ja vaippaputkilämmönsiirtimiin. Perehdyn tarkemmin näihin kahteen lämmönsiirrintyyppiin, sillä ne ovat suurten kiinteistöjen jäteveden lämmön talteenotossa yleisimmin käytetyt tyypit.

Levylämmönsiirtimessä on vierekkäin vaihteleva määrä samansuuntaisia levyjä. Näiden levyjen lukumäärä riippuu lämmönsiirtotarpeesta. Levyt ovat yleensä poimutettu ja niiden reunoilla on tiivisteet, joiden avulla levyt tiivistetään toisiaan vasten. (Pihkala 2013, 105.) Kuvan 7. mukaisesti lämmönsiirto tapahtuu siten, että joka toisen levyjen väliin johdetaan kuuma neste ja joka toisen kylmä neste:



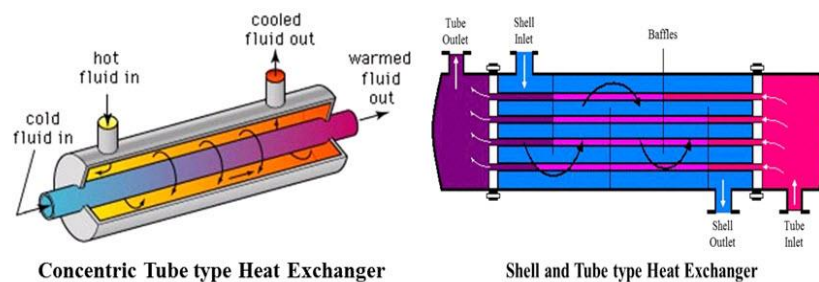
Kuva 7. Levylämmönsiirtimen toimintaperiaate. (Separation Equipment 2016).

Edellä kuvattiin niin sanotun avattava levylämmönsiirrin. Näiden lisäksi tarjolla on kuitenkin myös juotettuja lämmönsiirtimiä. Kyseisissä lämmönsiirtimissä levyt on kiinnitetty toisiinsa tyhjiöjuottamalla, esimerkiksi kupari- tai nikkeli-juotoksen avulla (Viflow 2016). Perinteisten levylämmönsiirtimien lisäksi jäteveden LTO-sovelluksissa käytetään samalla periaatteella toimivia spiraalilevylämmönsiirtimiä, sekä muun mallisia levylämmönsiirtimiä. Kuvassa 8. on esitetty muutama erimallinen levylämmönsiirrin: 1. on ACO engineeringin valmistama Therm-X lämmönsiirrin, 2. Fercherin valmistama FB-lämmönsiirrin, 3. myös Fercherin valmistama AWS-lämmönsiirrin sekä 4. Huberin valmistama roWIN-lämmönsiirrin.



Kuva 8. Erimallisia levy- ja putkilämmönsiirtimiä (Fercher 2016; Huber Technology 2016; Thermac Engineering 2016).

Seuraavassa toimintaesimerkissä oletetaan kuvan 9. mukaisesti, että lämpenevä väliaine virtaa vaipassa ja kylmenevä väliaine putkessa. Kylmenevä väliaine saapuu siirtimen toiseen päähän, josta tämä jakautuu useampaan putkeen. Tämän jälkeen väliaine poistuu lämmönsiirtimen toisesta päästä. Lämmönsiirtimeen voidaan laittaa välilevyjä, joiden avulla putkessa virtaava väliaine kulkee lämmönsiirtimen läpi useamman kerran. Tämä toimenpide tehostaa ja nopeuttaa lämmönsiirtoa. Tämän lisäksi vaippapuolelle voidaan laittaa virtausohjaimia, joiden avulla saadaan aikaan ristivirtaus ja turbulenttinen virtaus. (Pihkala 2013, 106.) Myös jätevesisovelluksissa käytettyjä putkilämmönsiirtimiä on monta erilaista mallia, kuten yllämainitut kuvassa 8. olevat laitteet kolme ja neljä.



Kuva 9. Putkilämmönsiirtimen periaate. (Dairy and Food Engineering 2013).

Jäteveden sisältämä kiintoaine ja muut epäpuhtaudet saattavat aiheuttaa lämmönsiirtimien likaantumista ja tätä kautta lämmönsiirtokyvyn heikkenemistä. Tästä johtuen juotettuja levylämmönsiirtimiä ei voida asentaa niin, että se on suorassa kontaktissa jäteveden kanssa, vaan tarvitaan ns. välipiiri. Esimerkiksi putkilämmönsiirtimestä jäteveden lämpöenergia siirretään glykolinesteen tai etanoliliuoksen avulla juotettuun levylämmönsiirtimeen, joka toimii lämpöpumpun höyrystimenä. Avattavia levylämmönsiirtimiä voidaan käyttää jätevesipuolella, mikäli jätevesi on esisuodatettua. (Paavola 17.2.2016.) Tyypillisesti jätevesipuolella käytetään putkilämmönsiirtimiä tai varta vasten jätevesisovelluksiin suunniteltuja lämmönsiirtimiä.

4.2 Lämpöpumput

Lämmöntalteenottosovelluksissa käytetään pääsääntöisesti höyrynpuristus- tai absorptiolämpöpumppuja. Suomessa höyrynpuristuslämpöpumput ovat yleisimpiä koska kiinteistöissä on enemmän tarvetta lämmölle (kiinteistön lämmitys, lämminvesi) kuin vaikkapa jäähdytykselle. Toinen lämpöpumpputekniikan valintaa ohjaava tekijä on lämmön talteenotossa hyödynnettävän veden matala lämpötila.

Absorptiolaitteita käytetään yleensä jäähdytyssovelluksissa. Markkinoilta on kuitenkin myös absorptiolämpöpumppuja, joiden avulla voidaan tuottaa lämpöä 95°C asti. Kannattava absorptiolämpöpumppujen käyttäminen edellyttää, että laitteen käyttöenergia saadaan edullisesta lämmönlähteestä, joka voi olla esimerkiksi kuuma vesi, höyry tai pakokaasu. Näiden laitteiden suurimmat hyödyt ovat laaja säädettävyys eri tehoalueilla ja vähäinen sähkönkulutus. COP-arvot absorptiolämpöpumpuissa ovat yleensä luokkaa 1,5–1,8. (Kataikko & Maaskola 2014, 20–22.)

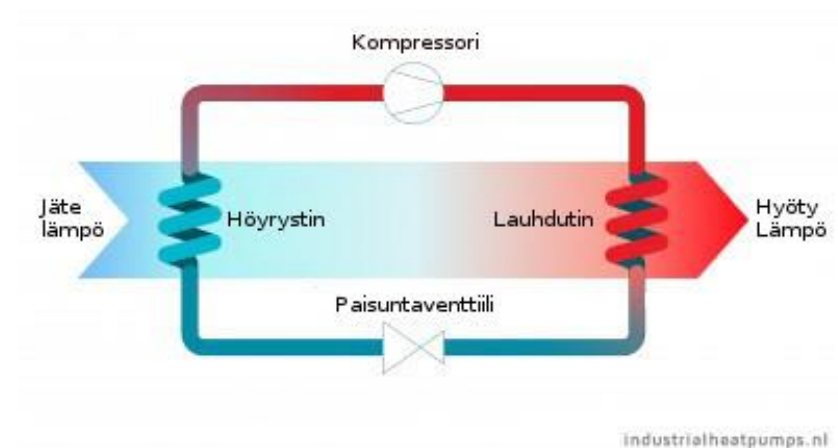
Lämpöpumppua voidaan käyttää myös LTO:n rinnalla, jolloin sen avulla voidaan vähentää esimerkiksi kaukolämmön käyttötarvetta, ja tätä käyttäen pienentää kiinteistön lämmityskustannuksia. Tulevissa kappaleissa perehdytään syvemmin höyrynpuristuslämpöpumppuihin ja niiden toimintaan.

4.2.1 Toimintaperiaate

Kaikki kylmäaineprosessit toimivat ikään kuin lämpöpumput, sillä ne pumppaavat lämpöenergian kylmästä ympäristöstä kohti lämpimämpää. Kylmäaineen kulkusuuntaa muuttamalla lämpöpumppu muuttuu kylmäkoneeksi: käänteisventtiilin avulla samaa laitetta voidaan käyttää tuottamaan sekä lämpöä että kylmää.

Lämpöpumpun lämmönlähteenä toimii ilma, vesistöt, maaperä tai jossakin prosessissa syntyvä ylijäämälämpö. Kiinteistösovelluksessa lämpöpumppu ottaa lämpöä esimerkiksi ulkoilmasta ja luovuttaa sen korkeammassa lämpötilassa huoneilmaan tai kuumaan käyttöveteen. (Porkka 2013, 15.) Lämpöpumpun pääkomponentit ovat höyrystin, kompressori, lauhdutin ja paisuntaventtiili (ks. kuva 8).

Markkinoilla on myös ns. monitoimilämpöpumppuja, jotka hyödyntävät kylmän- ja lämmöntuoton lisäksi kylmäkoneen lauhdutintehon lämmöntuotannossa. Tämä toteutetaan niin, että kylmä- ja lämpöpuolella on yhteinen lauhdutin. Kyseisessä lämpöpumpussa on myös ilmalauhdutin, jota voidaan käyttää kylmäpuolen lauhduttimena, mikäli lämpöä ei voida syöttää kuumaan käyttöveteen. Näistä lämpöpumpuista kerrotaan lisää Tutkimuskohteen kaksi yhteydessä (kts luku 6.8).



Kuva 10. Lämpöpumpun pääkomponentit (Industrial Heat Pumps 2016, muokattu).

Lämpöpumpussa kiertää kylmäaine, joka vuoronperään höyrystyy ja lauhtuu. Lämmin neste, kuten esimerkiksi jätevesi, kulkee höyrystimen läpi, jossa kylmäaine höyrystyy. Höyrystyessään kylmäaine sitoo lämpöä jätevedestä, samalla jäähdyttäen sitä. Höyryst-

timen jälkeen tulee kompressorin, jossa höyryn paine ja lämpötila nousevat. Tämän jälkeen höyry kulkee lauhtuttimen läpi, lauhtuen samalla nesteeksi. Lauhtuvasta höyrystä vapautuu lämpöä, joka voidaan sitoa lauhtuttimen läpi virtaavaan nesteeseen. Seuraavaksi nesteeksi lauhtunut kylmäaine kulkee paisuntaventtiin läpi ja siitä takaisin höyrystimeen. Tämän jälkeen prosessi alkaa alusta. (Hakala & Kaappola 2007, 224.)

Lämpöpumpussa kompressorin sähkömoottori vaatii toimiakseen sähköenergiaa. Lisäksi joissakin sovelluksissa tarvitaan erillisiä pumppuja ja lämmitysvastuksia, jotka tarvitsevat toimiakseen myös sähköä. Sähkönkulutus vaikuttaa lämpöpumpun höytysuhteeseen ja kannattavuuteen, jota kuvataan yleensä lämpökertoimella COP. Lämpökerroin kertoo, kuinka paljon lämpöä tuotetaan suhteessa kulutettuun sähköenergiaan. (Hakala & Kaappola 2007, 224.). COP-luku vaikuttaa myös lämpöpumppuinvestoinnin takaisinmaksuaikaan. Tyypillisesti lämpöpumpun lämpökerroin on noin 3. Lämpökertoimen laskemisessa käytetään kaavaa 1:

$$\text{Lämpökerroin}(COP) = \frac{\text{Tuotettu Lämpö (kWh)}}{\text{Käytetty sähkö (kWh)}}$$

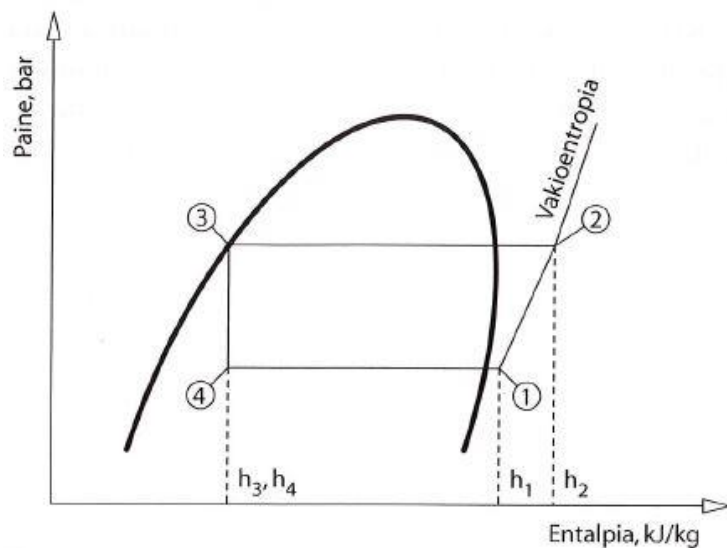
Kaava 1. Lämpöpumpun lämpökertoimen laskeminen (Hakala & Kaappola 2007, 224).

4.2.2 Log p, h-tilapiirros

Yksi parhaista tavoista kuvata lämpöpumpun toimintaa ja prosessin kulkua on logaritminen paine-entalpia-tilapiirros. Tässä piirroksessa nähdään kylmäaineen paineen, entalpiian ja olomuodon muutokset prosessin eri vaiheissa.

Tilapiirroksen pystysuora-akseli kuvaa logaritmisella asteikolla absoluuttista painetta ja vaakasuora-akseli kuvaa kylmäaineen entalpiaa. Kylmäaineen eri olomuodot jaetaan tilapiirroksessa rajakäyrän avulla. Vasemmalla sijaitsee kylläisen nesteen rajakäyrä, tämän vasemmalla puolella neste on alijäähtynyttä. Kun mennään rajakäyrää ylöspäin, saavutaan ns. kriittiseen pisteeseen, jonka yläpuolella höyry ei enää nesteydy. Oikealla vastaavasti sijaitsee kylläisen höyryn rajapiste, tämän oikealla puolella höyry on tulistuu-

nutta. Rajakäyrän sisäpuolella on nesteen ja höyryn sekoitusta. Lämpötila- ja paine-
käyrät ovat rajankäyrän sisällä yleensä suorita. Tämä suoruus riippuu hyvin paljon siitä,
mikä kylmäaine on kyseessä. Aseotrooppiset kylmäaineseokset ja yksikomponenttiset
kylmäaineet höyrystyvät ja lauhtuvat vakio lämpötilassa. Tseotrooppisten kylmäaine-
seoksien höyrystyessä ja lauhtuessa lämpötila taasen muuttuu, tästä johtuen niiden läm-
pötilakäyrä on hiukan vinossa. (Hakala & Kaappola 2007, 11–12.)



Kuva 11. Log p, h-tilapiirros ja teoreettinen kylmäprosessi (Hakala & Kaappola 2007, 12).

Lämpöpumpun kylmäaineprosessi kulkee kuvan 11 mukaisesti teoriassa seuraavasti: kylmäaineen höyrystyminen tapahtuu pisteiden 4 ja 1 välillä. Hieman ennen pistettä yksi kylmäaine ylittää kylläisen höyryn rajakäyrän eli se tulistuu. Seuraavaksi välillä 1–2 kompressorissa tapahtuu häviötön (isentropinen) puristus, joka seuraa vakioentropiakäyrää. Puristuksen aikana kylmäainehöyryn paine nousee ja se tulistuu hieman. Pisteiden 2 ja 3 välillä kylmäaine lauhtuu ja siitä poistuu tulistus. Viimeisenä, välissä 3–4, paisuntalaite saa aikaan kylmäaineen paineen laskun, jonka jälkeen kylmäaine muuttuu neste-höyry-seokseksi. Prosessissa tapahtuvien entalpiamuutosten avulla voidaan määrittää höyrystimen sitoma lämpö Q_0 (4–1), kompressorin tekemä työ W (1–2) ja lauhtuttimen luovuttama lämpö G_1 (2–3). (Hakala & Kaappola 2007, 12.)

4.2.3 Kylmäaineet

Kylmäaine on tärkeä lämpöpumppuprosessissa, sillä sen tehtävä on sitoa ja luovuttaa lämpöenergiaa prosessin eri vaiheissa. Jäteveden lämmöntalteenotto-sovelluksissa käytetään pääasiassa kylmäaineita R134a, R410a ja ammoniakkiä. (Paavola 17.2.2016). Edellä mainittuja kylmäaineita käytetään lämpöpumpuissa ensisijaisesti, koska ne eivät ole haitallisia ilmakehän otsonille. Taulukossa 1. on esitetty näiden kylmäaineiden ominaisuuksia:

Taulukko 1. Kylmäaineiden ominaisuuksia (Hakala & Kaappola 2007, 24, Hundy 2008, 32).

<i>Kylmäaine</i>	<i>R134a</i>	<i>R410a</i>	<i>R717, ammoniakki</i>
<i>Koostumus</i>	CF ₃ CH ₂ F	R32 ja R125	NH ₃
<i>ODP</i>	0	0	0
<i>GWP(CO₂=1)</i>	1300	1725	0
<i>Kiehumispiste (°C)</i>	-26	-51	-33
<i>Höyrynpaine 50°C (bar abs)</i>	13,2	30,5	20,3
<i>Lämpötilaliukuma</i>	ei liukumaa	n. 0,2°C	ei liukumaa

Ylhäällä ilmakehässä sijaitseva otsonikerros suojaa terveydelle haitalliselta ultraviolettisäteilyltä. Jossain vaiheessa tutkijat huomasivat otsonikerroksen ohenevan halogenoitujen aineiden(CFC), halonien ja bromidien synnyttämien päästöjen vaikutuksesta. OPD-arvo ilmaisee, minkälainen vaikutus kylmäaineella on ilmakehän otsonille. Kaikkien taulukossa 1. olevien kylmäaineiden OPD-arvo on nolla. Vertailupisteinä pidetään R11 kylmäainetta, jonka OPD-arvo on 1,0. Näiden halogenoitujen kylmäaineiden tuotanto lopetettiin vuoteen 1995 mennessä. Sen sijaan osittain halogenoitujen HCFC-aineiden, kuten R22, käytöstä tulee luopua vuoteen 2030 mennessä. EU-säädösten mukaan HCFC-ainetta ei saa uusia vuoden 2015 jälkeen, vaan tulee se korvata esimerkiksi kloorittomilla hiilivedyillä (HFC) kuten R134a:lla. (Hundry 2008, 31-33.)

Toinen kylmäaineiden ominaisuuksissa huomioitava arvo on sen vaikutus kasvihuoneilmiöön eli GWP-arvo. Tämän arvon voi määrittää indeksiksi, joka vertaa kylmäaineen

päästöjen vaikutuksia päästettäessä tietty määrä hiilidioksidia ilmakehään. Kuten taulukosta 1. nähdään, on R134a:n GWP-arvo 1300. Tämä tarkoittaa, että 1kg:n R134a päästö ilmakehään vastaa 1300 kg:n hiilidioksidipäästöä. (Hundy 2008, 34.)

Vuonna 2014 julkaistiin Fluorattujen kasvihuonekaasujen (esim. HFC) F-kaasuasetus. Tällä asetuksella pyritään ohjaamaan kylmäalan teollisuutta korvamaan f-kaasuja ympäristölle vähemmän haitallisilla vaihtoehdoilla. (Tukes 2014.) Vahvimpia vaihtoehtoja f-kaasujen korvaajiksi ovat luonnolliset kylmäaineet kuten ammoniakki ja hiilidioksidi, sekä uudet synteettiset kylmäaineet, joista esimerkkinä HFO1234ze ja HFO1234yf. Näiden kylmäaineiden GWP-arvo on alle 10. (Laitinen 2016, 7.)

5 MITTAUSLAITTEISTON HANKINTA JA LÄMPÖVIRRRAN MITTAUSPERIAATE

Tutkimuskohteen tutkimiseksi tarvittiin jäteveden lämmöntalteenottojärjestelmien virtaus- ja lämpövirtamittauksiin soveltuva mittauslaitteisto. Opinnäytetyön mittausten lisäksi laitteistolla on tarkoitus helpottaa ja tarkentaa Finess Energyn uusien kohteiden ja ESCO-palvelulla toteutettujen hankkeiden mitoittamista ja suunnittelutyötä. Mittauslaitteistoa voidaan myös käyttää Finess Energyn tai jonkin toisen yrityksen laitteiston tai prosessin halutun toiminnan todentamiseen.

Tarvittavan mittauslaitteiston tulee soveltua jäteveden virtauksien ja lämpömäärien mittaamiseen, ja siinä tulee olla sisäänrakennettu tai erillinen dataloggeri. Laitteisto voi koostua joko erillisistä virtausmittarista, lämpötila-antureista ja data loggerista tai kaikki nämä komponentit voivat olla yhdestä mittalaitteesta. Koska laitteistoa käytetään ensisijaisesti Finess Energyn uusien kohteiden mittaamisen, tulee sen olla kannettavaa mallia, jonka anturit ovat clamp on -mallisia. Tämän kaltaiset anturit asennetaan putken pintaan, eivätkä ne vaadi putken muokkaamista tai prosessin pysäyttämistä. Laitteiston mittaus-tarkkuuden tulee olla vähintään $\pm 10\%$. Näiden ominaisuuksien lisäksi laitteistoa etsittäessä tiedusteltiin mittalaitteistojen etäyhteysominaisuutta. Etäyhteys mahdollistaa mittauksen ja sen mittaustulosten seurannan ilman, että tarvitsee vierailla paikan päällä itse mittaushetkellä.

Koska kyseisen mittalaitteiston tulee soveltua jäteveden mittaamiseen, selvitettiin jätevesien (yhdyskunta, pesulat) tyypillisiä kuiva-ainepitoisuuksia. Characteristics of grey wastewater -tutkimuksen mukaan kotitalouksien harmaanveden kiintoainepitoisuudet vaihtelivat välillä 0,01–0,24 % (TS), eniten kiintoainetta esiintyi keittiöistä ja pesukoneista lähtöisin olevista vesistä. Vesiprosessit-kurssin materiaalien mukaan raakalietteen kiintoainepitoisuus on 3–6 % (TS) ja sekalietteen (raakaliete + bioliete) kiintoainepitoisuus on 1,5–5 %.

Laitteiston hankinta lähti liikkeelle virtaus- tai lämpövirtamittareita valmistavia ja myyviä yrityksiä kartoittamalla. Markkinoilla on useita yrityksiä, jotka valmistavat kannettavia clamp on -virtausmittareita. Miltei jokainen näistä yrityksistä tarjoaa lisäksi myös malleja, joiden avulla voidaan mitata putkistossa kulkeva lämpövirta. Kannettavia virtaus- tai läm-

pövirtamittareita maahantuovia ja myyviä yrityksiä on Suomesta tusinan verran. Kartoituksen perusteella otettiin yhteyttä kymmeneen yritykseen, joilta tiedusteltiin hankintakriteerit täyttävää mittauslaitteistoa.

Kontaktoiduista yrityksestä yhdeksästä saatiin ehdotus ja tarjous hankintakriteerit täyttävästä mittauslaitteistosta. Osalta yrityksistä kysyttiin tarkentavia kysymyksiä mittauslaitteistoa koskien, jonka jälkeen kaikki vaihtoehdot käytiin läpi palaverissa Finess Energyn toimistolla. Palaverin aikana heräsi muutama laitteistoon liittyvä lisäselvitystä vaativa kysymys: Onko tarjotulla mittauslaitteistolla mahdollista mitata kahden erillisen putken tilavuusvirta yhtäaikaisesti? Mikä merkitys seinämäpaksuudella on mittaustulokseen? Tuuleeko seinämäpaksuusanturi hankkia tilanteisiin, kun ei tiedetä mitattavan putken seinämäpaksuutta? Onko tarjottuihin mittauslaitteistoihin mahdollista liittää seinämäpaksuusanturia, vai tarvitaanko erillinen mittauslaite.

Palaverissa heränneisiin kysymyksiin etsittiin tietoa internetistä sekä kyseisiä laitteistoja myyvistä yrityksistä. Tiedustelujen perusteella kävi selville, että muutamassa tarjotussa mittauslaitteistossa on mahdollisuus mitata kahden erillisen putken tilavuusvirta yhtäaikaisesti. Oikean seinämäpaksuuden arvon merkityksestä mittauksissa kerrotaan tarkemmin luvussa 5.1.3.

Liitteessä 1 on listattu kahdeksan yrityksen tarjoukset sekä hankinnan kannalta tärkeät laiteominaisuudet. Laitteiden hinnat vaihtelivat 7000:sta 10 000:een euroon. Laitteen suora hankinta olisi ollut tässä vaiheessa liian suuri investointi, joten ratkaisevaksi yrityksen valinnan kohdalla muodostui mahdollisuus laitteen vuokraukseen. Yrityksistä vuokrausmahdollisuutta tarjosi Stig Wahlström 500€:n viikkohintaan.

Stig Wahlströmin edustaja lupautui esittelemään laitetta Turun ammattikorkeakoulun tiloissa. Palaverin ja esittelyn perusteella päädyttiin vuokraamaan Stig Wahlströmiltä seinämäpaksuusanturin sisältävän Fluxus F601E -mittauslaite. Laite päätettiin vuokrata viikoksi, mikä mahdollisti opinnäytetyöhön liittyvien mittausten suorittamisen ja mittauslaitteen soveltuvuuden testaamisen pienillä kustannuksilla.

Fluxus F601E on saksalaisen Fleximin valmistama putkistojen nesteiden virtauksen ja lämpövirran mittauksiin kehitetty laite. Yritys valmistaa myös laitteita, jotka soveltuvat kaasujen virtauksien ja lämpövirtojen mittaamiseen putkistoissa. Fluxus F601E:lla voidaan yhden putken lämpövirran mittauksen lisäksi mitata myös tarvittaessa kahden erillisen putken virtaukset. Mittauslaite ja sen osat kulkevat kätevästi mukana kuljetussalissa, jossa on myös kaikki mittauksiin ja datan siirtämiseen tietokoneelle vaadittavat

osat (kuva 12.). Kaikki anturit on märkäkalibroitu tehtaalla parhaan mahdollisen mittaus-tarkkuuden varmistamiseksi. Virtausanturit toimivat ultraääni- ja lämpötila-anturit vastus-periaatteella. Käsittelen näitä anturityyppejä sekä niiden toimintaperiaatteita tarkemmin luvuissa 5.1.



Kuva 12. Flexim Fluxus F601E-mittauslaite (Flexim 2015, 11).

5.1 Lämpövirran mittaaminen

Putkistoissa kulkevan jäteveden sisältämän lämpöenergian määrä saadaan selvitettyä lämpövirran avulla (kaava 2.). Jotta putkiston lämpövirta pystytään määrittämään, tulee mitata tilavuusvirta q_v sekä putkistossa tapahtuva lämpötilan muutos ΔT . Näiden lisäksi tulee tietää putkistossa virtaavan aineen ominaislämpökapasiteetti C sekä tiheys ρ . Nämä arvot saadaan esimerkiksi taulukkokirjasta, kunhan tiedetään virtaavan aineen lämpötila.

$$\theta = \rho \cdot q_v \cdot c \cdot \Delta T$$

Kaava 2. Lämpövirran määrittäminen (Tekniikan taulukkokirja 2012, 241, muokattu).

jossa

$$\theta = \text{Siirtyvä lämpöenergia (J/s = W)}$$

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

$$q_v = \text{aineen massavirta (m}^3\text{/s)}$$

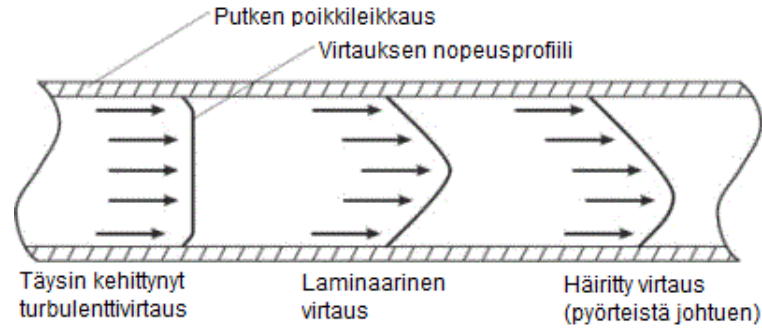
$$c = \text{Veden ominaislämpökapasiteetti (4,182 kJ/kg} \cdot \text{K)}$$

$$\Delta T = \text{Lämpötilan muutos (K)}$$

5.1.1 Virtausmittaus

Virtausmittauksessa määritetään yhden tai useamman anturin avulla putken tai avokanavan läpi virtaava massa- tai tilavuusvirtaus määrättyssä poikkileikkauksessa. Putkessa virtaavalla aineella on aina jonkinlainen virtausprofiili (kuva 13.). Virtausprofiilin muotoon vaikuttaa esimerkiksi aineen viskositeetti ja virtausnopeus. Yleensä aineen virtausnopeus on suurempi keskellä putkea ja kitkasta johtuen pienempi lähellä seinämää. Epäsymmetrinen virtausprofiili syntyy muun muassa putkiston mutkissa tai pyörteiden takia (kuva 13), ja saattaa aiheuttaa mittausvirheitä tai häiritä mittausta. Putkissa pyöreitä synnyttävät esimerkiksi mutkat, venttiilit tai anturit. Anturit tuleekin asentaa suoralle putkiosuudelle tietyn matkan päähän pyörrettä aiheuttavasta esteestä, jotta saadaan mahdollisimman tasainen virtausprofiili. (Pihkala 2004, 59–60.)

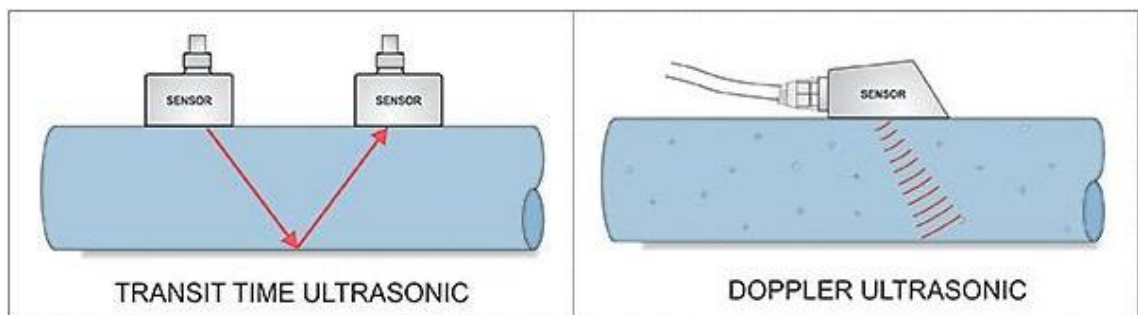
Virtaavan aineen käyttäytymistä putkistoissa kuvaava Reynoldsin luku. Luvun ollessa alle 2000 puhutaan laminaarisesta virtauksesta, kun luku on yli 4000, kyseessä on turbulентtinen virtaus. Mikäli Reynoldsin luku on välillä 2000–4000, vaihtelee virtaus satunnaisesti laminaarisen ja turbulenttisen virtauksen välillä. Virtauksen ollessa laminaarinen, putkistossa etenevien partikkelien kulkuradat ovat suoria. Vastaavasti turbulenttisesti virtauksessa partikkelit sinkoilevat ympäriinsä, varsinaisen virtauksen mennessä eteenpäin. (Asikainen 2000, 5–7.) Kuten kuvasta 13 ilmenee, turbulenttisella virtauksella virtauksen nopeusprofiili on tasaisempi kuin laminaarisella virtauksella. Turbulenttinen virtaus on yleisin virtausmuoto putkistoissa.



Kuva 13. Virtausprofiilit (Blue-White Industries 2015. muokattu).

5.1.2 Ultraäänimittaus

Kuten luvun 5. lopussa tuotiin esiin, työssä käytetyt virtausmittausanturit toimivat ultraääniperiaatteella. Ultraäänimittaus voidaan jakaa doppler-ilmiöön ja ääniaallon kulkuai- kaan perustuviin periaatteisiin. Yksi esimerkki doppler-ilmiöstä on paikallaan seisovan ihmisen ohittava juna. Kulkiessa ihmisen ohi, muuttuu junan aiheuttama ääni myös samalla. Doppler-virtausmittari (kuva 14.) käyttää hyväkseen periaatetta, jonka mukaan ääniaallot palaavat anturiin eri taajuudella, mikäli nesteessä olevat reflektorit ovat liik- keessä. Reflektoreina toimivat nesteessä olevat kaasukuplat tai kiintoainepartikkelit. (Greyline 2015.) Doppler-mittauslaite soveltuukin parhaiten nesteille, joissa on paljon kaasukuplia tai kiintoainepartikkeleita.



Kuva 14. Kulku-aika- ja Doppler-virtausmittauksen periaatteet (Greyline 2015).

Nimensä mukaisesti kulkuaikavirtausanturi mittaa sitä aikaa, joka ultraäänisignaaliilta kestää kulkea ensimmäisestä anturista putken läpi aina toiseen anturiin. Anturi vertaa signaalin vastavirtaan ja myötävirtaan kulkemiseen kuluttama aikaa. Jos virtausta ei ole lainkaan, kulkuaika on molempiin suuntiin yhtä suuri. Mikäli putkessa on virtausta, signaali kulkee nopeammin myötävirtaan kuin vastavirtaan. Koska signaalin tarvitsee kulkea putken läpi, ei nesteessä saa olla merkittäviä määriä kaasukuplia tai kiintoaineita, sillä ne vaimentavat signaalia ja estävät tämän kulun toiseen anturiin. (Greyline 2015.)

Finess Energyn mittauksia varten vuokratessa Fluxuksen mittauslaitteessa on erityisesti satunnaisia kaasukuplien tai kiintoainemäärien vaihtelua varten kehitetty NoiseTrek-mittaustekniikka. Tämä mittaustekniikka mahdollistaa vakaan mittaustuloksen korkeilla kaasukupla- tai kiintoainepitoisuuksilla $\pm 10\%$. NoiseTrek-mittausperiaate perustuu Fleximin kehittämään Doppler-teknologiaan. Fluxus-mittauslaitteessa on myös HybridTrek-toiminto, jossa mittauslaite vaihtaa mittausta kulkuaika- ja NoiseTrek-periaatteen välillä nesteen sisältämän kiintoaineen määrän vaihdellessa. (PG&E 2015, 2.)

5.1.3 Seinämäpaksuuden mittaus

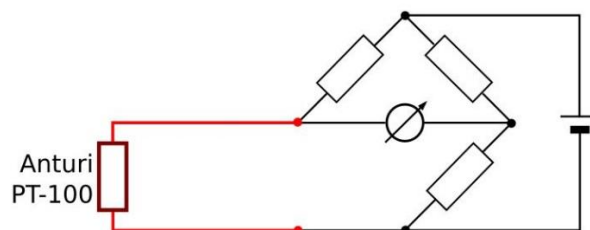
Putken seinämäpaksuuden määrittämiseen käytettävät anturit ja mittauslaitteet toimivat yleensä kulkuaikaan perustuvalla ultraäänitekniikalla. Seinämäpaksuusanturin käyttö on suositeltavaa, mikäli ei tiedetä mitattavan putken valmistusstandardia tai seinämäpaksuutta. Tampereen teknillisessä korkeakoulussa tehty tutkimus on osoittanut, että DN25-putkessa 0,1 mm:n heitto oikean ja asetetun seinämäpaksuuden välillä aikaansai yli 1 %:n virheen virtausmittaustulokseen. Pienissä putkissa seinämän osuus putken kokonaihalkaisijasta on varsin suuri. Täten väärin asetettu seinämäpaksuuslukema aiheuttaa pienissä putkissa suuren mittausvirheen. (Asikainen 200, 48.)

Tässä työssä seinämäpaksuusanturin ei todettu olevan välttämätön koska tutkimuskohdeiden putkien seinämäpaksuudet olivat tiedossa. Tulevaisuudessa saattaa Finess Energylle tulla kohteita, joissa putken seinämäpaksuutta ei tiedetä. Tällöin seinämäpaksuusanturin käyttö tulee olemaan suositeltavaa.

5.1.4 Lämpötilanmittaus

Teollisuudessa lämpötilan mittaus on yksi yleisempiä, ellei jopa yleisin mitattavista suureista. Lämpötila vaikuttaa suuresti lähes kaikkiin fysikaalisiin ja kemiallisiin prosesseihin, sillä se muuttaa aineiden ominaisuuksia. Esimerkiksi reaktion nopeus, tuotteen laatu, energiankulutus ja päästöt ovat riippuvaisia lämpötilasta. (Pihkala 2004, 35.) Lämpötila voidaan mitata prosessista hyvin monella eri periaatteella. Tässä työssä käytetyissä mittauslaitteissa lämpötila-anturit ovat ns. vastuslämpöantureita ja termopariantureita. Tästä johtuen tässä luvussa keskitytään tarkemmin vain kyseisiin mittausperiaatteisiin. Kannettavat lämpövirtaa mittaavat laitteet käyttävät pääsääntöisesti vastuslämpöantureita (PT100 tai PT1000). Dataloggerit, joiden avulla mitataan lämpötiloja, käyttävät termopariantureita sekä vastuslämpöantureita.

Vastuslämpömittaus on sähköinen menetelmä, jossa mitataan metalli- ja puolimetallivastuksen sähköistä vastusta eli resistanssia (kuva 15.). Vastuksen resistanssiarvo on positiivisesti lämpötilariippuvainen, eli vastuksen resistanssi suurenee, kun lämpötila kasvaa. Yksi yleisimmistä antureissa käytetyistä metalleista on platina. Platinan resistanssi on $100\ \Omega$, lämpötilan ollessa $0\ ^\circ\text{C}$. Kyseistä anturia kutsutaan myös PT100-anturiksi. (Pihkala 2004, 44.)



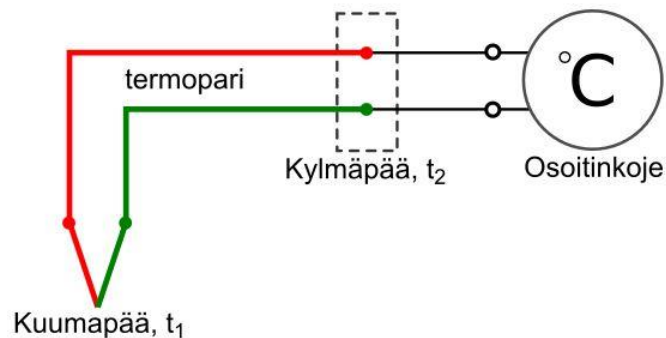
Kuva 15. Vastuslämpöanturi.

Platinan parhaita puolia on se, että sitä voidaan käyttää myös korkeissa lämpötiloissa. Suurin syy tähän on platinan jalous, mistä johtuen sen ominaisuudet muuttuvat hyvin vähän korkeissa lämpötiloissa. Yleensä anturin vastuslangassa on päällystys, joka on keraamista ainetta tai lasia. Lisäksi vastuslanka on yleensä suljettuna jaloteräs- tai nikkeliputkeen, joka on täynnä keramiikkajauhetta. (Pihkala 2004, 45.) Fluxus F601E käyttää EN 1434-1 standardin mukaisia keskenään sovitettuja PT100-antureita (Flexim 2015, 23). Taulukossa 2. on esitelty Fluxuksen lämpötila-antureiden tarkemmat tekniset tiedot:

Taulukko 2. Fluxus-lämpötila-antureiden tekniset tiedot (Flexim 2015, 23).

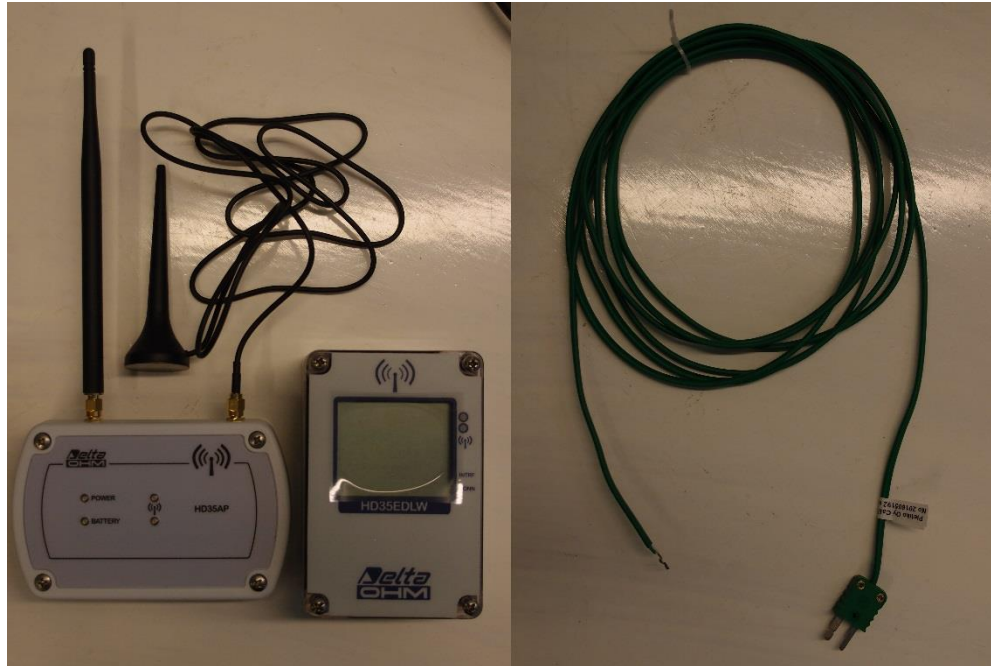
Tyyppi	PT12F 670414-2
Liitäntä	4-johdin
Mittausalue	-50...+250 °C
Tarkkuus T	$\pm(0.15 \text{ °C} + 2 \cdot 10^{-3} \cdot T \text{ [°C]})$ luokka A
tarkkuus ΔT	$\leq 0.1 \text{ K}$ ($3 \text{ K} < \Delta T < 6 \text{ K}$)
Vasteaika	8s
Kotelo	Alumiini IP66

Termoparien toiminnan perustana on ns. Seebeckin lämpösähköilmiö. Anturi koostuu kahdesta eri metallista valmistetusta langasta (kuva 16), jotka ovat yhdistetty toisesta päästä (kuumapää). Langat ovat toisesta päästä erillään ja tätä päätä kutsutaan kylmäpääksi. Kylmä- ja kuumapään välillä vallitseva lämpötilaero synnyttää metallilankoihin lämpötilaeroon verrannollisen tasajännitteen. (Pihkala 2004, 47.)



Kuva 16. Termoparianturin osat

Kohteen 2. kenttämittauksissa käytettiin K-tyyppin termopariantureita, jotka ovat yleisimmin käytetty anturityyppi (kuva 17.). K-tyyppin anturien lankamateriaali on nikkelikromi-nikkeli, anturit toimivat lämpötila-alueella -270–1370 °C (Pihkala 2004, 48). Kaikki mit-tauksissa käytetyt termoparianturit kalibroitiin Pietiko Oy:n toimesta, näin tiedetään jokaisen anturin lämpötilavirhe. Tämä pienentää antureista johtuvia mittausvirheitä.



Kuva 17. Kuvassa vasemmalla Delta Ohm -lähetin ja lämpötiladataloggeri, oikealla Pietikon termoparianturi.

5.2 Dataloggerit

Tarkan mittausdatan keräämiseen tarvitaan aina jonkinlainen dataloggeri, joka kirjaa digitaalisesti muistiin halutut suureet, virta- tai jänniteviestin sekä tarkan ajan jolloin kyseinen arvo kirjattiin muistiin. Tyypillisesti dataloggeri on joko sisäänrakennettuna esimerkiksi virtaus- tai lämpötilamittauslaitteessa, tai erillinen laite, johon voidaan kerätä dataa useimmista eri lähteistä.

Erilliset dataloggerit on varustettu liittimillä, joihin voidaan liittää antureita ja laitteista tai järjestelmistä saatavia standardiviestijä. Käyttöjännitteen nämä laitteet saavat joko pelkästään virtalähteestä tai mahdollisesta myös sisäisestä akusta. Akkujen kesto vaihtelee muutamista tunneista joidenkin yksittäistä suuretta loggaavien laitteiden vuosia kestäviin akkuihin.

Monesti dataa kerätään useammalla dataloggerilla. Tällöin luotettavan datan saamiseksi loggerien sisäiset kellot tulee synkronoida. Synkronointi voi tapahtua esimerkiksi kannettavan tietokoneen avulla.

Dataloggeri tulee olla varustettu datan loggauksen tilan ilmaisevalla valolla tai ikonilla, jotta kenttäolosuhteissa kyetään nopeasti varmistamaan onko loggaus päällä vai ei. Esimerkiksi Fluxus F601E -mittauslaitteessa on vain merkkiäni, joka antaa merkkiään aina kun data kirjataan mittauslaitteen muistiin. Molemmissa mittauskohteissa oli jonkin verran melua, joten loggauksen tilan tarkastaminen oli haastavaa.

Dataloggeria hankittaessa kannattaa varmistaa myös, että kyseisen loggerin ohjelmiston käyttöliittymä on helppokäyttöinen. Etenkin loggerin asetuksien muuttaminen, datan lataaminen tietokoneelle ja datan visualisointi tulee toimia mahdollisimman yksinkertaisesti. Työssäni käyttämät laitteet ja niiden käyttöliittymät olivat pääsääntöisesti helppokäyttöisiä. Lisäksi ennen hankintaa on hyvä selvittää kuinka monta mittauspistettä dataloggerin muistiin voi tallentaa.

6 TUTKIMUSKOHTEIDEN KENTTÄMITTAUKSET

Tutkimuksessa mitattiin Fluxus F601E -mittauslaitteen avulla lämpö- ja tilavuusvirtauksia kahden tutkimuskohteen lämmöntalteenottojärjestelmien eri vaiheissa.

Kohteen 1. kenttämittauksissa mitattiin LTO-järjestelmän tilavuusvirtausten ja lämpövirran määrää vuorokauden ajan. Mittauksen tarkoitus oli selvittää kuinka paljon lämmönsiirtimen läpi virtaa nestettä ja energiaa vuorokauden aikana, sekä miten virtaus jakautuu vuorokauden sisällä.

Kohteessa 2. mitattiin lämmöntalteenottojärjestelmän osana olevan monitoimilämpöpumpun lämmityspiirin lämpövirtoja sekä lämpöpumpun sähkökulutusta kolmen vuorokauden ajan.

6.1 Tutkimuskohteet

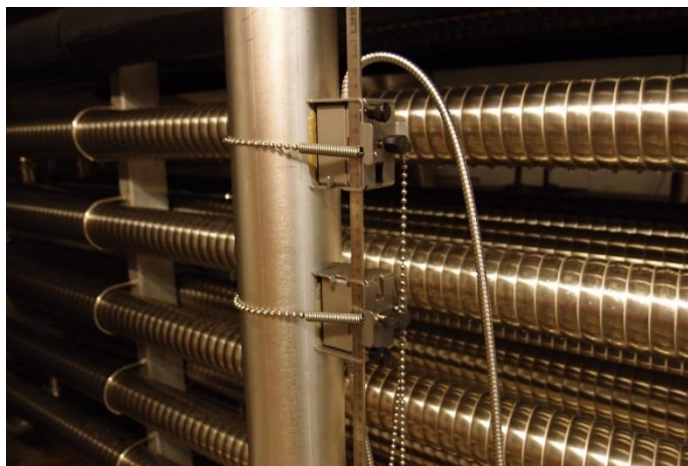
Kohteen 1. teollisuuspesulan tarvitsema höyry tuotetaan samalla tontilla sijaitsevassa polttoaineena maakaasua käyttävässä kattilalaitoksessa. Pesukoneisiin menevää vettä lämmitetään pesulan jätevedestä talteen otetulla lämmöllä. Pesukoneiden käyttämän veden optimilämpötila on noin 40 °C, tätä korkeammat lämpötilat aiheuttavat ongelmia pesuprosessille. Työtä varten suoritettuna mittauksen perusteella kyseinen LTO-järjestelmä säästää lämmitysenergiaa noin 10 MWh vuorokaudessa eli noin 2 500 MWh vuodessa.

Mittauskohteessa 2. suoritettiin energiansäästöhanke, jossa pesulan jäteveden hukkalämpö sekä pesulasta tulevan lauhteen paisuntahöyryn lämpö otettiin talteen. Paisuntahöyryn sisältämän lämmön avulla korvataan kaukolämpöä ja lämmitetään kiinteistöä ja käyttövettä. Mikäli tämän jälkeen ylimääräistä lämpöä on vielä tarjolla, sillä voidaan lämmitellä sisään tulevaa prosessivettä. Pääasiallisesti prosessivesi kuitenkin lämmitetään jätevedestä talteen otetun lämpöenergian avulla. Kiinteistön jäähdytysjärjestelmän tuottaman lämpöenergian avulla korvataan ympäri vuoden kaukolämpöä kiinteistön ja käyttöveden lämmityksessä. Jäähdytysjärjestelmään tuotetaan kylmää Finess Energyn toimittaman monitoimilämpöpumpun avulla.

6.2 Mittausvalmistelut

Molemmissa mittauskohteissa suoritettiin samanlaiset mittausvalmistelut. Ennen mittauslaitteen asentamista selvitettiin sopivat asennuspaikat virtausanturille ja kahdelle lämpötila-anturille sekä kirjattiin ylös putken tiedot (halkaisija, materiaali, seinämäpaksuus). Lisäksi valittiin sopivat yksiköt mittauksessa kerättäville muuttujille.

Tämän jälkeen anturien johdot liitettiin mittauslaitteeseen, jonka jälkeen putken ja virtaavan nesteen tiedot syötettiin laitteeseen. Seuraavaksi lämpötila-anturit asennettiin haluttuihin kohtiin putkistossa. Antureiden pintaan on hyvä laittaa kuparitahnaa, tämä parantaa lämmönjohtavuutta ja tätä kautta mittaustarkkuutta. Virtausanturi koostuu kahdesta lähettimestä, jotka asennetaan halutulle etäisyydelle toisistaan, kuten kuvasta 18 voidaan havaita. Fluxus määrittelee tämän etäisyyden annettujen lähtötietojen perusteella. Fluxuksen ohjekirjan suositusten mukaisesti kummassakin kohteessa virtausanturi asennettiin pystyputkeen, jossa virtaussuunta on ylöspäin. Antureiden pinnalle laitettiin kontaktia putkeen parantavaa geeliä. Tämä geeli on välttämätön mittausten onnistumisen kannalta. Viimeiseksi Fluxus näyttää kuinka voimakas signaali on virtausanturin kahden lähtimen välillä. Riittävä signaalin voimakkuus on kolme palkkia tai enemmän. Putken sisäpuolinen epätasaisuus ja epäpuhtaudet saattavat heikentää signaalin voimakkuutta.



Kuva 18. Virtausanturin kaksi lähetintä asennettuna paikalleen.

Edellä mainittujen toimenpiteiden jälkeen Fluxus F601E on valmis mittaamaan. Ennen varsinaisen mittauksen ja dataloggauksen aloittamista, valitaan Fluxuksen asetuksista dataloggerin muistiin tallentuvat tiedot, sekä dataloggerin mittaussintervalli. Molemmissa

kenttämittauksissa käytettiin intervaleja 10 s, 15 s ja 30 s dataloggauksen pituudesta riippuen.

6.3 Tutkimuskohteen 1. kenttämittaukset

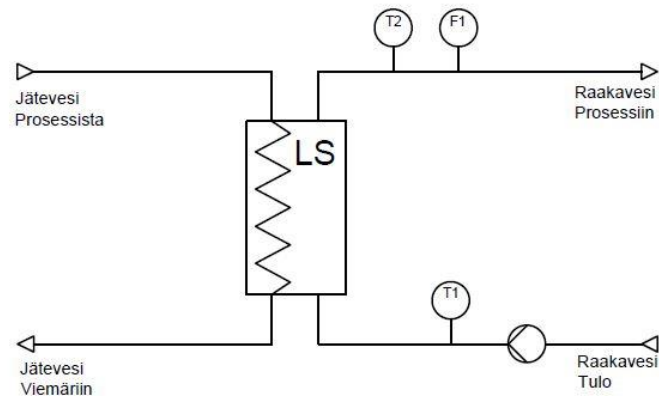
Ensimmäisen tutkimuskohteen mittaukset kestivät valmisteluineen puolitoista vuorokautta. Tänä aikana mitattiin pesulan pesuveden tarvetta sekä tarpeen sijoittumista yhden työpäivän ajan. Mittauksen tuloksia käytettiin LTO-järjestelmän optimointitapitteen määrittämiseksi. Tämän opinnäytetyön kannalta näiden mittausten tarkoituksena oli Fluxus-mittauslaitteen tutustuminen. Kuvasta 19. voidaan nähdä, että virtausanturi ja toinen lämpötila-anturi on asennettu putkeen, josta lämmöntalteenottojärjestelmässä lämmennyt vesi syötetään pesuprosessiin. Kuvassa 19. näkyvät myös putkilämmönsiirtimet, jotka lämmittävät prosessiin menevän veden. Mittauslaitteiston antureiden paikat on esitetty kuvan 20 PI-kaaviossa.



Kuva 19. Tutkimuskohteen 1. mittausjärjestelyt.

Mittausvalmisteluiden jälkeen logattiin lämpö- ja tilavuusvirtaa muutaman kerran noin 10 minuutin pätkissä, jotta saatiin selville, miten laite toimii sekä mitä tietoja tallentuu laitteen muistiin. Tämän perustella asetuksia muokattiin niin, jotta kaikki tarpeellinen tieto saatiin

talteen. Mittauksen onnistumisen kannalta tärkeitä tietoja olivat kokonaisvirtaus, kokonaislämpövirta, hetkellinen virtaus, lämpövirta ja lämpötilat. Testausmittausten aikana Fluxuksen mittausarvoja verrattiin järjestelmän kiinteiden antureiden arvoihin. Vertailtaessa arvoja todettiin, että toisen lämpötila-anturin kontakti putkeen oli huono, minkä vuoksi se näytti huomattavasti kiinteää anturia korkeampia lämpötila-arvoja. Ongelma saatiin korjattua kiinnittämällä anturi tiukemmin putken pintaan.



Kuva 20. Tutkimuskohteen 1. mittausten PI-kaavio.

Testausmittausten jälkeen dataloggeri nollattiin ja aloitettiin varsinainen mittaus. Mittaus kesti vuorokauden, jona aikana mittauslaitteen toimintaa käytiin seuraamassa sopivin väliajoin. Mittaus sujui ilman ongelmia, mittausjakson aikana LTO-järjestelmän ansiosta saatiin talteen energiaa $9340 \text{ kWh} \pm 150 \text{ kWh}$.

Mittausten jälkeen kokeilimme Fluxus-laitteen mukana tullutta seinämäpaksuusanturia. Seinämäpaksuusanturilla mitattiin laitokseen menevän kuumen käyttövesiputkiston seinämäpaksuus. Anturi liitettiin Fluxuksen keskusyksikköön, jonka jälkeen anturin pintaan laitettiin geeliä. Tämän jälkeen anturi oli valmis mittaamaan.

Anturi näytti arvoja $3,96\text{--}3,99 \text{ mm:n}$ väliltä, kun seinämäpaksuus mitattiin kahdesta kohdasta putkea. Tulosten perustella pääteltiin, että putken seinämäpaksuus on $4,0 \text{ mm}$. Ilman seinämäpaksuusanturia putken tilavuusvirtaus olisi pitänyt mitata useaan kertaan eri seinämäpaksuusarvoilla tai arvioidulla seinämäpaksuuslukemalla. Tämä lisää mittausten epävarmuutta sekä antanut virheellisiä tilavuus- ja lämpövirta-arvoja.

6.4 Tutkimuskohteen 2. kenttämittaukset

Tämän tutkimuskohteen LTO-järjestelmässä monitoimilämpöpumppu tuottaa lämpöä IV-järjestelmään ja kuumaan käyttöveteen, sekä kylmää vettä mankelisalin jäähdytysjärjestelmään. Monitoimilämpöpumpun tuottama kuuma vesi pumpataan 3 m³:n kokoiseen puskurisäiliöön, josta kuuma vesi syötetään tarpeen mukaan kiinteistön IV-lämmityspiiriin. Tarve vaihtelee kiinteistön lämmitystarpeen sekä sen mukaan, kuinka paljon pesulan lauhteen paisuntahöyryä on tarjolla.

Monitoimilämpöpumppu on italialaisen Gallettin valmistama, taulukossa 3 on esitetty kyseisen lämpöpumpun esitteestä saadut tekniset tiedot. Kyseinen lämpöpumppu koostuu kahdesta identtisestä kylmäainepiiristä, jotka tuottavat kuumaa ja kylmää vettä yhteiseen lauhduttimeen ja höyrystimeen. Kummassakin piirissä on myös puhaltimella varustetut lamellipatterit, jotka voivat toimia tilanteen mukaan joko lauhduttimena tai höyrystimenä.

Taulukko 3. LCP 164PL -lämpöpumpun tekniset tiedot.

Jäähdytystila		
Kylmäteho	153,0	kW
EER	2,59	
ESEER	3,98	
Lämmöntalteenottoila		
Kylmäteho	164,0	kW
Lämmitysteho	213,0	kW
COP	7,36	
Lämmitystila		
Lämmitysteho	179,0	kW
COP	3,3	
Muut tiedot		
Kylmäaine	R410A	

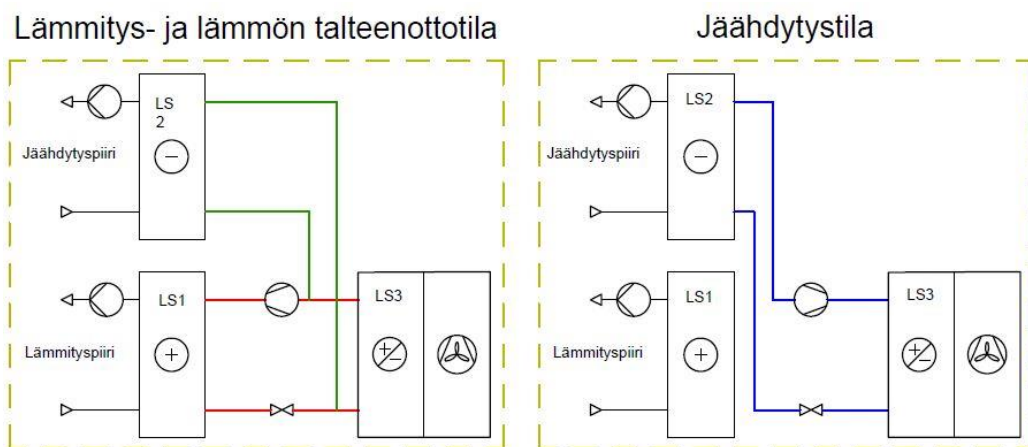
Kuvassa 21 on Gallettin valmistama monitoimilämpöpumppu, joka on asennettu teollisuuspesulan katolle. Lämpöpumpusta jäähdytys- ja lämmityspiirien putket menevät kiinteistön sisälle.



Kuva 21. Monitoimilämpöpumppu.

Monitoimilämpöpumpussa on kolme toimintatilaa, jotka on havainnollistettu kuvassa 22:

1. **Jäähdytystila:** Palaava jäähdytysvesi jäähtyy höyrystimessä, lauhduttimessa kylmäaineen lämpöenergia siirretään ulkoilmaan.
2. **Lämmitystila:** Lämpö otetaan höyrystimeen ulkoilmasta ja lauhduttimen lämpö tuottaa kuumaa vettä IV-piiriin.
3. **Lämmöntalteenotto:** Höyrystimessä tuotetaan jäähdytysvettä ja lämpö johdetaan lauhduttimen kautta IV-piiriin.



Kuva 22. Monitoimilämpöpumpun toimintatilat

Tutkimuskohteessa 2. jäädytystä tarvitaan yleensä maanantaista perjantaihin aamu-kuuden ja iltakymmenen välillä. Tämän ajan ulkopuolella monitoimilämpöpumppu toimii lämmitystilassa, eli kuten perinteinen ilmavesilämpöpumppu.

Mittaukset suoritettiin perjantain ja maanantain välisenä aikana, koska näin saimme mitausdataa sekä pesulan operoidessa, että viikonloppuna jolloin pesulakiinteistön lämmityksestä vastasi ainoastaan monitoimilämpöpumppu ja kaukolämpö. Tällä tavoin saatiin mitausdataa, kun lämpöpumppu kävi pidempiä jaksoja.

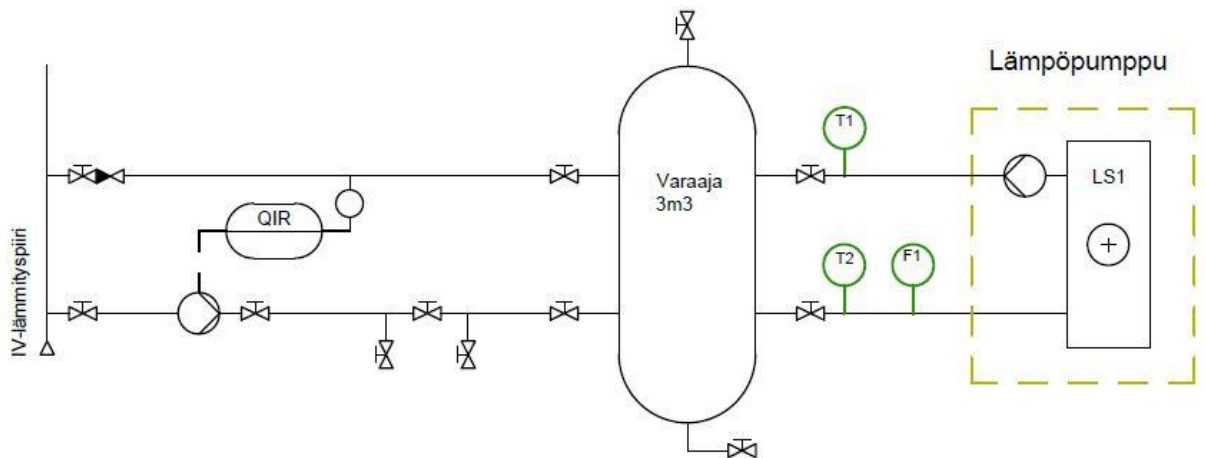
Mittausvalmisteluissa virtausanturi ja lämpötila-anturi T2 asennettiin sisätilaan lämpöpumpun lämmityslinjan paluuputkeen ja anturi T1 syöttöputkeen (kuva 24). Kuvassa 23 vasemmalla on mittauslaitteiston anturit asennettuna paikalleen, oikealla vihreä nuoli osoittaa lämpöpumpun lämmityslinjan meno- ja paluuputken sekä punainen nuoli osoittaa IV-järjestelmän lämmityslinjaan menevän ja palaavan putken.



Kuva 23. Tutkimuskohteen 2. mittausjärjestelyt.

Mittausten aluksi logattiin taas dataa muutaman minuutin jaksoissa. Tällä toimenpiteellä voitiin varmistaa, että Fluxus tallensi kaiken halutun datan. Tietokoneelle ladatun datan

perusteella päädyttiin muuttamaan ainoastaan mittausintervallia 10 sekunnista 30:een, näin saadaan kolmen päivän mittausdata varmasti mahtumaan Fluxuksen muistiin.



Kuva 24. Tutkimuskohteen 2. mittausten PI-kaavio.

Mittausvalmisteluiden jälkeen mittaukset ja datan loggaus aloitettiin ja mittauslaitteen toimintaa seurattiin hetken verran. Tämä jälkeen mittauslaite jätettiin mittaamaan viikonlopun yli. Mittausten alussa kirjattiin muistiin lämpöpumpun sähkönkulutuksen sekä varaajan jälkeisen pumpun lämpömäärän sen hetkiset lukemat. Mittausten päätyttyä data siirrettiin Fluxus F601E -mittauslaitteesta tietokoneelle.

6.4.1 Tutkimuskohteen 2. jatkomittaukset

Ensimmäisten mittausten tulosten perusteella päädyttiin toteuttamaan jatkomittaus, jossa mitattiin monitoimilämpöpumpun lämmityspiirin lämpötiloja putkiston eri kohdista. Virtausmittaus päädyttiin jättämään pois, koska mittauskohteen mitattavien putkistojen tilavuusvirrat olivat jo tiedossa edellisten mittausten perusteella. Monitoimilämpöpumpussa on vakionopeuspumppu ja myös IV-piirin Grundfos-pumppu toimii vakionopeudella. Grundfos-pumpun tilavuusvirtaus saatiin selville pumpun ohjelmistosta.

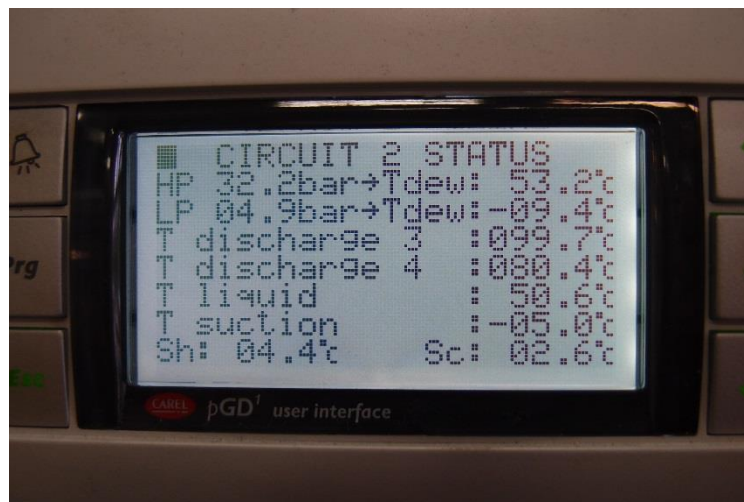
Putkessa virtaavan nesteen lämpötilan mittaamiseksi päätettiin hankkia lämpötila-anturit ja lämpötila-arvoja tallentavat dataloggerit. Lämpötilaloggereista pyydettiin tarjous Stig Wahlströmiltä ja Pietiko Oy:ltä. Tarjousten hinnat vaihtelivat 500 euron ja 1000 euron

välillä, riippuen ominaisuuksista ja laitteista. Molempien yritysten mittauslaitteet olivat dataloggereita, joihin liitettiin termoparilämpötila-anturit.

Hankkimaan päädyttiin Pietiko Oy:n tarjoamat Delta Ohm -mittauslaitteet monipuolisempien ominaisuuksien ja antureiden kalibrointipalvelun johdosta. Lisäksi Pietiko Oy:n toimitilojen läheinen sijainti vaikutti ostopäätökseen; näin mahdollisesti tarvittava tekninen tuki on lähellä. Delta Ohm -laitteisto koostui keskusyksiköstä, kahdesta maksimissaan neljää lämpötila-anturia tukevasta loggerista sekä neljästä termoparianturista.

Mittaukset toteutettiin elokuussa, ja niissä mitattiin kolmen vuorokauden ajan meno- ja paluuviesien lämpötilat sekä Grundfos- että lämpöpumpppuieristä. Näiden kolmen vuorokauden ajalta kirjattiin myös lämpöpumpun sähkönkulutus ja Grundfos-pumpun tiedot (lämpövirta, tilavuusvirta ja käyntitunnit).

Lauantaipäivällä kirjattiin muutaman tunnin ajan myös monitoimilämpöpumpun ohjauspaneelista (kuva 25.) lauhduttimeen tulevan ja lähtevän veden lämpötila, mitkä kompressorit olivat käynnissä, tuottiko lämpöpumppu myös jäähdystystä vai toimiko se kuten ilmavesilämpöpumppu. Näiden tietojen lisäksi kirjattiin ylös muutamia lämpöpumppuprosessin höyrystymis ja lauhtumislämpötiloja.



Kuva 25. Monitoimilämpöpumpun ohjauspaneeli.

Jatkomittaukset onnistuivat ilman ongelmia. Kerätty data ladattiin Delta Ohmin -ohjelmiston avulla, ja siirrettiin Exceliin.

7 MITTAUSTULOKSET

Tutkimuskohteen 2. ensimmäisissä mittauksissa saatiin Fluxus-mittauslaitteesta tarpeeksi dataa, jonka avulla voitiin arvioida monitoimilämpöpumpun toimintaa ja kyseisen mittausjärjestelmän soveltuvuutta tämän kaltaisiin mittauksiin. Varsinaiset mitaustulokset sekä tulosten tarkastelu on esitetty vain toimeksiantajalle toimitetussa salatussa liitteessä 3. Jatkotutkimuksissa kerätyn datan avulla, pystyttiin varmentamaan ensimmäisten mitausten tulosten luotettavuus.

7.1 Mittausten virhetarkastelu

Jokaiseen mittaukseen vaikuttaa tietyn suuruinen mittausepävarmuus. Tässä luvussa käydään läpi, miten tutkimuskohteen 2. mittauksien mittausepävarmuudet tunnistettiin ja laskettiin. Varsinaiset mitaustulokset sekä niiden mittausepävarmuusarvot on esitetty liitteessä 3.

Mittaustulosten analysointi aloitettiin määrittelemällä tutkimuskohteen mitausten mitausvirheet, sekä ne tekijät, jotka aiheuttavat mittausepävarmuutta. Mittauksissa syntyvät virheet voidaan jakaa kolmeen eri luokkaan: karkeaan, systemaattiseen ja satunnaiseen virheeseen.

Karkea virhe voidaan sulkea pois, mikäli mittauslaite on asennettu oikein ja siihen syötetyt parametrit ovat oikeat. Mittauksien karkean virheen pois sulkemiseksi toimittiin seuraavalla tavalla:

1. Mittauspisteet valittiin niin, että siitä aiheutuu mahdollisimman vähän häiriötä mittaukseen.
2. Virtauslähettimet asennettiin oikean paikkaan ja oikealle etäisyydelle toisistaan.
3. Mittauslaitteeseen asetettiin oikeat parametrit (putken koko, seinämäpaksuus, karkeus, väliaine).
4. Lämpötila-anturit asennettiin ohjeiden mukaisesti.

Systemaattinen virhe syntyy, mikäli mittauslaite ei ole kalibroitu, kalibroimaton mittauslaite näyttää virheellisiä lukemia. Kaikissa tutkimusmittauksissa käytetyissä kannettavissa mittauslaitteissa oli voimassa oleva kalibrintodistus. Näin ollen voidaan olettaa, ettei mittautulokseen vaikuttavaa merkittävää systemaattista virhettä ole syntynyt.

Vaikka mittauslaite on kalibroitu, aiheuttaa se pienen satunnaisen virheen. Sen suuruus on yleensä ilmoitettu mittauslaitteen tiedoissa. Esimerkiksi Fluxus F601E -mittauslaitteessa tämä oli $\pm 1,6$ %:a normaaleissa kenttämittausolosuhteissa.

Mittausvirheiden lisäksi mittauksissa syntyy mittausepävarmuutta, joka saattaa olla vaikeampi arvioida. Tutkimuskohteen 2. mittauksissa mittausepävarmuutta aiheuttivat seuraavat tekijät:

1. Veden ominaisuuksien muutokset
2. Antureiden asennukset
3. Mittarilukemien kirjaaminen
4. Mittarilukemien kirjaamisajankohtien ero
5. Tulosten siirtäminen tietokoneelle
6. Tulosten muokkaaminen

Lopullinen mittausepävarmuus laskettiin kaavassa 3 ilmoitetun satunnaisten mittausvirheiden ja mittausepävarmuuden yhdistetyn mittausepävarmuuskaavan avulla:

$$u = \sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_b^2 + \sigma_c^2}$$

Kaava 3. Mittausepävarmuuden määrittäminen (Ehder & al 2005, 24 muokattu).

Tutkimuskohteen 2. mittausepävarmuuden määrittäminen oli hyvin hankalaa, ja tässä tehtiin oletus, että Fluxus F601E:n $\pm 1,6$ %:n suhteellisen virheen ja lämpöhäviöstä syntyvien mittausvirheiden lisäksi mittautuloksiin vaikutti ± 5 %:n mittausepävarmuus. Kaavan 3. avulla laskettiin mittausepävarmuudet Fluxus-mittauslaitteelle, sähkönkulutusmittarille ja Grundfos-pumpulle. Nämä mittausepävarmuuslukemat on esitetty liitteessä 3.

8 PÄÄTELMÄT

Monitoimilämpöpumpun toiminnan tutkiminen osoittautui haastavaksi osittain pesulan LTO- ja IV-järjestelmien monimutkaisuuden takia, sekä monien mittaukseen vaikuttavien muuttuvien tekijöiden johdosta. Suurimpina muuttujina olivat ulkolämpötila, pesulan IV-järjestelmän asetusarvojen muutokset sekä joidenkin arvojen puute.

Jotta monitoimilämpöpumpun toimintaa voidaan kehittää tai arvioida luotettavasti, tulee mittausjakson olla huomattavasti tämän työn mittausjaksoa pidempi. Tämän lisäksi tarvitaan dataa monitoimilämpöpumpun kylmäpuolen virtauksista ja lämpövirroista. Lisäksi lämpöpumpun sähkönkulutuksen ja lämmöntuotannon seurantaan tulee hankkia data-loggeri, jotta lämpöpumpun COP-arvoja voidaan laskea eri vuodenaikoina vaihtelevien ulkolämpötilojen vallitessa.

Työn aikana suoritettujen mittausten perusteella monitoimilämpöpumpun ei voida olettaa toimivan valmistajan ilmoittamalla COP-arvolla. Myös lämpöpumpun toiminnan kehittämiseen tai tarkempaan tutkimiseen kyseinen mittausdata on riittämätön.

Kannettavan clamp on -mittauslaitteiston soveltuvuus jätevesiputkistojen lämpövirtojen ja -energioiden mittaamiseen oli työni toinen tärkeä tutkimuskohde. Mittausten onnistumisen ja luotettavuuden kannalta katsottuna tärkeitä on, että mittaukseen käytetty laite tai laitteet toimivat oikein sekä soveltuvat mittauskohteen mittaamiseen.

Työssäni mitattiin niin puhtaita kuin jätevettä sisältäviä putkistoja. Jätevesiputkistot joiden virtausmääriä työssäni tutkittiin, olivat pesulan jätevesiputkistoja, jotka sisältävät pääasiassa nukkaa ja hiekkaa. Mittauksissa ei laskettu tai tutkittu näiden jätevesien kiintoainepitoisuuksia. Työni aikana läpi käymieni jätevesien sisältämiä kiintoainepitoisuuksia käsitelleiden tutkimusten ja oppimateriaalien perusteella voidaan olettaa, että mittauskohteen kiintoainepitoisuus oli luokkaa 0,1–0,5 %. Suurin osa markkinoilla olevista clamp on -virtausmittareista kykenee mittaamaan maksimissaan noin 5 % kiintoainetta sisältäviä putkistoja. Suurimmassa osassa potentiaalisista lämmöntalteenotto kohteista ei oletettavasti tiedetä mikä on virtaavan nesteen kiintoainepitoisuus, joten tämä tulee olemaan haaste mittaamisen kannalta. Yksi potentiaalinen jatkotutkimuksen kohde on clamp on -virtausmittarin tutkiminen vaihtelevia kiintoainepitoisuuksia sisältävissä vesissä.

Mittauslaitteiston hankintaan vaikuttavia tekijöitä ovat mittaustarkkuuden lisäksi hinta, helppokäyttöisyys, yhteensopivuus muiden laitteiden kanssa sekä etäluenta. Varsinkin pienelle yritykselle clamp on -virtausmittareiden korkea hinta nostaa hankintakynnystä. Jotta virtausmittarin hankinta on kannattavaa, tulee sen käyttöaste olla korkea ja yritykselle syntyvä rahallinen hyöty helposti todennettavissa. Mittauslaitteiston avulla voidaan kuitenkin suunnitella optimaalisempia järjestelmiä ja näin lisätä lämmön talteenoton kannattavuutta. Yhtä tai useampaa mittauslaitetta hankittaessa tuleekin arvioida mitkä ovat hankintakriteerit eli onko tulevaisuudessa esimerkiksi tarve mitata muita väliaineita kuin vettä.

Helppokäyttöisyys on todella tärkeässä roolissa mittauslaitteiston hankintaa mietittäessä. Mitoituskohteiden mittaukset tulee pystyä suorittamaan yhden henkilön voimin niin, että laitteiston asentaminen on mahdollisimman nopeaa ja helppoa. Työssäni käytetty Fluxus F601E:n yksi heikkous oli virtauslähettimien ja lämpötila-antureiden hankala asentaminen. Tämän ongelman voi kuitenkin ratkaista hankkimalla omaan käyttötarkoitukseen parhaiten soveltuvan lähettimien ja antureiden kiinnityssysteemin.

Jos mittauslaitteisto koostuu useammasta laitteesta, nousee laitteiden mittausdatan synkronointi suureen rooliin datan luotettavuuden ja mittausepävarmuuden näkökulmasta. Suurin osa markkinoilla olevista laitteista voidaan synkronoida esim. yhden tietokoneen kellon mukaan, jolloin kaikkien laitteiden data on mahdollista yhtenäistää. Tämä ei kuitenkaan aina estä sitä, että eri mittauslaitteet keräävät datan epäyhtenäisesti. Mittauksia valmistellessa tuleekin varmistua siitä, että eri mittauslaitteet kirjaavat mittauslukemat samanaikaisesti, suuremman mittausepävarmuuden välttämiseksi.

Työssäni toteutettujen mittausten perusteella voidaan todeta, että kannettava clamp on -mittauslaitteisto soveltuu hyvin varsinkin jätevesille, joissa on varsin pieni kiintoainepitoisuus. Suoritettujen mittausten perusteella ei voida päätellä, mikä on clamp on -mittauslaitteiden tarkkuus jätevesisovelluksissa verrattuna kiinteisiin mittareihin. Mittaustarkkuuden määrittämiseksi tulee suorittaa laboratoriomittaus kontrolloiduissa olosuhteissa. Voidaan kuitenkin olettaa, että mitä suurempi kiintoainepitoisuus on, sitä epäluotettavammaksi varsinkin virtausmittaus muodostuu.

Insinööriyöni ei onnistunut vastaamaan kaikkiin tavoitteissa määritettyihin kohtiin. Varsinkin monitoimilämpöpumpun optimaalisen toiminnan todentaminen jäi avoimeksi, ja se vaatii lisätutkimusta. Lisätutkimuksissa voidaan mitata lämpöpumpun tuottamia lämpövirtoja ja sähkönkulutusta esimerkiksi syys- ja huhtikuun välisenä aikana.

9 POHDINTAA

Kokonaisuutena insinöörityöni oli laaja ja haastava, osasin kuitenkin rajata teoriaosuiden sisältämään tarpeellisen taustatiedon työni onnistumisen kannalta. Hankalin osuus työssäni olikin mittausten suunnittelu ja toteutus. Hankaluuksista huolimatta kiinnostukseni käsittelemääni aiheeseen sekä haluni kehittää tietämystäni ja asiantuntijuuttani lämmöntalteenotosta kasvoi prosessin aikana.

Varsinkin tutkimuskohteen kaksi LTO-prosessi oli itselleni aluksi hankala hahmottaa. Onnistuneiden mittausten vaatiman datan määrittäminen oli todella haastavaa. Varsinkin mahdottomuus vertailla mittaustuloksia muiden tekemiin tutkimuksiin teki mittaustulosten arvioinnista ongelmallista. Samanaikaisesti työ opetti sen, että jopa onnistuneisiin mittauksiin liittyy aina epävarmuus, jonka merkitys mittaustuloksiin tulee osata arvioida.

Työni aikana opin erityisesti siitä, mitkä tiedot ovat valideja mittausten kannalta sekä miten toteuttamalla mittauksista tulee mahdollisimman luotettavat. Lisäksi syvensin tietämystäni lämmön talteenotosta ja laitehankintojen tekemisestä.

LÄHTEET

- Asikainen, S. 2000. Clamp on -ultraäänivirtausmittareilla tehtävät mittaukset pienissä vesiputkissa. Viitattu 15.5.2016. http://www.mit.tut.fi/projektitekstit/Vesta/Vestan_raportti.pdf
- Blue-White Industries, Ltd. 2015. Mounting Location for your Digi-Meter Paddlewheel Flowmeter. Viitattu 8.3.2016. <http://blue-white.com/service-support/frequently-asked-questions-2/#toggle-id-8>
- Dairy and Food Engineering 2013. Tubular heat exchanger. Viitattu 8.3.2016. <http://ecoursesonline.iasri.res.in/mod/page/view.php?id=124071>
- Ehder, T. 2005. Kemian metrologian opas. Helsinki: Metrologian neuvottelukunta
- Euroopan komissio 2015. Eurooppa 2020 – tavoitteet. Viitattu 26.2.2016. http://ec.europa.eu/europe2020/europe-2020-in-a-nutshell/targets/index_fi.htm
- Fercher GmbH 2016. Fercher FB-4/S. Viitattu 25.5.2016. http://www.fercher.at/de/kanalwaermetauscher_kanal_waermetauscher.html
- Fercher GmbH 2016. Fercher AWT-924. Viitattu 25.5.2016. http://www.fercher.at/de/waermetauscher_schwimmbad_therme_spa.html
- Flexim 2015. Technical Specification FLUXUS F601. Viitattu 21.3.2016. http://www.flexim.com/sites/default/files/public_downloas/tsfluxus_f601v1-7-2en_lru.pdf
- Greyline instruments inc. 2015. Two Technologies for Flow Measurement from Outside a Pipe. Viitattu 18.3.2016. <http://www.greyline.com/twotechnologies.htm>
- Hakala, P. & Kaappola, E. 2007. Kylmälaitosten suunnittelu.2., tarkastettu painos Helsinki: Opetushallitus.
- Heikkilä, I.; Huumo, M.; Hyytiä, H.; Seitsalo, P. & Siitonen, S. 2008. Paras käytettävissä oleva tekniikka (BAT) Teollisuuden energiatehokkuus. Helsinki: Suomen ympäristökeskus.
- Heikkilä, I & Kiuru, T. 2014. Ylijäämälämmön taloudellinen hyödyntäminen Ylijäämälämpöenergia-analysit. Helsinki: Motiva Oy.
- HSYa 2016. Kaatopaikkakaasun kierrätys. Viitattu 26.4.2016. <https://www.hsy.fi/fi/asiantuntijalle/jatehuolto/jatteenkasittelykeskus/kaatopaikkakaasu/Sivut/default.aspx>
- HYSb 2016. Viikinmäen ORC-laitteisto. Viitattu 29.11.2016.
- Huber technology2016. Huber heat exchanger RoWin. Viitattu 25.5.2016. <http://www.huber.de/products/energy-from-wastewater/huber-heat-exchanger-rowin.html>
- Hundy, G.; Trott, A. & Welch, T. 2008. Refrigeration and Air-Conditioning. Oxford. Elsevier Ltd.
- Industrial Heat Pumps 2016. How it works. Viitattu 11.2.2016 http://www.industrialheatpumps.nl/en/how_it_works/
- Kataikko, M & Maaskola, I. 2014. Ylijäämälämmön taloudellinen hyödyntäminen Lämpöpumppuja ORC-sovellukset. Helsinki: Motiva Oy.
- Koski, P. & Lappalainen, I. 2005. Energiatehokkuutta ja säästöä ESCO-palvelu – vaivaton ja varma tapa säästää. Helsinki: Motiva Oy. Viitattu 9.3.2016. http://www.motiva.fi/files/8016/Energiatehokkuutta_ja_saastoa_ESCO-palvelu_vaivaton_ja_varma_tapa_saastaa.pdf

Kothandaraman, C.P. 2006. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. 3., tarkastettu painos. New Delhi: New Age International (P) Ltd.

Laitinen, A. 2016. Kylmäaineiden käytölle rajoituksia – R404 poistuu käytöstä. Viitattu 23.11.2016. http://jaahallit.vtt.fi/jaahallipaivat2016/jhp2016_VTT_AL.pdf

L 527/2014. Ympäristönsuojelulaki. Viitattu 25.2.2016. <http://www.finlex.fi>, ajantasainen lainsäädäntö.

PG&E 2015. F601 application note. Viitattu 24.11.2016. <http://www.pge.com/includes/docs/pdfs/about/edusafety/training/pec/toolbox/tll/appnotes/Flexim%20F601%20application%20note.pdf>

Pihkala, J. 2004. Prosessisuureiden mittaustekniikka. 2., uudistettu painos. Helsinki: Opetushallitus.

Pihkala, J. 2013. Prosessitekniikka – prosessiteollisuuden yksikkö- ja tuotantoprosessit. 1., painoksen muuttumaton lisäpainos. Helsinki: Opetushallitus.

Porkka, A. 2013. Matalalämpöisen hukkalämmön hyödyntäminen kaukolämmön tuotannossa. Viitattu 24.11.2016. <https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/97025/nbnfi-fe201306144032.pdf?sequence=2>

Rakennustieto 2014. Käymäläjärjestelmät. Helsinki: Rakennustieto Oy. Viitattu 10.3.2016. https://www.rakennustieto.fi/material/attachments/5f1PeDhrH/wUR4I9Skd/RTS14_31_ohje-eh-dotus.pdf

Salminen, A. 2011. Vesitalous. Jäteveden lämmön hyötykäyttö - uusiutuvan energian käyttöä vai energian säästöä? Helsinki: Ympäristöviestintä YVT Oy.

Separation Equipment Company, Inc 2016. Plate Heat Exchanger. Viitattu 8.3.2016. <http://www.separationequipment.com/products-tl10-plate-heat-exchanger.html>

Seppänen, O. 2001. Rakennusten lämmitys.2., päivitetty painos. Helsinki: Suomen LVI-liitto ry.

Schmid, F. 2008. Sewage water: In interesting heat source for heat pumps and chillers. SwissEnergy Agency for Infrastructure Plants. Switzerland. Viitattu 17.3.2016. http://www.bfe.admin.ch/php/modules/publikationen/stream.php?extlang=en&name=en_508290240.pdf

Tekes 2013. Lämpöenergiaa jätevedestä - katsaus nykytilanteeseen ja mahdollisuuksiin.

Thermac Engineering 2016. Therm-X. Viitattu 25.5.2016 <http://thermacgroup.com/products/aco-engineering/therm-x/>

Tukes 2014. Uusi F-kaasuasetus tuo rajoituksia kylmäaineiden käyttöön. Viitattu 23.11.2016. <http://www.tukes.fi/fi/Ajankohtaista/Tiedotteet/Kylmalaiteliikkeit/Uusi-F-kaasuasetus-tuo-rajoituksia-kylmaaineiden-kayttoon/>

Turboden 2016. Heat Recovery Units. Viitattu 22.4.2016. <http://www.turboden.eu/en/products/products-hr.php>

YIT Teollisuus- ja verkkopalvelut Oy 2010. Teollisuuden ylijäämälämmön hyödyntäminen kaukolämmityksessä. Viitattu 23.3.2016. http://energia.fi/sites/default/files/teollisuuden_ylijaamalammon_hyodyntaminen_kaukolammityksessa_yit2010.pdf

Ympäristöministeriö 2016. Suomen rakentamismääräyskokoelma. Viitattu 26.2.2016. http://www.ym.fi/fi-Fi/Maankaytto_ja_rakentaminen/Lainsaadanto_ja_ohjeet/Rakentamismaarayskokoelma

Mittauslaitteisto vertailu

Yritys	Mittauslaite	Hinta (€)	Putkikoko (DN)	Lämpötila-alue	Loggerin tiedot (mittapisteeet, koko)	Akun kesto (h)	Virtausmittausen määrä	Max. kiintoaine-pitoisuus	Seinänapaksuusmittaus	SP-mittarin hinta (€)	Hinta SP-anturilla	Muuta lisätietoa
Hyx Oy	Dynasonics TFX Ultra +	6845,0	50-610	0-100°C	Max. 1GB	Ei akkua, tarvitsee 230V	2 kpl	?	Eriellinen mittauslaite	250	7095,0	Ilman GSM-modulia hinta 5945€. GSM-moduli on integroitu.
Kouvo Automation Oy	Fuji Potaflo-C	7900,0	50-1200	(-40)-120°C	258MB	12	1 kpl	< 5 %	Ei lisäanturia	250	8150,0	Hinta ilman seinänapaksuus anturia. PT100 varten adapteri.
Tecalemit Flow Oy	Krohne optisonic 6300P	8445,0	15-150 tai 50-250	(-40)-120°C	150 000, 14MB	14	2kpl (vaatii 2 kiskoa, identtiset*)	≤ 5%	Ei lisäanturia	250	8695,0	Virtausin saa samasta I/O-boxista kuin lämpötilat.
Oy Säätiö Ab	Kobold DJC-MP100D00	7200,0	32-4000	(-40)-150°C	4GB	5	1kpl (kiinteä malli 2kpl)	< 2 %	Kyllä (Isäanturi)	1290	8490,0	4-20mA virtaus suoraan mittarista.
Finnpri Oy	GE transport PT878	8280,0	50-600	(-40)-150°C	100000, -	9-11	1 kpl	< 5 %	Kyllä (Isäanturi)	587	8867,0	101€ kaapeli josta 4-20mA viesti vaikka GSM-moduulin.
Autrol Oy	ULTRAFLEX UF-801P	7857,0	20-250	(-40)-120°C	133 353 (3 suuretta), 4MB	14	1kpl (UF 801-PB 2kpl)	Riippuu kiintoaineen tyypistä	Kyllä (Isäanturi)	1246	9103,0	SP-anturi Malli: SE-1701BT/50, mA moduli, hinta 286€
Sarin Oy	Dynasonics DXN-PEESN	9720,0	50-2000	(-40)-120°C	1GB	9	1kpl (doppler tai ultraääni)	?	Kyllä (Isäanturi)	250	9970,0	
SWOY/Hantor-Mittaus	Fluxus f601 E	9361,0	50-3400	(-40)-130°C	100000, -	14 (power pack 160h)	2kpl (tämä malli 2x virtaus 1x lämpö)	< 10 %	Kyllä (Isäanturi)	1663	11024,0	Tulee 2.3 esittelemään virtausmittauksen.
	* Molempien kiskojen tulee olla joko small tai medium.											
	NDT-Tukusta erillinen mittari.											

Lämmöntalteenottolaite- ja järjestelmätoimittajat

Yritys	Lisätietoa ja mahd. tuotemerkit	Ratkaisu	Maa
<i>Aco Engineering</i>	Therm-X lämmönsiirtimet	Lämmönsiirtimet	Tanska
<i>Biofludes environnement</i>		LTO-järjestelmä	Ranska
<i>BMS-Energietechnik AG</i>	Jätevesi putkilämmönsiirtimet	Lämmönsiirtimet	Sveitsi
<i>Fercher</i>	FB- ja AWT-lämmönsiirtimet	Lämmönsiirtimet/ LP-ratkaisut	Itävalta
<i>Friotherm AG</i>	Kaukolämpö ja -kylmä lämpöpumput (Katri Vala)	Lämpöpumput	Sveitsi
<i>Hansgrohe SE</i>	Pontos Heat Cycle	Lämmönsiirtimet	Saksa
<i>HLK Consulting GmbH</i>	Yritys suunnittelee mm. jäteveden LTO-järjestelmiä	LTO-järjestelmien suunnittelu	Sveitsi
<i>Huber</i>	ThermWIN ja roWin tuotteet	LTO-järjestelmien suunnittelu	Saksa
<i>International Wastewater Systems</i>	SHARC HP ja HX	LTO-järjestelmä	Kanada
<i>Kemco Systems</i>	LTO-järjestelmät pesuloihin.	LTO-järjestelmä	Yhdysvallat
<i>Ochsner</i>	LTO-järjestelmissä käytetty lämpöpumppujen valmistaja	Lämpöpumput	Saksa
<i>Oilon</i>	Chillheat ja Scancool	Lämpöpumput	Suomi
<i>Oy Christeyns Nordic Ab</i>	Suunnittelee mm pesuloiden LTO-laitteistoja.	Lämmönsiirtimet	Suomi
<i>Oy Ecolab Ab</i>	Suunnittelee mm pesuloiden LTO-laitteistoja.	Lämmönsiirtimet	Suomi
<i>Pemco Oy</i>		Lämpöpumput	Suomi
<i>Polarsol Oy</i>	Jäteveden LTO:n suunniteltuja lämmönsiirtimiä	Lämmönsiirtimet	Suomi
<i>PriiEnergia</i>	Jätevesi lämmönsiirrin konsepti	Lämmönsiirtimet	Viro
<i>Swegon</i>	Valmistaa monitoimilämpöpumppuja	Lämpöpumput	Ruotsi
<i>Thermal Engeenerin of Arizona</i>	LTO-järjestelmä (SYSTEM 2000)	LTO-järjestelmä	Yhdysvallat
<i>Thermowatt Ltd.</i>	LTO-järjestelmät viemäreihin	LTO-järjestelmä	Unkari
<i>UHS GmbH</i>	Putkilämmönsiirtimet ja jäteveden LTO-laitteistot	LTO-ratkaisut / lämmönsiirtimet	Saksa
<i>Vahterus Oy</i>	Plate & Shell lämmönsiirtimet (Snellman Pietarsaari)	Lämmönsiirtimet	Suomi
<i>Wasenco Oy</i>	LTO-säiliö/lämmönsiirrin	Lämmönsiirtimet	Suomi
<i>Wavin-Labko Oy</i>	LTO-lämmönsiirrin	Lämmönsiirtimet	Suomi