

Opinnäytetyö (AMK)

Insinööri | LVI-tekniikka

2022

Aleksi Elomäki

ILMA-VESILÄMPÖPUMPUN SULATUSENERGIAN MÄÄRITTÄMINEN

TURKU AMK 
TURKU UNIVERSITY OF
APPLIED SCIENCES

Opinnäytetyö (AMK) | Tiivistelmä

Turun ammattikorkeakoulu

Tekniikan insinööri, monimuotokoulutus | LVI-tekniikka

2022 | 58 sivua, 3 liitesivua

Alexi Elomäki

ILMA-VESILÄMPÖPUMPUN SULATUSENERGIAN MÄÄRITTÄMINEN

Yhä enemmän lämmitysjärjestelmien valinnassa suositaan lämpöpumppuja, joista ilma-vesilämpöpumppu on potentiaalinen valinta. Erityisesti silloin, jos tontilla energiakaivojen tekeminen on kallista tai syystä tai toisesta mahdotonta. Tämän työn kohteena on uusi kolmikerroksinen kerrostalo, johon lämmitysmuodoksi on valittu ilma-vesilämpöpumppujärjestelmä. Tavoitteena on selvittää yhden ilma-vesilämpöpumpun ulkoyksikön sulatukseen kuluvan energian osuus tuotetusta energiasta sekä tämän rahallista-arvoa. Lisäksi etsiä ja tarkastella sääolosuhteiden vaikutuksia sulatusenergian määrään.

Ilma-vesilämpöpumpun ulkoyksikön sähkönkulutusta, kumulatiivista lämpöenergian tuottoa ja tehon arvoja on mitattu ja tallennettu syksystä 2021 lähtien. Lisäksi työhön otettiin mukaan ajanjakson sääolosuhteet Turun Artukaisten ilmatieteen laitoksen mittauspisteeltä. Lämmitysjärjestelmän tietoja on mitattu minuutin välein ja ilmatieteenlaitoksen näytteitä on otettu kymmenen minuutin välein. Työssä on käytetty yli 700000 mitattua arvoa, jotka ovat olleet erillisissä CSV-tiedostoissa. Näitä arvoja on yhdistelty ja muokattu helposti käsiteltävään muotoon Python -ohjelmointikielellä ja viety käsittelyn jälkeen Excel-tiedostoksi, jossa varsinainen analysointi on suoritettu erilaisin kaavioin.

Suoraan sulatukseen kului 4,6 % tuotetusta lämmitysenergiasta. Kun otetaan huomioon sulatusajalta tekemätön lämpöenergia, niin tämä osuus on 28,8 %. Sulatusenergian määrään todettiin olevan jonkinlainen yhteys ulkoilman absoluuttisen kosteuden määrään sekä lämpötilaan, mutta lähinnä näiden vaihteluiden osalta. Absoluuttisen kosteuden lisäksi tarkasteluun otettiin mukaan ulkoyksikön höyrystimen lämpötila. Höyrystimen sisällä virtaavan ilman lämpötilaa vastaava maksimiabsoluuttisen kosteuden ja ulkoilman absoluuttisen kosteuden muutoksella todettiin olevan parempi yhteys sulatusenergiaan kuin pelkällä absoluuttisen kosteuden määrällä.

Asiasanat:

Ilma-vesilämpöpumppu, sulatusenergia, sulatusjakso

Bachelor's / Master's Thesis | Abstract

Turku University of Applied Sciences

Mechanical engineering | HVAC engineering

2022 | 58 pages, 3 pages in appendices

Aleksi Elomäki

DEFINING THE DEFROST ENERGY OF THE AIR-TO-WATER HEAT PUMP

Choosing heating systems, heat pumps are preferred, among which an air-to-water heat pump is a potential choice. The target of this work is a new three storey apartment building, for which an air-to-water heat pump system has been selected as the heating system. The aim is to find out the share of energy consumed for the defrosting energy of one outdoor unit of an air-to-water heat pump in the energy produced and the monetary value of this unit. In addition, look for and review the effects of weather conditions on the amount of melting energy.

The electricity consumption, cumulative heat energy output and power values of the air-to-water heat pump outdoor unit have been measured and recorded since autumn 2021. In addition, weather conditions during the period were included at the measurement point of the Artukainen Meteorological Institute in Turku. Heating system data has been measured every minute and samples from the meteorological institute have been taken every ten minutes. Over 700000 measured values have been used in the work, which have been in separate CSV files. These values have been combined and modified into an easily processed format in the Python programming language and analyzed using various graphs.

Direct defrosting consumed 4.6 % of the heating energy produced. Considering the thermal energy that has not been made from the thawing time, this proportion is 28.8 %. There was found to be some relation to the amount of melting energy to the absolute amount of moisture as well as temperature. In addition to absolute humidity, the temperature of the evaporator in the outdoor unit was included in the review, whereby the change in the maximum absolute humidity inside the evaporator and the absolute humidity of the outside air was found to have a better relationship with defrosting energy than absolute humidity alone by quantity.

Keywords:

Air-to-water heat pump, defrosting energy, defrost phase

Sisältö

| | |
|---|-----------|
| 1 Johdanto | 9 |
| 2 Toimintaympäristö | 11 |
| 2.1 Tausta | 12 |
| 2.2 Tiedonkeruu | 12 |
| 2.3 Tavoite | 13 |
| 3 Ilma-vesilämpöpumpun toiminta | 14 |
| 3.1 Kylmäprosessi | 14 |
| 3.1.1 COP | 18 |
| 3.2 Sulatusvaihe | 19 |
| 3.2.1 Passiivinen sulatus | 19 |
| 3.2.2 Aktiivinen sulatus | 20 |
| 3.3 Ilma-vesilämpöpumpun komponentit | 20 |
| 3.3.1 Kompressori | 20 |
| 3.3.2 Lauhdutin | 21 |
| 3.3.3 Varaajat | 22 |
| 3.3.4 Paisuntaventtiili | 22 |
| 3.3.5 Höyrystin | 23 |
| 3.4 Kytkentäkaavio ja säätötekniikka | 24 |
| 4 Sulatusenergian määrittäminen ja riippuvuudet sääolosuhteisiin | 27 |
| 4.1 Datan käsittely | 28 |
| 4.1.1 Sulatusdatan tunnistaminen ja suodatus | 29 |
| 4.2 Vuorokausikohtaisten keskiarvojen laskenta | 30 |
| 4.2.1 Absoluuttisen kosteuden laskenta | 33 |
| 4.2.2 Lopputulos | 36 |
| 4.3 Sääolosuhteiden vaikutukset sulatusenergiaan | 37 |
| 4.3.1 Ulkoilman Lämpötila | 37 |
| 4.3.2 Sulatusenergian riippuvuus lämpötilasta | 38 |
| 4.3.3 Ilman kosteus | 39 |

| | |
|--|-----------|
| 4.3.4 Sulatusenergian riippuvuus ilmankosteuteen | 41 |
| 4.4 Sulatusenergiaa kuvaava mallifunktio | 44 |
| 5 Sulatusenergian vaikutukset COP-arvoon | 48 |
| 5.1 Sulatusenergia | 49 |
| 5.2 Tuotettu energia | 50 |
| 5.3 COP | 51 |
| 5.4 Energiajakauma | 52 |
| 6 Yhteenveto | 55 |
| Lähteet | 57 |

Liitteet

Liite 1. Mitattujen tietojen yhdistäminen ja sulatusenergian laskenta

Kaavat

| | |
|---|----|
| Kaava 1. Höyrystimen teho (Aittomäki 2012). | 16 |
| Kaava 2. Kompressorin teho (Hakala & Kaappola 2005). | 17 |
| Kaava 3. Lauhduttimen teho (Hakala & Kaappola 2005). | 17 |
| Kaava 4. Lämpökerroin (Hakala & Kaappola 2005). | 19 |
| Kaava 5. Siirtyvän lämpöenergian laskeminen (Inkinen & Tuohi 2006). | 30 |
| Kaava 6. Wattien muuttaminen kilowattitunneiksi. | 31 |
| Kaava 7. Tehon muuttaminen energiaksi (Inkinen & Tuohi 2006). | 32 |
| Kaava 8. Absoluuttisen kosteuden kaava (Inkinen & Tuohi 2006). | 34 |
| Kaava 9. Ihannekaasun tilanyhtälö (Inkinen & Tuohi 2006). | 35 |
| Kaava 10. Absoluuttisen kosteuden kaava (Aittomäki 2012). | 35 |
| Kaava 11. Absoluuttisten kosteuksien muutos. | 41 |
| Kaava 12. Sulatusenergian määrä absoluuttisten kosteuksien muutoksen funktiona. | 42 |
| Kaava 13. Maksimiabsoluuttisen kosteus ulkolämpötilan funktiona. | 44 |

| | |
|---|----|
| Kaava 14. Höyrystimen lämpötila ulkolämpötilan funktiona. | 45 |
| Kaava 15. Absoluuttisten kosteuksien muutos ilman suhteellisen kosteuden ja ulkoilman lämpötilan funktiona. | 45 |
| Kaava 16. Sulatusenergian määrä ulkolämpötilan ja suhteellisen kosteuden funktiona. | 46 |

Kuvat

| | |
|--|----|
| Kuva 1. Myydyt lämpöpumput vuosittain (Suomen lämpöpumppuyhdistys 2021). | 11 |
| Kuva 2. Virheprosentin kuvaaja. (Saint-Gobain Oy 2021). | 13 |
| Kuva 3. Universaali log p,h -piirustus (Trott 2008). | 15 |
| Kuva 4. Kylmäkierron pääkomponentit. (Trott 2008). | 17 |
| Kuva 5. Kierrukkakompressorin toiminta. (Trott 2008). | 21 |
| Kuva 6. Tiivistetyn levylämmönsiirtimen toimintaperiaate (Alfa laval n.d). | 22 |

Kuviot

| | |
|--|----|
| Kuvio 1. Ulkoyksikön sulatusenergian ja ulkoilman lämpötila. Vasemman Y-akselin arvot kertovat punaisen kuvaajan sulatukseen kuluvan vuorokautisen energian määrän ja oikealla y-akselilla on sinisen kuvaajan lämpötila-asteikko, joka kuvaa sen hetkistä ulkoilman lämpötilaa. | 38 |
| Kuvio 2. Sulatusenergian kulutus lämpötilan funktiona. Y-akselilla on sulatusenergia ja x-akselilla ulkoilman lämpötila. Korrelaatio eli selityskerroin on suhteessa polynomifunktioon, joka on merkitty kuviossa katkoviivalla. | 39 |
| Kuvio 3. Vuorokausikohtainen sulatusenergia ja ulkoilman absoluuttisen kosteuden määrä. Vasen y-akseli kuvaa sulatusenergian määrää ja oikea y-akseli sinisten palkkien, eli absoluuttisen kosteuden määrää. | 40 |
| Kuvio 4. Sulatusenergian määrä, jossa toissijaisilla akseleilla on ulkoilman lämpötila ja suhteellinen kosteus. Vihreä kuvaaja esittää sulatusenergian määrää, jonka asteikko on vasemmalla. Sininen kuvastaa suhteellista kosteutta, | |

| | |
|---|----|
| jonka asteikko on oikealla nollan yläpuolella. Punaisella on ilman lämpötila ja lämpötila-asteikko on oikealla nollan alapuolella. | 40 |
| Kuvio 5. Sulatusenergian ja ulkoilman absoluuttisen kosteuden kaavio. Y-akselilla on vuorokauden keskimääräinen sulatusenergia ja x-akselilla on vuorokauden keskimääräinen absoluuttinen kosteus. Kolmannen asteen polynomifunktio on esitetty katkoviivalla ja tämä kuvaa pisteiden riippuvuutta toisiinsa. | 43 |
| Kuvio 6. X-akselilla on kuvattu absoluuttisen ilmankosteuden ja höyrystimen sisällä virtaavan ilmanlämpötilaa vastaava maksimiabsoluuttisen kosteuden muutosta (g/m ³). Höyrystimen sisällä virtaavan ilman lämpötilaa on arvioitu lamellien sekä ulkoilman keskilämpötilana. Nollapisteeksi valittiin se piste, jossa höyrystimeltä lähtevän ilman absoluuttinen kosteus on yhtä suuri kuin ympäröivän ilman maksimiabsoluuttinen kosteus. Muutos kertoo karkeasti lamellien pinnoille tiivistyneen veden määrästä. Positiivinen arvo viittaa, että kosteutta on tiivistynyt paljon ja negatiivinen arvo, että vähän. Y-akselilla on sulatukseen käytetty vuorokausikohtainen sulatusenergia. Toisen asteen polynomifunktion selityskertoimeksi tuli lähes 86 %. | 43 |
| Kuvio 7. Sulatusenergian riippuvuus suhteellisen kosteuden ja ilman lämpötilan muutoksien seurauksena. | 46 |
| Kuvio 8. Ulkoyksikön sulatusenergian osuus tuotetusta lämmitysenergiasta, mikä on esitetty z-akselilla. | 47 |
| Kuvio 9. Kumulatiivisten energioiden kehittyminen mittausjakson aikana. | 48 |
| Kuvio 10. UVLP-1 kumuloituva energian kulutus mittausjaksolta. | 49 |
| Kuvio 11. Kumuloituva sulatusenergia mittausjaksolta. | 50 |
| Kuvio 12. Ilma-vesilämpöpumpun tuottama energia mittausjakson aikana. Katkoviiva on pisteiden keskiarvoa kuvaava viiva. | 51 |
| Kuvio 13. Sulatusenergian, sähkönkulutuksen sekä höyrystimeltä saadun energian osuudet ulkoyksikön tuottamasta energiasta, joka oli 34436 kWh. | 53 |
| Kuvio 14. Sulatusenergian, sähkön kulutuksen, höyrystimeltä saadun energian sekä sulatusajalta tekemättä jääneen energian osuudet ulkoyksikön tuottamasta energiasta, joka oli 34436 kWh. | 54 |

Taulukot

| | |
|--|----|
| Taulukko 1. Ilma-vesilämpöpumpun ja ilmatieteen laitoksen tietojen yhdistäminen. | 29 |
| Taulukko 2. Tietojen yhdistämisen, suodattamisen ja sulatustehon laskemisen lopputulos. Sulatusteho, suhteellinen kosteus ja ilman lämpötila on vuorokauden keskiarvoja. Päivämäärien kellonaika on kyseisen vuorokauden viimeinen hetki, jolloin laite on luovuttanut lämpöenergiaa ulos. | 33 |
| Taulukko 3. Absoluuttinen ilmankosteus (Engineering Toolbox 2008). | 34 |
| Taulukko 4. Ilman kosteuksien laskenta ja lisääminen tiedostoon. | 36 |
| Taulukko 5. Energia-arvot mittausjaksolta. | 48 |

1 Johdanto

Rakennusten ylläpitokustannuksista yksi merkittävin on lämmitys. Ekologisuuden kannalta on tärkeää valita rakennukseen ympäristöystävällinen ja kestävä lämmitysmuoto. Suoran sähkölämmityksen sijaan lämpöpumput ovat olleet haluttuja hyvän hyötysuhteensa vuoksi. Tällöin ostetulla sähköenergialla voidaan saada moninkertaisesti lämpöenergiaa rakennukseen. Ilma-vesilämpöpumpun lämmönlähteenä toimii ulkoilma, jolloin Suomen talviset olosuhteet aiheuttavat ulkoyksiköiden jäätymistä ja tämän vuoksi pumppuihin tai järjestelmiin on asennettu sulatusjärjestelmä. Tämän seurauksena, joudutaan aika ajoin siirtämään lämpöenergiaa rakennuksen sisältä ulos, niin kauan kunnes ulkoyksikkö pystyy taas tuottamaan lämpöenergiaa. Sulatusvaiheen aikana ulkoyksikkö ei luonnollisesti tuota lämpöenergiaa rakennukselle. Sulatukseen kuluva energian määrä tai tämän osuutta lämmitysenergiasta harvoin esitetään lämpöpumppu -esitteessä. Työ pohjautuu nimenomaan siihen kysymykseen, mikä on tämän energian osuus ilmavesilämpöpumpun ulkoyksikön tuottamasta energiasta ja millaisista energiakustannuksista tässä on kyse. Lisäksi pohdinnan alla on myös se, kuinka kauan sulatusjakso kestää vuorokaudessa tai talven aikana ja kuinka paljon lämpöenergiaa jää tämän vuoksi tekemättä. Ulkoyksiköiden sulatustarpeeseen vaikuttaa epäilemättä sääolosuhteet, kuten ilmankosteus ja lämpötila. Kuitenkaan näiden riippuvuutta itse sulatusenergiaan ei täysin tunneta. Työn tavoite on löytää sääolosuhteiden vaikutuksia sulatusenergiaan ja mahdollisesti löytää keino, jolla tätä voisi arvioida.

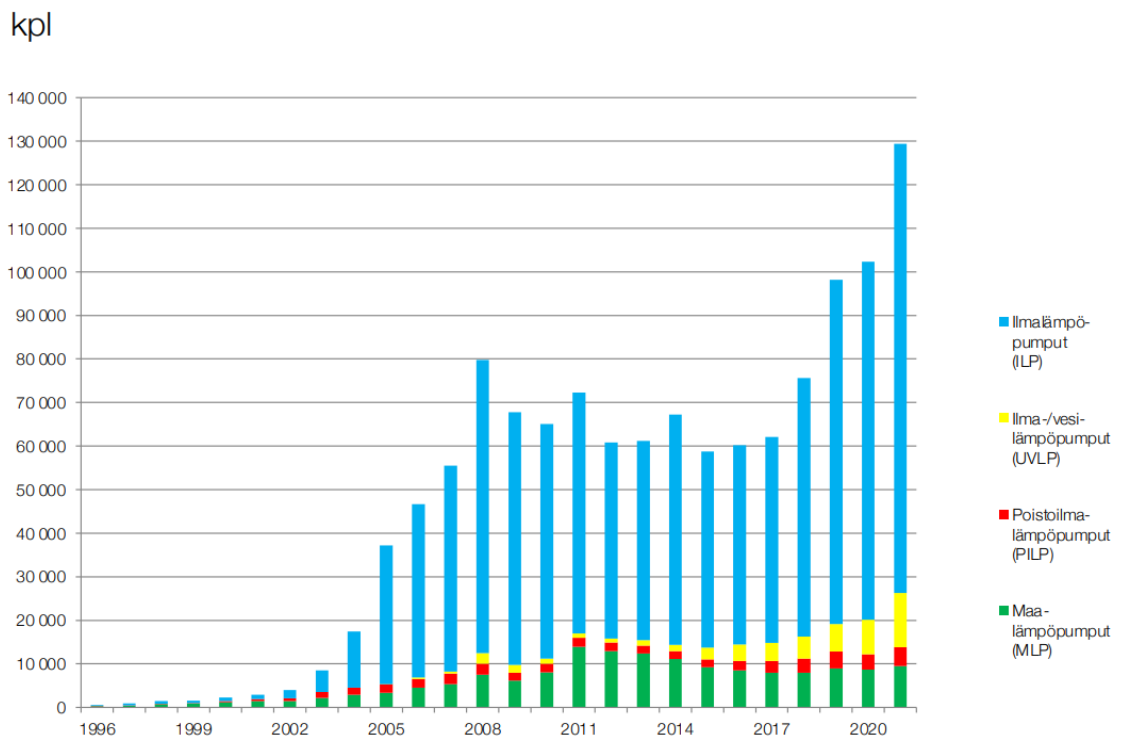
Työssä käsitellään ilmavesilämpöpumpun toimintaperiaatetta sekä mittausvälineistöä, jolla kyseiset tiedot on kerätty. Tietoja sääolosuhteista ja ilmavesilämpöpumpun toiminnasta on kerätty viiden kuukauden ajan. Kappaleessa 4 on kuvattu menetelmää, jolla tietoja on yhdistelty ja muokattu helpommin käsiteltävään muotoon sekä käytettävien tietojen keskiarvojen laskenta. Tuotetun tai menetetyt energioiden määrät on esitetty osa-alue kerrallaan kuvaajien ja taulukoiden muodossa sekä sääolosuhteiden riippuvuuksia sulatusenergiaan

pistekaavioilla ja 3D-funktioilla. Lopuksi tulokset on yhdistetty rinnakkain, josta voi havaita energiamääriä, joita kuluu esimerkiksi ulkoyksikön toimintaan ja sulatukseen. Hyötysuhteilla on havainnollistettu, millainen olisi ilma-vesilämpöpumpun ulkoyksikön hyötysuhde, mikäli sulatustoiminnolle ei olisi tarvetta.

2 Toimintaympäristö

Tänä päivänä yhä useammin uudisrakentamisessa tai saneerauskorjauksen yhteydessä mietitään tarkasti kiinteistön lämmitysjärjestelmän valintaa. Öljyn, kaukolämmön ja sähkön hinnan nousun sekä ympäristöystävällisyyden kannalta päädytään usein harkitsemaan lämpöpumppujärjestelmiä. Maalämmön yleistyessä, myös ilmavesilämpöpumppu -ratkaisut ovat kasvaneet merkittävästi (Kuva 1). (Suomen Lähienergialiitto ry 2019.)

Tämän työn kohteena on nykyaikainen kolmikerroksinen kerrostaloyhtiö, jonka lämmitysjärjestelmäksi on valikoitunut ilma-vesilämpöpumppu. Suomen talviset sääolosuhteet aiheuttavat ulkoyksiköiden jäätymistä ja tämän myötä lämmitysjärjestelmällä tuotetun energiantehokkuuden heikkenemistä. Ulkoyksiköiden määrä vaihtelee luonnollisesti kiinteistön lämmitystarpeen mukaan, mutta intuitiivisesti voi ajatella, että ulkoyksiköiden määrä on suoraan verrannollinen sulatusenergian määrään.



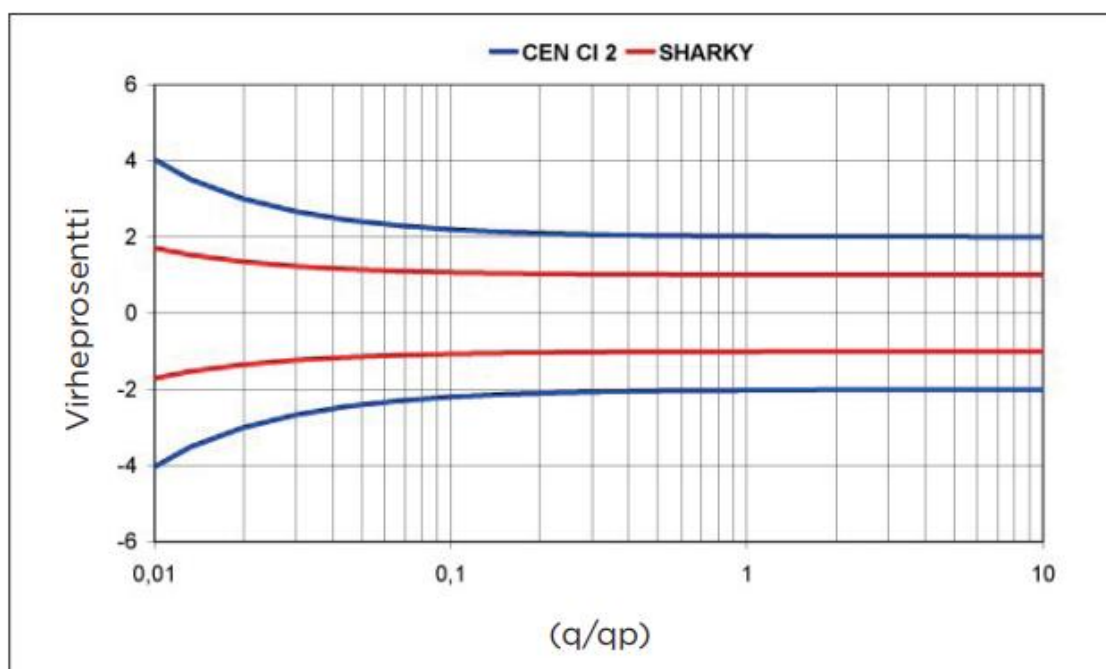
Kuva 1. Myytyt lämpöpumput vuosittain (Suomen lämpöpumppuyhdistys 2021).

2.1 Tausta

Taloyhtiön toimesta Turun ammattikorkeakoulu on saanut tutkimushankkeen ilma-vesilämpöpumpun toiminnasta. Tarkoituksena on tutkia järjestelmän eri vaiheiden lämpövirtoja ja luoda näistä asiakkaalle energia-analyysi. Tämän johdosta voidaan mahdollisesti nykyisen järjestelmän kytkentöjä muokata tämän kohteen edun mukaisesti ja käyttää saatuja tietoa myös tulevaisuudessa uudisrakentamisen lämmitysjärjestelmän valinnoissa. Lämmitysjärjestelmä on yhteydessä Grafanan visualisointiverkkosovellukseen, josta pystyy seuraamaan live -tietoja mittareista sekä keräämään datatietoja pitkältä aika väliltä.

2.2 Tiedonkeruu

Dataa on kerätty vuoden 2021 syksystä alkaen kaikista ulkoyksiköistä Saint Gobainin Sharky 775 -yhdistelmäenergiamittareilla, jotka mittaavat veden massavirrasta sekä meno- ja paluueden lämpötilasta laitteiston tehon ja juoksevan energiatuoton. Mittareiden tarkkuusluokka kuuluu valmistajan mukaan luokkaan 2 mittausalueella 1:100. Suhdeluku kertoo minimivirtaaman osuuden nimellisvirtaamasta. Tässä kohteessa on DN 32 ja nimellisvirtaama 3,5 m³/h eli minimivirtaama on 3,5 l/h Virheprosenttia voidaan tarkastella kuvan 2 avulla, jossa q on mitattu virtaama ja q_p on nimellisvirtaama. (Saint-Gobain, 2021.) Suhteellisen kosteuden ja lämpötilan arvot otettiin Turun Artukaisten ilmatieteenlaitoksen mittauspisteen datatiedoista ja sovitettiin ne kyseiseen ajankohtaan. Sähköenergia on mitattu Carlo Gavazzi EM330 3V 5 A -energiamittareilla, joissa käytetään ModBus RTU protokollaa (Carlo Gavazzi n.d.).



Kuva 2. Virheprosentin kuvaaja. (Saint-Gobain Oy 2021).

2.3 Tavoite

Tämä opinnäytetyö keskittyy yhteen tämän tutkimushankkeen osa-alueeseen, jossa selvitetään kerätyn datan avulla sulatukseen kuluvan lämmitysenergian osuus ja ulkolämpötilan sekä ilmankosteuden vaikutuksia ilma-vesilämpöpumpun ulkoyksikön sulatustehoon. Tiedoista pyritään saamaan aikaiseksi kuvaajia, joista selviää, että kuinka paljon lämmitysjärjestelmä tuotti lämpöenergiaa mittausjakson aikana ja kuinka iso siivu siitä menee ulkoyksikön sulatukseen sekä arvioida hukatun energiamäärän rahallista-arvoa. Lisäksi tarkastellaan saatujen arvojen vaihtelevuutta syys-, talvi- ja kevät kuukausina. Tavoitteena on saada käytettävää tietoa Turun ammattikorkeakoulun tutkimushankkeen energia-analyysiin.

3 Ilma-vesilämpöpumpun toiminta

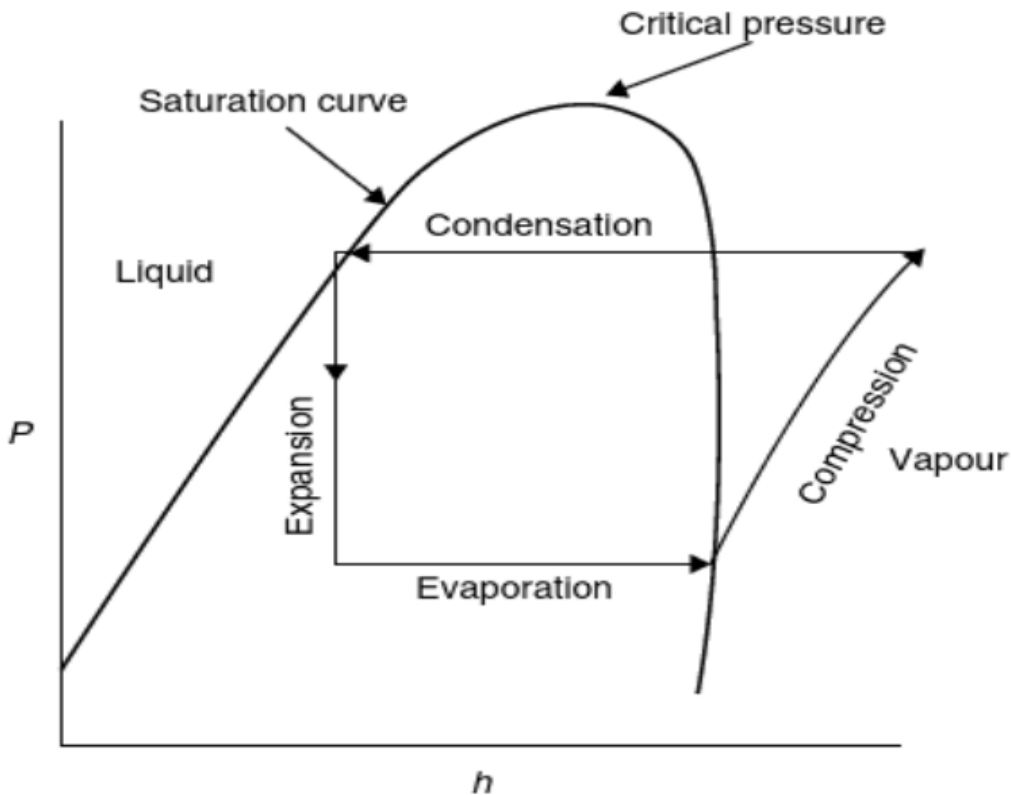
Ilma-vesilämpöpumppujen (IVLP/UVLP) toiminta perustuu ilmasta kerätyn lämpöenergian siirtämiseen lämmitys- ja käyttöveteen. Ilma-vesilämpöpumppu on energiatehokas ja hyvä vaihtoehto, jos maapiirien tai lämpökaivojen tekeminen on erityisen kallista tai jopa mahdotonta toteuttaa. Lämmönsiirto ulkoilmasta veteen tapahtuu kylmäkiertoprosessin avulla, jossa ulkoilma lämmittämää kylmäaineen höyryksi ja tämän jälkeen se puristetaan korkeaan lämpötilaan ja näin mahdollistetaan lämmönsiirtyminen kylmäaineesta lämmityspiirin veteen. Lämmitysteho romahtaa kovilla pakkasilla ja tämän vuoksi tyypillisesti suositellaan hybridi -mallia, eli toista lämmitysmuotoa tehostamaan tai korvaamaan ilma-vesilämpöpumpun lämmitysjärjestelmän toimintaa kovimmilla pakkasilla. Ilma-vesilämpöpumppujen kylmäkoneistotyypit voidaan karkeasti jakaa kahteen toimintatapaan. Ensimmäisessä tavassa kylmäkierto on jaettu sisä- ja ulkoyksikölle, mikä kierrättää vain kylmäainetta näiden kahden yksikön välillä. Toisessa tavassa kaikki kylmätekniikka on keskitetty ulkoyksikölle ja lämmityspiirin vesi käy ulkoyksikössä lämpenemässä. Tämän työn käsittelemässä järjestelmässä lämmityspiirin vesi kiertää ulkoyksikön kautta ja kylmäaine kiertää vain ulkoyksikössä, eli puhutaan monoblock -laitteesta. (Motiva Oy 2022.)

3.1 Kylmäprosessi

Kylmäkierto koostuu neljästä reversiibelistä prosessista, joilla hallitaan kylmäaineen sisäenergiaa. Näitä prosesseja kuvataan kylmätekniikassa log p,h -tilapiirroksilla (kuva 3). Jokaiselle kylmäaineelle on oma ominainen log p,h -kuvaaja, missä x-akselilla on entalpia ja y-akselilla on absoluuttinen paine. Lisäksi piirroksessa on myös fluidin ominaistilavuus, lämpötila- ja entropiakäyrät. Y-akselin arvot on esitetty logaritmisessa-asteikossa. (Kaappola ym. 2011, 17–

18.)

Kierto alkaa höyrystimisestä, jossa kylmä matalapaineinen kylmäaine höyrystetään kaasuksi. Käytännössä höyrystin on lämmönsiirrin, joka siirtää



Kuva 3. Universaali log p,h -piirustus (Trott 2008).

ulkoilmasta lämpöä kylmäaineeseen puhaltimen säätelmänä. Tässä järjestelmässä kylmäaineena käytetään R410A, jonka kiehumispiste on $-51,4\text{ °C}$ (Engineering Toolbox 2005). Pitkin höyrystintä kylmäaine alkaa muuttua olomuotoaan höyrymäiseksi lämpötilan ollessa vakio. Höyrystimen alussa se on kylläistä nestettä, lopussa kylläistä höyryä ja keskivaiheilla jotain siltä väliltä. Höyrystynyt kylmäaine tulistuu höyrystimessä ja sitä voidaan vielä tulistaa lisää höyrystimen ja kompressorin välisessä imuputkessa erilaisin menetelmin. Tulistuksella tarkoitetaan höyryn lämmittämistä vielä kylläisen höyrykäyrän jälkeen. Tällä saavutetaan suurempi lauhduttimelta saatava teho ja ennen kaikkea varmistetaan, että kompressorille ei päädy kylmäaineen pisaroita. Mäntäkompressorin päätynyt neste voi aiheuttaa vaurioita kompressorille. (Kaappola ym. 2011, 26–30.) Höyrystimeltä saatava teho riippuu kylmäaineen

massavirrasta sekä höyrystimen prosessin aloitus h_1 ja lopetus h_2 -pisteiden entalpia eroista, eli:

$$\Phi_H = m_v(h_1 - h_4)$$

$\Phi_H =$ Höyrystimen teho [kW]

$m_v =$ massavirta $\left[\frac{kg}{s}\right]$

$h_1 =$ entalpia pisteessä 1 $\left[\frac{kJ}{kg}\right]$

$h_4 =$ entalpia pisteessä 4 $\left[\frac{kJ}{kg}\right]$

Kaava 1. Höyrystimen teho (Aittomäki 2012).

Kompressorille imetty kylläinen höyry puristetaan ja, kun kaasua puristetaan, tämän paine ja lämpötila kasvaa voimakkaasti. Kompressorin tekeä siis työtä höyrylle. Kompressorilta saatava teho voidaan laskea kylmäaineen massavirran sekä puristusta edeltävän ja sen jälkeisestä entalpia eroista kaavalla:

$$\Phi_K = m_v(h_2 - h_1)$$

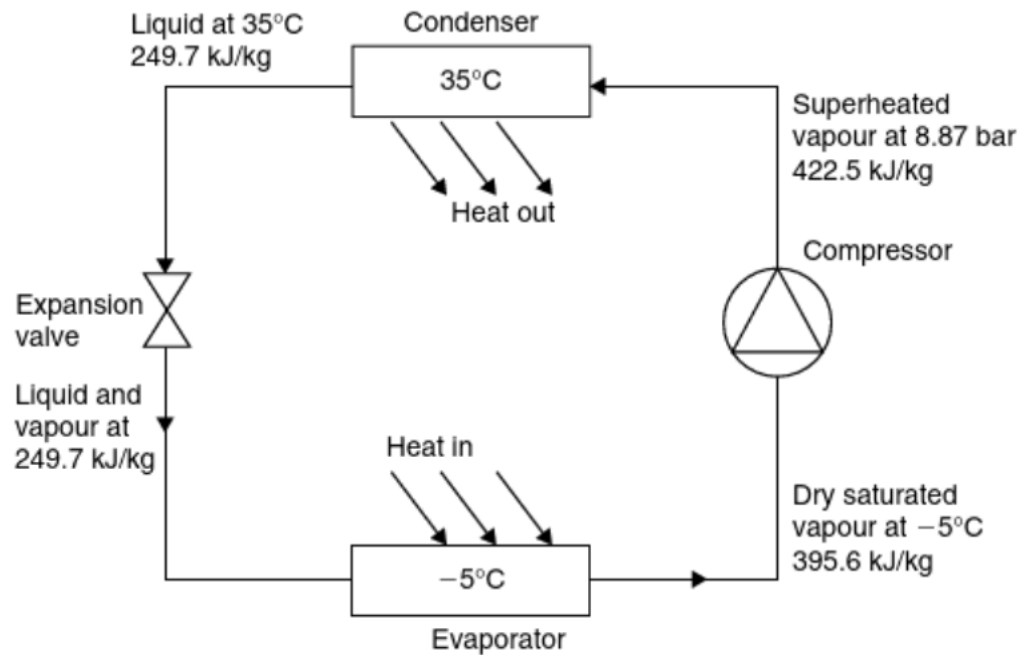
$\Phi_K =$ Kompressorin teho [kW]

$m_v =$ Kylmäaineen massavirta $\left[\frac{kg}{s}\right]$

$h_2 =$ Entalpia piste ennen puristusta $\left[\frac{kJ}{kg}\right]$

$h_1 =$ Entalpia piste puristuksen jälkeen $\left[\frac{kJ}{kg}\right]$

Kaava 2. Kompressorin teho (Hakala & Kaappola 2005).



Kuva 4. Kylmäkierron pääkomponentit. (Trott 2008).

Energiaperiaatteen mukaisesti energiaa ei katoa, eli lauhduttimelta saatu lämmitysteho on näiden kahden summa:

$$\Phi_L = \Phi_K + \Phi_H$$

$\Phi_L =$ Lauhduttimen teho [W]

$\Phi_K =$ Kompressorin teho [W]

$\Phi_H =$ Höyrystimen teho [W]

Kaava 3. Lauhduttimen teho (Hakala & Kaappola 2005).

Kompressorilta tuleva kuumakaasu viedään lauhduttimelle, joka siirtää tuotetun lämpöenergian lämmitettävään veteen. Kahden nesteen välisissä lämmönsiirrossa käytetään yleensä levylämmönsiirrintä. Alkuvaiheessa lauhduttimessa kylmäaineesta poistuu tulistus, eli lämpötila laskee kylläisen

höyryn tasapainokäyrälle. Tämän jälkeen kylmäaine lauhtuu ja luovuttaa edelleen lämpöenergiaa muuttamalla olomuotoaan höyrystä nesteeksi lämpötilan ollessa vakio. Kun kylmäaineen sisäenergia on laskenut kylläisen nesteen käyrälle, on kaikki kylmäaine muuttunut takaisin nesteeksi. Tyypillisesti lauhdutusta jatketaan vielä kylläisen nestekäyrän jälkeen, jolloin kylmäaine alijäähtyy. Tällä toimenpiteellä varmistetaan, ettei kylmäaineen joukossa ole mittavissa määrin kaasukuplia, jotka häiritsevät paisuntaventtiilin toimintaa, mutta myös tehostetaan lauhduttimen toimintaa, eli lämpöenergian siirtymistä. (Trott 2008, 53–61.) Paisuntaventtiilin tehtävä on säädellä kylmäaineen massavirtaa korkeapaine puolelta matalapaine puolelle. Kun paisuntaventtiili kuristaa venttiiliä, putoaa kylmäaineen paine ja tämän myötä lämpötila putoaa rajusti, kuitenkin siten, että entalpia pysyy vakiona. Paisuntaventtiili siis säätelee kylmäaineen ruiskutusta säädetyin tulistuksen perusteella. Paisunnan jälkeen kylmäainekierto alkaa alusta. (Kaappola ym. 2011, 28–29.)

3.1.1 COP

Lämpöpumppujen tehokkuutta kuvataan lämpökertoimella, eli COP-arvolla (Coefficient Of Performance). Ilma-vesilämpöpumpun COP-arvo kertoo, kuinka suuri osa sen siirtämästä lämpöenergiasta on peräisin ulkoilmasta suhteessa kompressorin tuottamaan lämpöenergiaan. Lämpökertoimeen vaikuttaa lamellien keräämä lämpöenergia kylmäaineeseen ja lämpöpumpun kompressorin kuluttama sähköenergia. (Hakala & Kaappola 2005, 10.) Tämän voi laskea suoraviivaisesti jakamalla lauhduttimelta saatu teho kompressorin teholla:

$$COP = \frac{Q_L}{Q_k}$$

COP = Lämpökerroin

Q_L = Lauhduttimen teho [W]

Q_k = Kompressorin teho [W]

Kaava 4. Lämpökerroin (Hakala & Kaappola 2005).

3.2 Sulatusvaihe

Höyrystimen lamellien pintojen laskiessa alle 0 °C, alkaa ulkoilman kosteus härmistymään lamellien pinnoille. Jäätymiseen vaikuttaa höyrystimen lamellijako, ulkoyksikön sijainti sekä höyrystymislämpötila. Jäätymisen alkuvaiheessa jääkiteet kasvattavat lamellien pinta-alaa, joka kasvattaa höyrystimen lämmönsiirtokerrointa ja tämän myötä teho kasvaa. Kuitenkin jääkerroksen paksuuntuessa, alkaa jää tukkimaan lamellivälejä. Tämä aiheuttaa painehäviön kasvun ja ilman tilavuusvirran pienenemisen, jolloin höyrystimen teho alkaa laskea rajusti. Kertynyt jää lisää myös ulkoyksikön massaa ja tämä voi aiheuttaa putoamisvaaran, mikäli kiinnityksessä ei ole huomioitu jään muodostumista. Edellä mainittujen seikkojen vuoksi ulkoyksikkö pitää aika ajoin sulattaa. Sulatusmenetelmiä voidaan jakaa passiiviseen ja aktiiviseen sulatukseen. (Aittomäki 2012, 181.)

3.2.1 Passiivinen sulatus

Ulkolämpötilan ollessa yli neljä celsiusastetta, niin voidaan antaa höyrystimen sulaa ulkolämpötilan lämpöenergialla, eli puhutaan luonnollisesta sulatuksesta. Sulatusjaksolla järjestelmä sulkee nesteputken magneettiventtiilillä, jolloin kylmäaineen virtaus höyrystimelle estyy. Kompressori imee höyrystimeltä kylmäaineen pois, jonka jälkeen kompressori pysähtyy. Ulkoyksikön puhallin pyörii koko sulatusjakson ajan tehostaen sulatusta. Luonnollinen sulatus on energiatehokkaampi kuin kuumakaasusulatus, koska sulatuksessa ei käytetä lämmityspiirin lämpöenergiaa. Ulkoyksikkö ei tuota sulatusjaksolla yhtään lämpöenergiaa ja tuottamaton energiamäärä on pois asunnon tai käyttöveden lämmityksestä. (Aittomäki 2012, 181–182.)

3.2.2 Aktiivinen sulatus

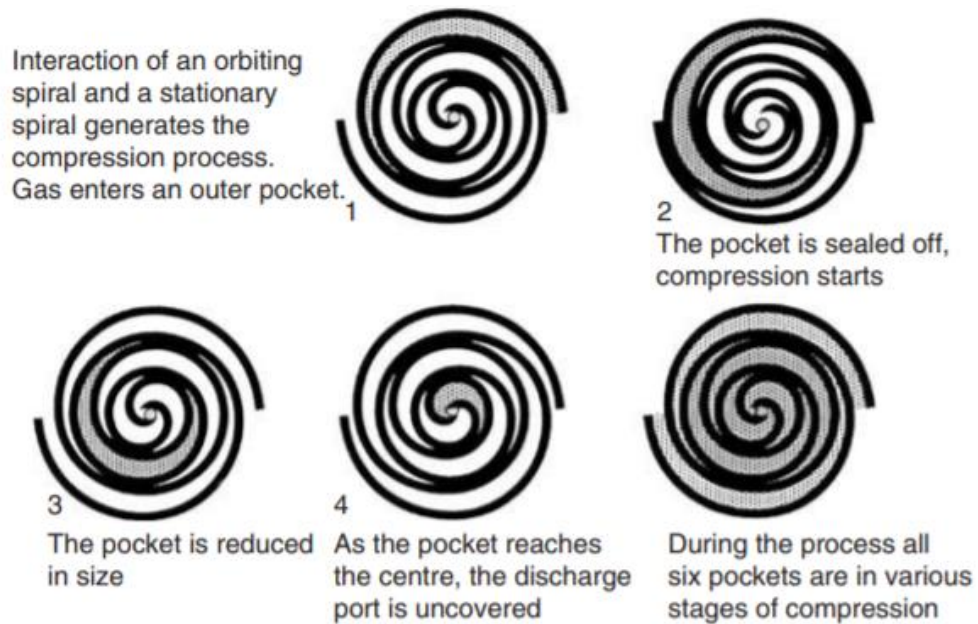
Luonnollisen sulatuksen lisäksi voidaan käyttää myös aktiivista sulatusta, jolloin kylmäainekierto tapahtuu käänteisesti. Kylmäaine absorboi lämpöenergiaa lauhduttimessa olevasta lämmityspiirin vedestä. Kuumakaasu johdetaan höyrystimelle, josta lämpöenergia siirtyy lamelleihin ja sulattaa jään. Normaalissa tilanteessa ulkoyksikön puhallin on poissa päältä sulatuksen ajan. (Huang 2007.) Lämmitykseen käytettävää energiaa valuu hukkaan sen verran, mitä kylmäaine jäädyttää lämmityspiirin vettä ja se energia, joka jäi sulatuksen ajalta tekemättä.

3.3 Ilma-vesilämpöpumpun komponentit

Kaikissa lämpöpumpuissa toimintaperiaate on sama, kuitenkin eroaa mistä lämpöenergiaa otetaan ja mihin sitä siirretään. Lämpöpumppujen komponenteissa on eroja riippuen siitä, onko ilma-vesilämpöpumppu, ilmalämpöpumppu vai maalämpöpumppu. (Motiva Oy 2012.) Tässä kappaleessa painopiste on kohdennettu nimenomaan tämän työn kohteena olevaan ilma-vesilämpöpumpun pääkomponentteihin.

3.3.1 Kompressori

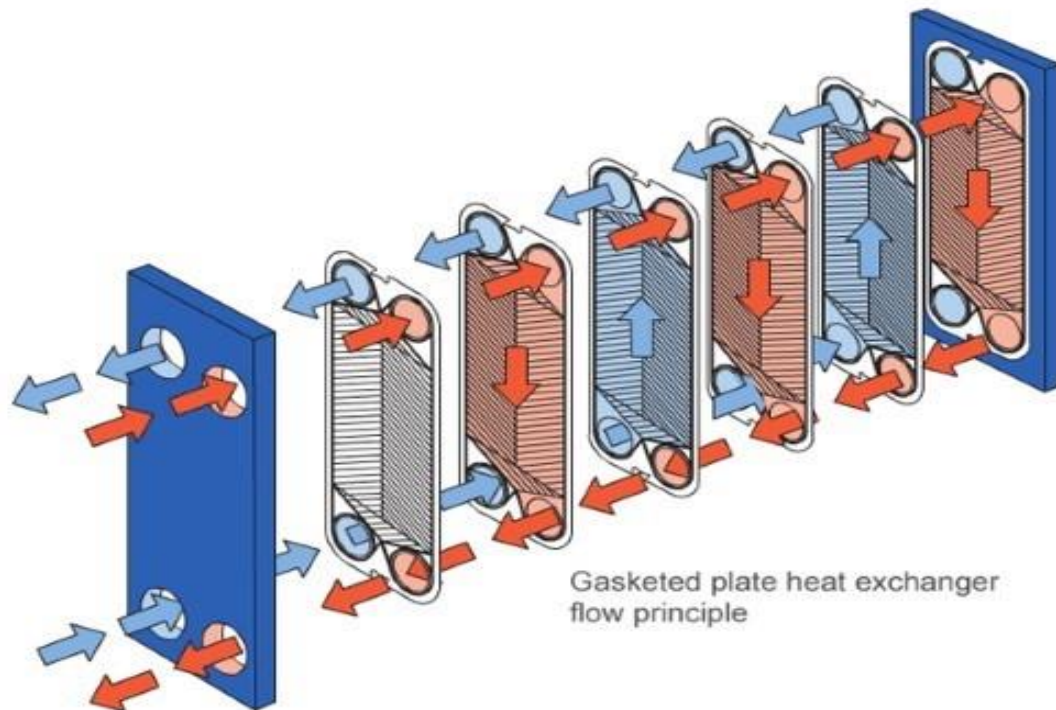
Kylmäkierron paineenkorotuksessa on käytetty scroll -kompressoria tai toiselta nimeltä tunnettua kierrukkakompressoria, jonka käyttö on merkittävästi yleistynyt lämpöpumpuissa. Tämän kompressorityypin etuja ovat maltillinen äänenvoimakkuus, huoltovapaus, muihin kompressorityyppeihin verrattuna pieni koko sekä tehokas volymetrinen hyötysuhde. Paineen tuottaminen perustuu kiinteään spiraaliin sekä tämän sisäpuolella olevaan liikkuvaan spiraaliin, jota kompressorin moottori liikuttaa (Kuva 5). Kylmäainetta syötetään ulkoreunalta spiraalien väliin ja liikkuvan spiraalin toistaessa ympyräradan muotoista liikettä. Spiraalien koskettaessa toisiaan, syntyy spiraalien väliin koko ajan pieneneviä kammioita. Höyrystynyt kylmäaine puristetaan suuremmista kammioista kohti pienempiä, eli spiraalien keskiötä. (Trott 2008, 53–61.)



Kuva 5. Kierrukkakompressorin toiminta. (Trott 2008).

3.3.2 Lauhdutin

Lämmitystilanteessa kompressorin jälkeen kuuma höyrystynyt kylmäaine johdetaan lauhduttimelle. Vesi-ilmalämpöpumppu -järjestelmissä käytetään levylämmönsiirintä, jossa lämpö siirtyy konvektion seurauksena. Tiiviit levylämmönsiirtimet koostuvat kylmäaineen, sekä lämmitettävän veden tulo- ja menoputkista ja näiden väliin asennetuista levyistä. Turbulenttinen virtaus edistää lämmönsiirtymistä paremmin, kuin laminaarinen virtaus ja tämän vuoksi levyt ovat muodoltaan aaltomaisia. Levylämmönsiirtimen levyjen paksuus, jossa fluidi kulkee, on tyypillisesti 0,5 mm – 1,2 mm ja levyjen väliin jätetty rako 2 mm – 5 mm. Joka toisessa levyssä virtaa kylmäainetta ja joka toisessa vettä (kuva 6). Levyjen saumat on hitsattu, juotettu tai tiivistetty, jotta fluidit eivät pääse sekoittumaan keskenään. (Kaappola ym. 2011, 55–56.)



Kuva 6. Tiivistetyn levylämmönsiirtimen toimintaperiaate (Alfa laval n.d).

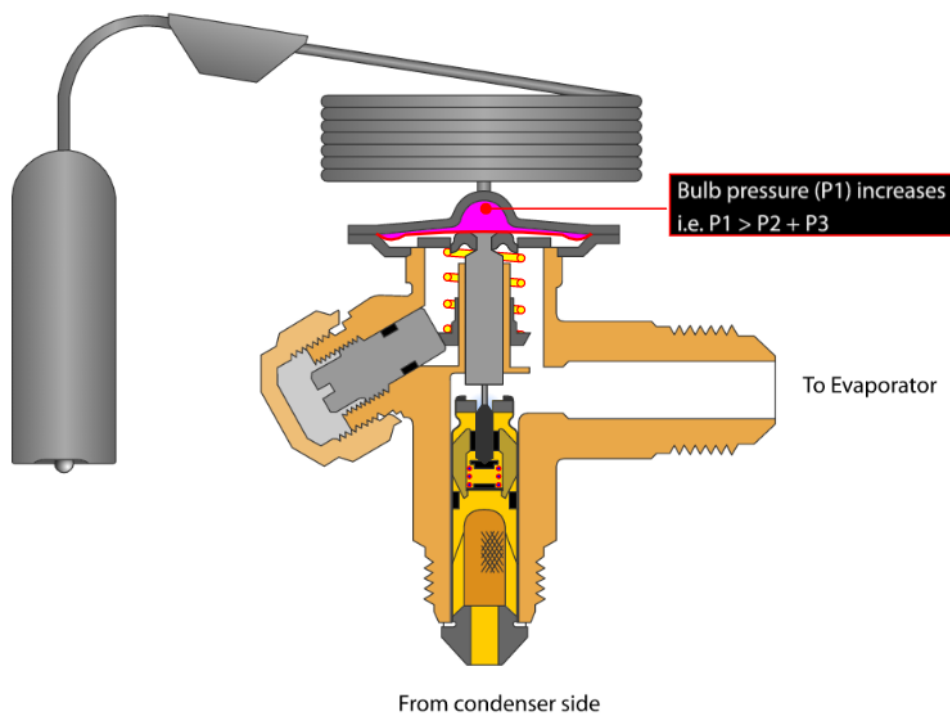
3.3.3 Varaajat

Lämmitysjärjestelmän lämminvesivaraajat toimivat järjestelmän lämpöpankkina, johon johdetaan kuuma tai hieman jäähtynyt lämmityspiirin vesi. Varaajat poistavat myös lämpölaajenemisesta johtuvia ääniä sekä takaa tasaisemman veden virtauksen. Varaajasäiliössä on tyypillisesti meno- ja tuloyhteen lisäksi lämpötilamittari. Eristetyn vaipan lisäksi varaajan sisällä on sähkövastukset, jotka ylläpitävät lämmitetyn lämmityspiirin veden lämpötilaa tai lämmittävät jäähtyneen veden halutulle lämpötilalle.

3.3.4 Paisuntaventtiili

Tyypillisimpiä paisuntaventtiilejä on termostaattiset ja elektroniset paisuntaventtiilit. Termostaattista paisuntaventtiiliin ruiskutusta ohjaa lämpötilan tuntoelin, joka kiinnitetään imuputkeen. Käytännössä tuntoelin on pieni säiliö, jonka sisällä on yleensä samaa kylmäainetta, kun itse järjestelmässä. Kylmäaine

lämpenee ja tämän johdosta syntyvä paine johdetaan kapilaariputkea pitkin paisuntaventtiilin kalvolle. Tällöin kalvon molemmilla puolilla vallitsee eri painetilat. Toisella puolella höyryn aiheuttama paine ja toisella puolella jousen aiheuttama voima. Paisuntaventtiilille tuleva paine painaa venttiilin sisällä olevaa joustusta vasten, jonka seurauksena neulaventtiili työntyy eteenpäin ja päästää kylmäainetta lisää höyrystimeen. Kun paine laskee jousi työntää neulan taas kiinni asentoon (kuva 9). Sähköisesti toimivan paisuntaventtiilin tulistusta ohjaa säädin lämpötila-anturin ja painelähtetimen tai kahden lämpötila-anturin perusteella, jotka on sijoitettu ennen ja jälkeen höyrystimen. (Aittomäki 2012, 214–218.)



Kuva 9. Termostaattinen paisuntaventtiili (Danfoss n.d).

3.3.5 Höyrystin

Lamellihöyrystin on yleisin, kun tarkoitus on lämmittää kylmäainetta ja viilentää ulkoilmaa. Kylmäaine kiertää pienissä putkissa, joissa on tietyin välein kiinni lamellilevy. Kylmäainetta sisältävät putket ja levyt ovat hyvin lämpöä johtavia

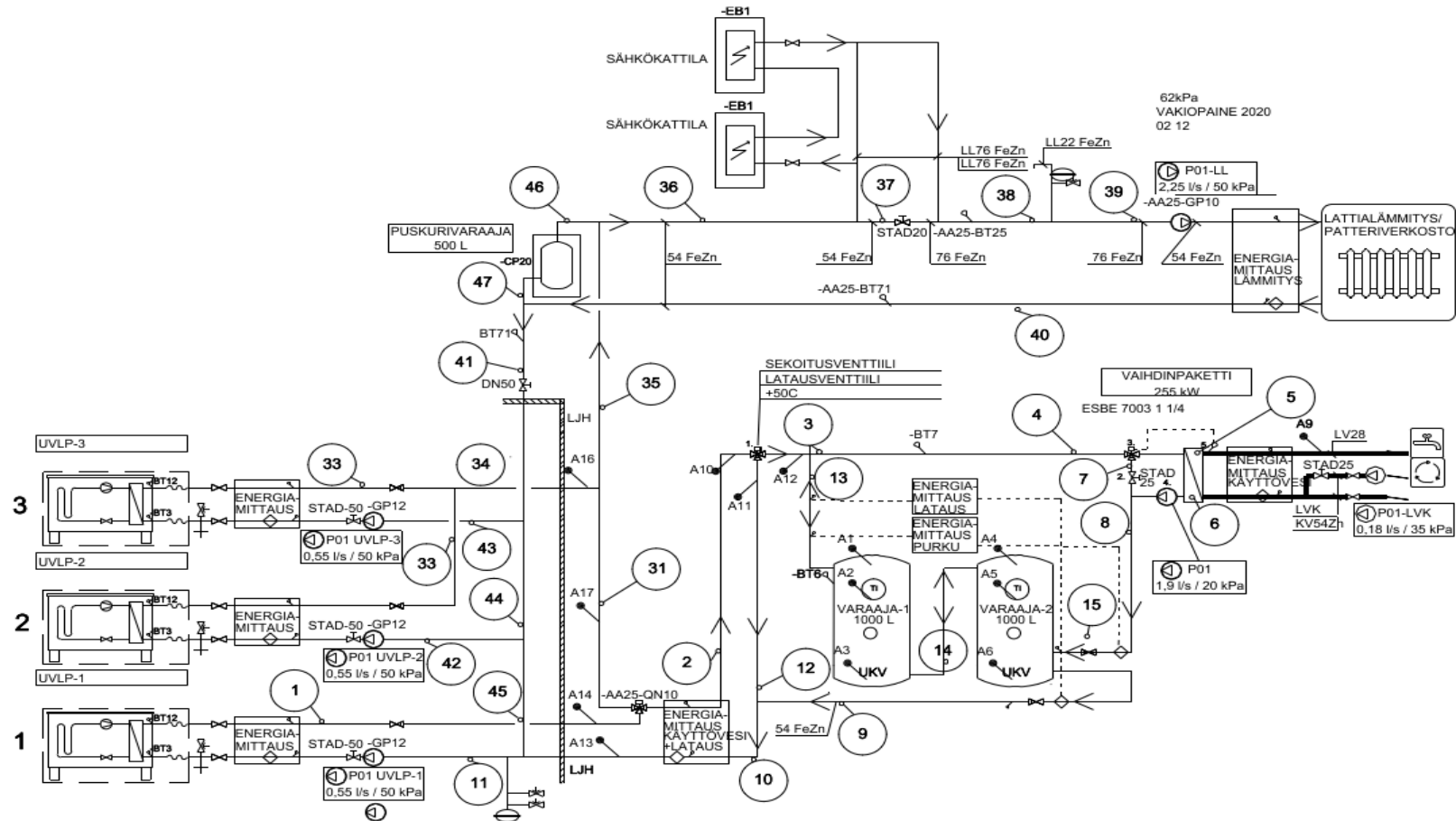
materiaaleja, esimerkiksi alumiinia tai kuparia. Lamellijaot ovat tyypillisesti 2–8 millimetriä. Lamellin ja putkien läpi puhalletaan puhaltimella lämmönsiirtymisen tehostamiseksi. Aksiaalipuhallin on lamellihöyrystymissä yleisesti käytetty ja ilmavirran nopeus on tyypillisesti 1–4 m/s välillä. Lämmitysjärjestelmän automaatio säättää puhaltimen kierrosnopeutta energiatarpeen mukaan. (Aittomäki 2012, 174–175.)

3.4 KytKentäkaavio ja säätötekniikka

Lämmitysjärjestelmässä on kolme ulkoyksikköä. Ensimmäinen ulkoyksikkö (kuva 6, UVLP-1) tuottaa kuumaa vettä käyttöveden lämmittämiseen sekä kiinteistön lämmitykseen. Automaatiikka säättää kolmitieventtiiliä käyttöveden lämmitystä kulutuksen mukaan. Tämän jälkeen tulee sekoitusventtiili/latausventtiili, jonka säätö on lämpötilaan perustuva. Venttiili päästää veden käyttöveden lämmönvaihtimelle, jos lämpötila on yli 51 °C. Lämpötilan ollessa alle 51 °C, johdetaan lämmitysvesi takaisin ulkoyksikölle keräämään lisää lämpöenergiaa. Käyttöveden lämpötila pidetään noin 51 asteisena sekoitusventtiilillä, joka mittaa käyttöveden menolämpötilaa ja säätelee lämmityspiirin veden lämpötilaa tarvittaessa sekoittamalla jo jäähtynyttä lämmityspiirin vettä kuumaan veteen (kuva 10, piste 7). Järjestelmässä on kaksi 1000 litran lämminvesivaraajaa. Lämmityspiiri syöttää vettä 2. varaajaan (Kuva 10, varaaja 2) alayhteestä ja järjestelmä ottaa tarvittaessa 1. varaajan (kuva 10, varaaja 1) yläyhteestä. Kun varaajien välille on kytketty yhdysputki (kuva 10, piste 14), josta vesi virtaa toisen varaajan yläosasta ensimmäiseen varaajaan ja otetaan käyttöön toisen varaajan yläosasta, niin varmistutaan siitä, että kiertoon menee varaajista mahdollisimman lämmintä vettä. Tämä perustuu veden lämpötilasta johtuviin tiheys eroihin, jolloin kylmin, eli tihein vesi painuu varaajien pohjalle ja lämmin varaajien yläosiin. Toisen ja kolmannen (kuva 10, UVLP-2 ja UVLP-3) ulkoyksikön tuottamaa lämmityspiirin vettä ohjataan suoraan lattialämmitykseen. Ohjausyksikkö ohjaa kiinteistön lämmitystä lämmityskäyrän mukaisesti, eli tietyllä ulkolämpötilalla on joku tietty menoveden lämpötila, mihin järjestelmä pyrkii. Jokaisella lämmitysjärjestelmällä on oma ominainen lämmityskäyrä. Lisälämmitystä

tarvittaessa osa vedestä johdetaan kahden sähkökattilan kautta. Lämmityspiirin paluuvedestä osa palaa suoraan ulkoyksiköihin ja osa 500 litraiseen puskurivaraajaan.

Käyttövesilämmönsiirtimen pumppu kierrättää lämmityspiirin kuumaa vettä vaihdinpaketin läpi (Kuva 10, pisteen 6 vasemmalla puolella). Käyttövesi ja rakennuksen lämmitys puolella on omat vakiopainepumput, jotka huolehtivat veden virtauksesta ylimpiin kerroksiin saakka. Jokaisella ulkoyksiköllä on myös omat vakiopainepumput, jotka huolehtivat paineen riittävyyden lauhduttimen läpi ja siitä edelleen rakennuksen tai käyttöveden lämmitykseen.



Kuva 10. Laitoksen kytkentäkaavio.

4 Sulatusenergian määrittäminen ja riippuvuudet sääolosuhteisiin

Ilma-vesilämpöpumpun ulkoyksikön tietoja on kerätty syyskuusta 2021 lähtien. Tähän työhön valittiin tarkasteluväliksi lokakuun 2021 alusta maaliskuun loppuun saakka. Mittaukset on suoritettu Sharky 775 yhdistelmäenergiamittarilla ja ulkoyksikön kumulatiivista sähkön kulutusta on mitattu Carlo Gavazzi EM330 energiamittarilla. Ulkoyksikön mittauksia on tallennettu minuutin välein, joten ulkoyksikön keskimääräisiä teho, meno- ja paluulämpötila-arvoja on noin 216000 rivin verran. Kumulatiivista sähköenergia-arvoja on toiset 216000 riviä. Mitattujen arvojen lisäksi työssä on hyödynnetty ilmatieteen laitoksen avointa dataa, josta saa vuorokausikohtaisia säätietoja vuodesta 1960 lähtien ja hetkellisiä tietoja vuodesta 2010 lähtien (Ilmatieteen laitos n.d.). Säätietoja on lisätty tiedostoon 21600 rivin verran, niin että tiedot vastaisivat ajallisesti mahdollisimman paljon toisiaan. Yhteensä työssä käytettyjä mitattuja arvoja on noin 700000 kappaletta. Huomion arvoista säätiedoissa on se, että joulukuussa oli talven kylmimmät vuorokaudet ja maaliskuussa päivät olivat tavanomaista lämpimämpiä.

Sulatustehoon kiinni pääsemiseksi, pitää se erottaa lämmitysvaiheen mittauksista ja muokata tämä helposti käsiteltävään muotoon. Tässä työssä on käytetty tiedonkäsittelyssä python -ohjelmointikieltä ja tämän jälkeen tiedosto on viety Excel -tiedostoksi, jossa varsinainen analysointi on suoritettu. Kun tiedoista on eritelty vuorokausikohtaiset sulatus- ja lämmitystehtöjen keskiarvot, niin on mahdollista laskea näiden avulla energiamääriä vuorokausien aikana ja tarkastella, minkälainen yhteys sääolosuhteilla on sulatusenergian määrään. Lisäksi tarkastellaan kumuloituneiden sulatus- ja sähköenergian osuuksia tuotetusta lämmitysenergiasta. Tarkastelu koskee vain yhtä ilma-vesilämpöpumppua, joka lämmittää käyttövedtä sekä rakennusta (Kuva 10).

4.1 Datan käsittely

Ilma-vesilämpöpumpun ulkoyksiköiden ja sääolosuhteiden arvot ovat erillisissä CVS-tiedostoissa. Ulkoyksiköiden yhdistelmämittarit on mitannut minuutin välein arvoja ja ilmatieteen laitoksen avoimen datan näytteet on otettu 10 minuutin välein. Näiden kahden tiedoston yhdistäminen on toteutettu siten, että ne vastaisivat ajallisesti mahdollisimman hyvin toisiaan. Laskelmissa on oletettu sääolosuhteiden muuttumattomuus kymmenen minuutin ajan, eli kymmenen yhdistelmäenergiamittarin mittauksen aikana on käytetty yhtä ilmatieteen laitoksen mittausta. Menetelmänä tähän on käytetty pythonin lisäosan pandasin `merge_asof` -funktiota, joka sovittaa kaksi tiedostoa yhdeksi tiedostoksi. Funktio yhdistää tiedostot valittujen sarakkeiden mukaan. (Pandas documentation 2019.) Tässä tilanteessa käytettiin luonnollisesti päivämäärää ja kellonaikaa yhdistävänä tekijänä. Samana vuorokautena kellon ollessa 16:44, suhteellinen kosteus ja ulkoilman lämpötila on arvo, joka on mitattu ilmatieteen laitoksen Artukaisten mittauspisteellä kello 16:40. Uudet arvot otetaan käyttöön, kun järjestelmästä mitatun datan kellonaika vaihtuu 16:50 ja näin tilanne etenee mittausjakson loppuun saakka (Taulukko 1).

Lämmitysvaiheen laskemisessa karsitaan kaikki sulatukseen liittyvät arvot pois, eli lämmitysteho on suurempi kuin nolla. Ilma-vesilämpöpumpun ollessa pois päältä, järjestelmä kierrättää lämmityspiirin vettä edelleen ulkoyksiköllä. Näin järjestelmä pitää höyrystimen sulana, sillä aikaa, kun järjestelmän lämmitystoiminnolle ei ole käyttöä sekä pidentää kompressorin käyttöikä. Tämä näkyy energiamittarin datassa 50–500 watin sulatustehona. Näissä laskelmissa on otettu mukaan myös nämä häviöt.

4.2 Vuorokausikohtaisten keskiarvojen laskenta

Energiamittari laskee meno- ja paluuputken antureiden avulla ulkoyksikön tehon:

$$\Phi = q_v \delta c_p (T_{\text{paluu}} - T_{\text{meno}})$$

Φ = Teho [W]

q_v = Veden tilavuusvirta [m^3/s]

δ = Veden tiheys [kg/m^3]

c_p = Veden ominaislämpökapasiteetti [$\text{J}/\text{kg}^\circ\text{C}$]

T_{paluu} = Paluuv veden lämpötila [$^\circ\text{C}$]

T_{meno} = Menoveden lämpötila [$^\circ\text{C}$]

Kaava 5. Siirtyvän lämpöenergian laskeminen (Inkinen & Tuohi 2006).

Esimerkki marraskuulta mitatut arvot: Veden tilavuusvirta on 1030 l/h, veden tiheys on 998 kg/m³, Ominaislämpökapasiteetti on 4190 J/kgK, Paluuv veden lämpötila on 29,4 °C ja menoveden lämpötila on 38,4 °C:

$$\Phi = 2,86 \cdot 10^{-4} \frac{m^3}{s} \cdot 998 \frac{kg}{m^3} \cdot 4190 \frac{J}{kg^{\circ}C} \cdot (38,4^{\circ}C - 29,4^{\circ}C) = 10763,5 W$$

Oletetaan, että teho pysyy minuutin ajan vakiona ja muutetaan kilowattitunneiksi kaavalla:

$$P_{kwh} = \frac{P \cdot t}{h}$$

P_{kWh} = Teho [kWh]

P = Keskiarvollinen teho [kW]

t = sekunti [s]

h = tunti [3600 s]

Kaava 6. Wattien muuttaminen kilowattitunneiksi.

$$P = \frac{10767,7 \cdot 10^{-3} kWh \cdot 60 s}{3600 s} = 0,179 kWh$$

Data sisältää nyt kaikki negatiiviset arvot, joissa on minuutin keskiarvollinen teho. Samalla rivillä päivämäärään sovitettu suhteellinen kosteus ja ulkolämpötila, joka tehtiin kappaleessa 4.1. Vuorokausikohtaisiin keskiarvoihin pääsemiseksi, pitää jakaa data ryhmiin. Kun sulatusvaiheiden määrä on jokaisena vuorokautena yksilöllistä, niin jälleen helpoin tapa on jakaa ryhmät päivämäärien perusteella. Luomalla ryhmät 01.01.2022 00:00 – 01.01.2022 23:59, 02.02.2022 00:00 – 02.02.2022 23:59 ja niin edelleen. Ryhmät sisältävät nyt kunkin vuorokauden aikana mitatut arvot. Jokaisen ryhmän sulatustehon keskiarvo on vuorokausikohtainen keskiarvo. Jokaisen ryhmän rivimäärä suppenee siis yhteen, joten kunkin rivin päivämääräksi valittiin sen ryhmän viimeinen päivämäärä. Ilman suhteelliseksi kosteudeksi ja ulkoilman lämpötiloista laskettiin vuorokausikohtainen keskiarvo, jotka liitetään tulostettavaan tiedostoon (Liite 2).

Tehon voi muuttua energiaksi, mikäli käytetty aika on tiedossa. Jokaisen laskuoperaation yhteydessä on siitä siis hyvä laskea käytetty aika minuutteina samalle riville. Ennen vuorokausikohtaisen sulatustehon määrittämistä, voi päätellä, että jokaisen minuutin keskiarvoisessa tehossa aikaa on kulunut tasan minuutti. Jokaisen ryhmän rivien määrä kertoo jokaisen vuorokauden minuuttien määrän, jonka ulkoyksikkö on ollut sulatusvaihe päällä. Tämä tieto on hyvä lisätä jokaisen vuorokausikohtaisen rivin perään energiatarkastelua varten (Taulukko 2).

Keskiarvoisen tehon ja käytetyn ajan perusteella voidaan laskea energian määrä:

$$Q = \Phi_{KA} t$$

Q = Energia [J]

Φ_{KA} = Keskiarvoinen teho [W]

t = Keskiarvoisen tehon laskemiseen käytetty aika sekunteina [s]

Esimerkiksi, kolmen minuutin aikana lämmitystehon keskiarvo on 10 kW:

$$\Phi_{KA} = 10000 \text{ W} \cdot 180 \text{ s} = 1800 \text{ kJ}$$

Kaava 7. Tehon muuttaminen energiaksi (Inkinen & Tuohi 2006).

| Päivämäärä | Sulatusteho [W] | Aika [min] | Suhteellinen kosteus [%] | Ilman lämpötila [°C] |
|---------------------|-----------------|------------|--------------------------|----------------------|
| 2021-09-26 23:59:42 | -45,12 | 78 | 84,29 | 8,87 |
| 2021-09-27 23:12:50 | -45,04 | 1339 | 84,26 | 9,36 |
| 2021-09-28 16:58:22 | -136,01 | 380 | 79,47 | 10,10 |
| 2021-09-29 19:52:30 | -101,42 | 401 | 88,78 | 9,07 |
| 2021-09-30 20:42:36 | -226,13 | 393 | 80,89 | 9,61 |
| 2021-10-01 16:13:00 | -161,21 | 436 | 87,79 | 11,19 |
| 2021-10-02 23:59:44 | -153,06 | 789 | 84,60 | 10,58 |
| 2021-10-03 21:13:28 | -159,68 | 753 | 80,94 | 11,38 |
| 2021-10-04 18:14:32 | -206,18 | 621 | 81,46 | 11,79 |
| 2021-10-05 15:26:22 | -182,45 | 339 | 95,44 | 11,15 |
| 2021-10-06 20:20:48 | -247,10 | 260 | 77,00 | 12,17 |
| 2021-10-07 22:40:41 | -137,99 | 398 | 91,00 | 12,40 |
| 2021-10-08 17:55:33 | -213,28 | 296 | 92,17 | 11,53 |
| 2021-10-11 22:17:04 | -150,79 | 338 | 84,64 | 9,87 |
| 2021-10-12 19:16:19 | -136,99 | 187 | 92,44 | 7,25 |
| 2021-10-13 22:10:49 | -234,58 | 617 | 94,97 | 4,72 |

Taulukko 2. Tietojen yhdistämisen, suodattamisen ja sulatustehon laskemisen lopputulos. Sulatusteho, suhteellinen kosteus ja ilman lämpötila on vuorokauden keskiarvoja. Päivämäärien kellonaika on kyseisen vuorokauden viimeinen hetki, jolloin laite on luovuttanut lämpöenergiaa ulos.

4.2.1 Absoluuttisen kosteuden laskenta

Suhteellinen kosteus kertoo, kuinka paljon ilmassa on vesihöyryä sen hetkisestä kylläisen vesihöyrypitoisuudesta prosentteina. Absoluuttinen höyrypitoisuus ilmoittaa vesihöyryn massan tilavuusyksikköä kohden (g/m³). Kylläisen vesihöyryn pitoisuus saadaan taulukosta 3, kun tiedetään sen hetkinen ulkoilman lämpötila. Kun absoluuttinen kosteus kasvaa yhtä suureksi kuin kylläisen vesihöyryn tiheys, alkaa siitä vesihöyry tiivistymään pinnoille. Tätä kutsutaan kastepisteeksi. (Inkinen & Tuohi 2002, 395–399.) Usein vastaavissa taulukoissa ei ole juuri sitä lämpötilaa, mitä on etsimässä. Mikäli haluaa tehdä tarkkaa työtä, pitää kylläinen vesihöyrypitoisuus interpoloida lineaarisesti taulukon kahden lähimmän arvon väliltä.

Kun tallennetuista mittaustiedoista saadaan vuorokautinen lämpötila sekä ilman suhteellinen kosteus, niin voidaan laskea, kuinka paljon vesihöyryä on kuutiossa ilmaa kaavalla:

$$\varphi = \frac{\delta_v}{\delta_{vs}} \cdot 100 \%$$

φ = Ilman suhteellinen kosteus [%]

δ_v = Ilman vesihöyryn tiheys [g/m³]

δ_{vs} = Ilman kylläisen vesihöyryn tiheys [g/m³]

Kaava 8. Absoluuttisen kosteuden kaava (Inkinen & Tuohi 2006).

| Temperature | | Max. Water Content | |
|-------------|------|---------------------------------------|--|
| (°C) | (°F) | (10 ⁻³ kg/m ³) | (10 ⁻³ lb/ft ³) |
| -25 | -13 | 0.64 | 0.040 |
| -20 | -4 | 1.05 | 0.066 |
| -15 | 5 | 1.58 | 0.099 |
| -10 | 14 | 2.31 | 0.14 |
| -5 | 23 | 3.37 | 0.21 |
| 0 | 32 | 4.89 | 0.31 |
| 5 | 41 | 6.82 | 0.43 |
| 10 | 50 | 9.39 | 0.59 |
| 15 | 59 | 12.8 | 0.8 |
| 20 | 68 | 17.3 | 1.07 |
| 30 | 86 | 30.4 | 1.9 |
| 40 | 104 | 51.1 | 3.2 |
| 50 | 122 | 83.0 | 5.2 |
| 60 | 140 | 130 | 8.1 |

Taulukko 3. Absoluuttinen ilmankosteus (Engineering Toolbox 2008).

Kuivan ilman tiheys voidaan laskea ideaalikaasuyhtälöllä:

$$PV = nRT \rightarrow PV = \frac{m}{M}RT \rightarrow P\delta_{kuiva} = R_i T \rightarrow \delta_{kuiva} = \frac{P}{R_i T}$$

P = Ilmanpaine [101325 pa]

$$R_i = \left[287,05 \frac{J}{kgK} \right]$$

$$\delta_{\text{kuiva}} = \text{Kuivan ilman tiheys} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$$

$$T = \text{Ilman lämpötila [K]}$$

Kaava 9. Ihannekaasun tilanyhtälö (Inkinen & Tuohi 2006).

Esimerkki syyskuulta: Ilmankosteus on 84,3 % ja lämpötila 8,9 C. Interpoloidaan lineaarisesti taulukosta 3 kylläisen vesihöyrynpitoisuus, josta tulee 8,8 g/m³.

$$\varphi = \frac{\delta_v}{\delta_k} \cdot 100 \% \rightarrow \delta_v = \frac{RH}{100} \cdot \delta_k$$

$$\delta_v = \frac{84,3 \%}{100 \%} \cdot 8,8 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} = 7,4 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$$

Absoluuttinen kosteuden voi ilmoittaa myös vesihöyryn massan kg_v ja kuivan ilman massan kg_i suhteena (Sandberg 2016, 123–126):

$$x = \frac{m_v}{m_i}$$

x = Absoluuttinen kosteus [kg_v/kg_i]

m_v = Veden massa [kg]

m_i = Kuivan ilman massa

Kaava 10. Absoluuttisen kosteuden kaava (Aittomäki 2012).

Kuivan ilman tiheyden voi laskea ideaalikaasulain avulla. Jakamalla vesihöyryn tiheys kuivan ilman tiheydellä, jolloin tilavuudet supistuvat pois. Yksiköksi jää vesihöyryn ja ilman massojen suhde:

$$\delta_{\text{kuiva}} = \frac{101325 \text{ Pa}}{287,05 \frac{\text{J}}{\text{kgK}} \cdot (273 \text{ °C} + 8,9 \text{ °C})} = 1,25 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$x = \frac{\delta_v}{\delta_i} = \frac{\text{kg}_v}{\text{kg}_i} = \frac{7,4 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}_v}{\text{m}^3}}{1,25 \frac{\text{kg}_i}{\text{m}^3}} = 0,0059 \frac{\text{kg}_v}{\text{kg}_i}$$

Kun jokaisen mittauksen ulkoilman suhteellisen kosteuden ja lämpötilan keskiarvot on laskettu, voi näistä laskea keskimääräiset absoluuttiset kosteudet kullekin vuorokaudelle ja lisätä ne tiedoston rivien perään (Taulukko 4).

| Pvm | Teho [W] | Aika [min] | Suht.kost. [%] | Ilman lamputila [°C] | Abs.kost. [g/m ³] | max höyry g/m ³ | Ilman tiheydet [kg/m ³] | X [kgv/kgi] |
|------------|----------|------------|----------------|----------------------|-------------------------------|----------------------------|-------------------------------------|-------------|
| 1.10.2021 | -168 | 176 | 87,8 | 11,2 | 8,96 | 10,21 | 1,242 | 0,007216 |
| 2.10.2021 | -153 | 789 | 84,6 | 10,6 | 8,29 | 9,80 | 1,245 | 0,006666 |
| 3.10.2021 | -160 | 753 | 80,9 | 11,4 | 8,37 | 10,34 | 1,241 | 0,006747 |
| 4.10.2021 | -206 | 621 | 81,5 | 11,8 | 8,65 | 10,62 | 1,239 | 0,006978 |
| 5.10.2021 | -182 | 339 | 95,4 | 11,1 | 9,68 | 10,14 | 1,242 | 0,007789 |
| 6.10.2021 | -247 | 260 | 77,0 | 12,2 | 8,39 | 10,89 | 1,238 | 0,006775 |
| 7.10.2021 | -138 | 398 | 91,0 | 12,4 | 10,03 | 11,03 | 1,237 | 0,008113 |
| 8.10.2021 | -213 | 296 | 92,2 | 11,5 | 9,60 | 10,41 | 1,241 | 0,007736 |
| 11.10.2021 | -151 | 338 | 84,6 | 9,9 | 7,90 | 9,34 | 1,248 | 0,006335 |
| 12.10.2021 | -137 | 187 | 92,4 | 7,2 | 7,35 | 7,95 | 1,260 | 0,005834 |
| 13.10.2021 | -235 | 617 | 95,0 | 4,7 | 6,37 | 6,70 | 1,271 | 0,005009 |
| 14.10.2021 | -2014 | 212 | 86,1 | 6,4 | 6,49 | 7,54 | 1,263 | 0,005136 |
| 15.10.2021 | -383 | 297 | 88,0 | 8,7 | 7,68 | 8,72 | 1,253 | 0,006128 |
| 16.10.2021 | -1576 | 234 | 69,8 | 6,8 | 5,41 | 7,75 | 1,262 | 0,004286 |
| 17.10.2021 | -1229 | 346 | 73,8 | 5,6 | 5,26 | 7,13 | 1,267 | 0,004151 |
| 18.10.2021 | -1623 | 329 | 84,9 | 3,8 | 5,39 | 6,36 | 1,275 | 0,00423 |
| 19.10.2021 | -999 | 510 | 87,6 | 2,9 | 5,26 | 6,01 | 1,279 | 0,004113 |
| 20.10.2021 | -489 | 295 | 95,2 | 10,5 | 9,26 | 9,73 | 1,245 | 0,007437 |
| 21.10.2021 | -241 | 587 | 85,4 | 10,3 | 8,20 | 9,59 | 1,246 | 0,006579 |
| 22.10.2021 | -1030 | 325 | 88,5 | 5,2 | 6,13 | 6,92 | 1,269 | 0,004829 |
| 23.10.2021 | -1612 | 367 | 87,3 | 1,2 | 4,68 | 5,35 | 1,287 | 0,003632 |

Taulukko 4. Ilman kosteuksien laskenta ja lisääminen tiedostoon.

4.2.2 Lopputulos

Vuorokausikohtaisten arvojen laskemisen jälkeen nämä on yhdistetty samaan tiedostoon ja viety Excelliin. Taulukossa 4 on nyt laskettu vuorokausikohtainen sulatusteho ja siihen käytetty aika, josta pystyy laskemaan sulatukseen kuluvan energian määrän. Seuraavana on vuorokauden keskilämpötila ja tästä interpoloitu lineaarisesti lämpötilaa vastaava maksimiabsoluuttinen kosteus asteen kymmenesosan tarkkuudella. Kertomalla maksimihöyryn arvot sen vuorokautisen suhteellisen kosteuden keskiarvolla, saadaan vuorokausikohtainen ilman absoluuttisen kosteuden arvo. Kun tämä jaetaan

ihannekaasuyhtälöstä saatavalla kuivan ilman tiheydellä (Kaava 7), jää tästä absoluuttinen kosteus esitettynä kiloina (kg_v/kg_i). Näiden vuorokausikohtaisten arvojen lisäksi, on tiedostoon lisätty sähköenergian kulutus, ulkoyksikön tuottaman lämpöenergian arvot ja sulatukseen kuluvan energian määrä kyseisenä vuorokautena.

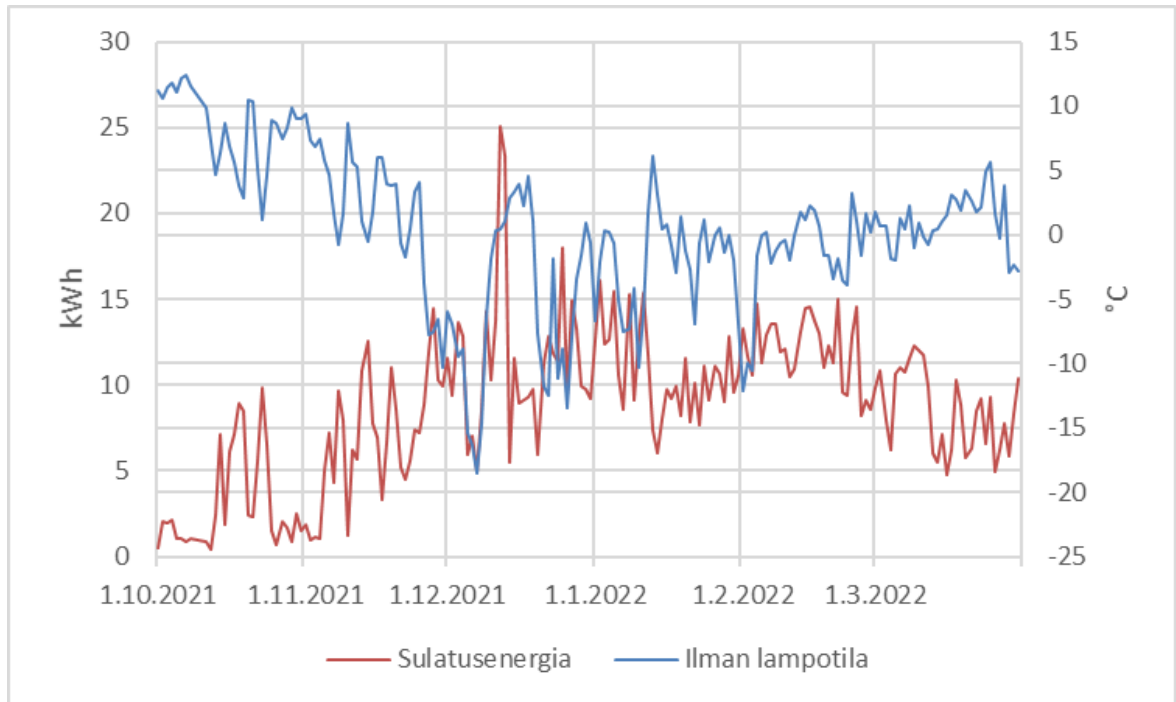
4.3 Sääolosuhteiden vaikutukset sulatusenergiaan

Lämmityskauden aikana myös rakennusten lämmityksen tarve kasvaa. Ilma-vesilämpöpumppujen ulkoyksiköiden sulatukseen kuluu energiaa juuri silloin, kun lämmityksen tarve on suurimmillaan. Lämpötilan laskiessa pakkasen puolelle, on ilmassa edelleen kosteutta. Suhteellinen kosteus on usein kovilla pakkasilla lähellä 100 %, mutta ilmassa on silti vähemmän kosteutta kuin esimerkiksi tavanomaisena kevätpäivänä. Kosteutta on siis ilmassa jokaisena vuoden päivänä, jolloin on mahdollista, että tämä kosteus jäätyy ulkoyksiköiden lamellien pintoihin, kun pintojen lämpötila alittaa kastepisteen.

4.3.1 Ulkoilman Lämpötila

Lämpötilan laskiessa pakkasen puolelle, lienee luonnollista, että sulatustehon tarve kasvaa ilma-vesilämpöpumpun ulkoyksiköissä. Kuviossa 1 on esitetty ulkoyksikön sulatusenergian kulutus ulkoilman lämpötilan funktiona. X-akselilla on esitetty päivämäärä, vasemmalla y-akselilla on energia-asteikko ja oikealla ulkoilman lämpötila-asteikko. Kuvasta näkyy sulatukseen kuluvan energian kasvu lämpötilan laskiessa. Suurin piikki on ollut joulukuun ja tammikuun välisenä aikana, jolloin vuorokautinen sulatusenergia ylittää 25 kWh rajan. Juuri ennen tätä ylitystä on huomattava, että ulkoilman keskiarvollinen lämpötila on ollut lähes $-20\text{ }^\circ\text{C}$, jonka jälkeen lämpötila on lähtenyt rajuun nousuun. Lämpötilan kasvaessa myös ilman sisältämä maksimivesihöyrynpitoisuus määrä kasvaa. Lienee mahdollista, että ilmakeuhuspitoisuuden kasvu äkillisesti nimenomaan aiheuttaa lamellien jäätymisen. Kylmien pintojen ollessa alle kastepisteen, alkaa vesihöyryä kondensoitumaan kylmille pinnoille ja lopuksi jäätyä. Puhaltimen

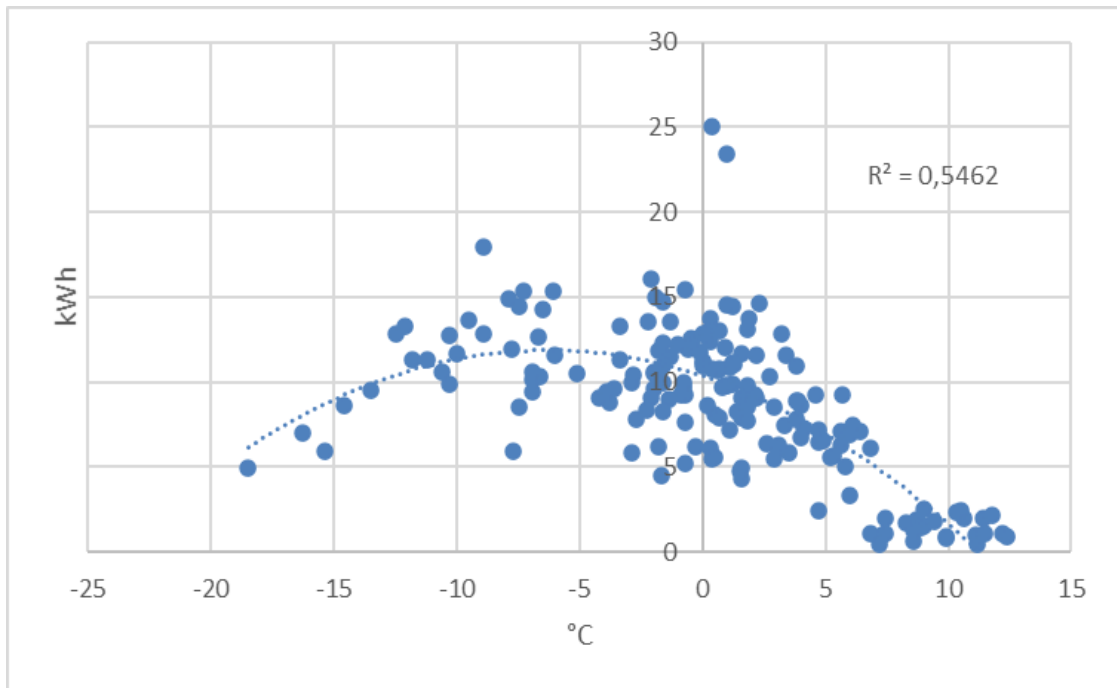
käydessä, lamellien läpi virtaavan vesihöyryyn määrä on suurempi ja näin ollen nopeuttaa jäätymistä.



Kuvio 1. Ulkoyksikön sulatusenergian ja ulkoilman lämpötila. Vasemman Y-akselin arvot kertovat punaisen kuvaajan sulatukseen kuluvan vuorokautisen energian määrän ja oikealla y-akselilla on sinisen kuvaajan lämpötila-asteikko, joka kuvaa sen hetkistä ulkoilman lämpötilaa.

4.3.2 Sulatusenergian riippuvuus lämpötilasta

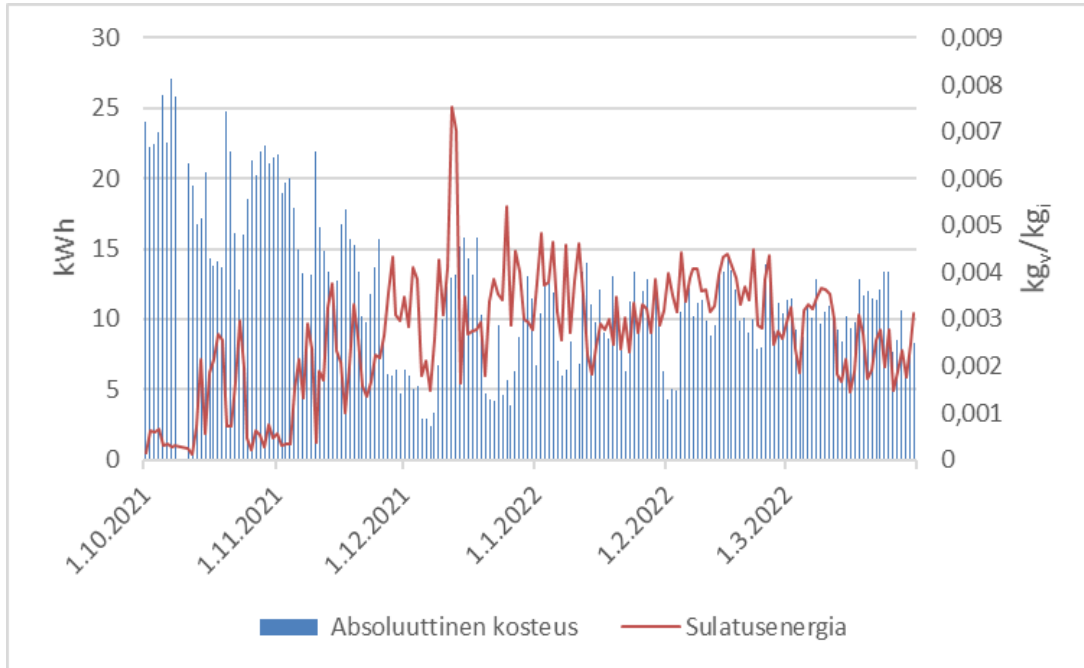
Lämpötilan ja sulatusenergian käyrien muutoksilla näyttää olevan yhtenäisyyttä, eli muistuttavat toistensa peilikuvia. Kuviossa 2 on tehty pistekaavio, jossa x-akselilla lämpötila ja y-akselilla vuorokauden aikana käytetty sulatusenergia. Pisteiden riippuvuutta on havainnollistettu polynomifunktiolla pienimmän neliösumman menetelmällä. Kuvioista 2 huomataan saman ulkolämpötilan vallitessa ja sulatusenergian vaihdellessa keskimäärin ± 5 kWh. Tästä voi päätellä, että lämpötilalla on yhteys sulatusenergian määrään, mutta edes suuntaa antavaa arvoa ei pelkästään tämän perusteella saada.



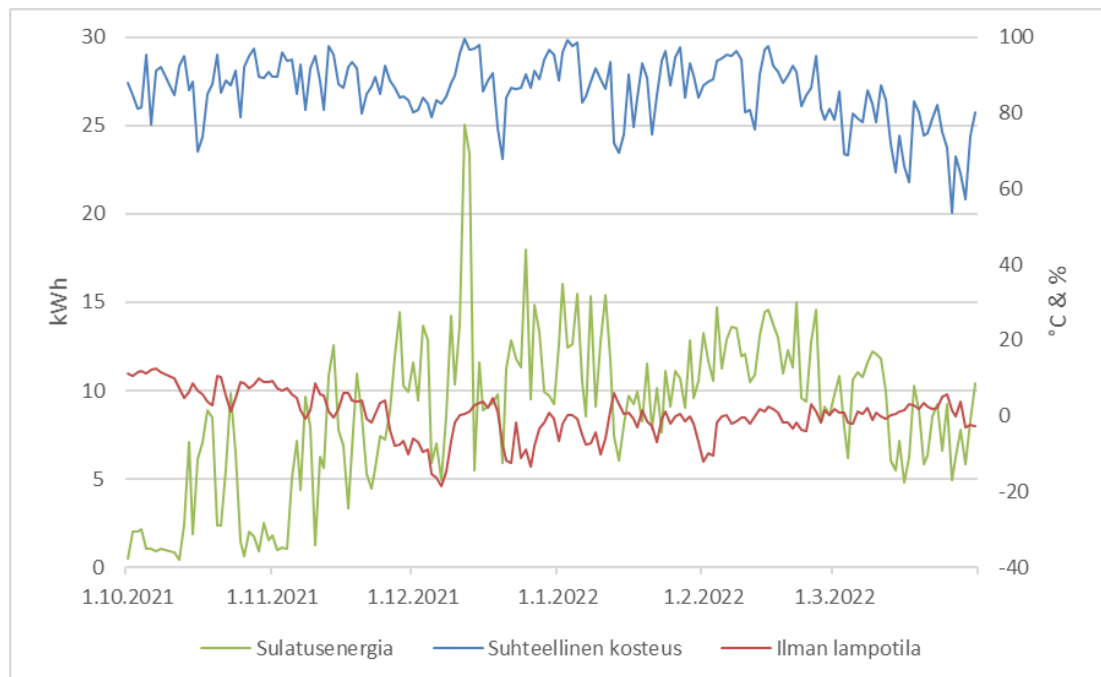
Kuvio 2. Sulatusenergian kulutus lämpötilan funktiona. Y-akselilla on sulatusenergia ja x-akselilla ulkoilman lämpötila. Korrelaatio eli selityskerroin on suhteessa polynomifunktioon, joka on merkitty kuviossa katkoviivalla.

4.3.3 Ilman kosteus

Absoluuttinen kosteus riippuu lämpötilasta sekä ilman suhteellisesta kosteudesta. Kuviossa 3 on esitelty sulatusenergian kulutus absoluuttisen kosteuden vaihteluiden rinnalla. Y-akselilla on kuvattu energian määrä (vasen) ja absoluuttinen ilman kosteus (oikea). Lokakuun alussa on ollut kaksi päivää, jolloin sulatukselle ei ole ollut tarvetta. Tämä näkyy datassa absoluuttisen kosteuspalkkien puuttumisena ja Excel yhdistää sulatusenergian arvojen viivat, vaikka kyseisenä aikana se on todellisuudessa ollut nolla. Kuvioista voi kuitenkin huomata, että absoluuttisen kosteuden muutoksella näyttäisi olevan jonkinlainen yhteys sulatustehoon. Suurin sulatusarvo on ollut joulukuussa, jolloin absoluuttinen kosteus on 0,001 kgv/kgi ja noussut 0,0045 kgv/kgi. Kuviossa 4 on esitetty sama kuin kuviossa 3, mutta absoluuttinen kosteus on korvattu ulkoilman lämpötilan ja suhteellisen kosteuden kuvaajilla.



Kuvio 3. Vuorokausikohtainen sulatusenergia ja ulkoilman absoluuttisen kosteuden määrä. Vasen y-akseli kuvaa sulatusenergian määrää ja oikea y-akseli sinisten palkkien, eli absoluuttisen kosteuden määrää.



Kuvio 4. Sulatusenergian määrä, jossa toissijaisilla akseleilla on ulkoilman lämpötila ja suhteellinen kosteus. Vihreä kuvaaja esittää sulatusenergian määrää, jonka asteikko on vasemmalla. Sininen kuvastaa suhteellista kosteutta, jonka asteikko on oikealla nollan yläpuolella. Punaisella on ilman lämpötila ja lämpötila-asteikko on oikealla nollan alapuolella.

4.3.4 Sulatusenergian riippuvuus ilmankosteuteen

Vuorokausikohtaisen sulatustehon ja absoluuttisen kosteuden yhteyttä on havainnollistettu myös pienimmän neliösumman menetelmällä (Kuvio 5), jossa kosteus on esitetty veden massan suhde ilman massaan kilogrammoina. Selityskerroin on heikompi, kuin lämpötilan riippuvuudella (Kuvio 2). Tämä saattaa johtua siitä, että ulkoilman lämpötila ja kosteus eivät ole ainoat seikat, jotka vaikuttavat ulkoyksikön jäätymiseen. Ilma, joka virtaa ilmaa kylmempien lamellien välistä on luonnollisesti kylmempää, kuin ympäröivä ilma. Höyrystimen lämpötila voi alittaa vallitsevan ulkoilman kastepisteen, sillä höyrystimen lämpötilan on oltava lämmitysjakson aikana kylmempi, kuin ilman lämpötilan, jotta lämpöä voi siirtyä ilmasta nesteeseen. Höyrystimen lämpötilanturin arvot laskettiin vuorokausikohtaisiin keskiarvoihin ja lisättiin tiedoston vastaavalle ajalle. Lämpötilan muuttuessa myös ilman maksimiabsoluuttinen kosteus muuttuu. Tässä höyrystimen maksimiabsoluuttinen kosteus tarkoittaa ilman ja höyrystimen lamellien keskilämpötilaa vastaavaa kylläistä kosteuspitoisuutta. Ilman sisältämän absoluuttisen kosteuden ja höyrystimen sisällä kulkevan ilman maksimiabsoluuttisen kosteuden muutos laskettiin kaavalla:

$$\Delta\delta = \delta_{Ilma} - \delta_{Höyrystin}$$

$$\Delta\delta = \text{Absoluuttisten kosteuksien muutos} \left[\frac{g}{m^3} \right]$$

$$\delta_{Ilma} = \text{Ilman absoluuttinen kosteus} \left[\frac{g}{m^3} \right]$$

$$\delta_{Höyrystin} = \text{Höyrystimen maksimiabsoluuttinen kosteus} \left[\frac{g}{m^3} \right]$$

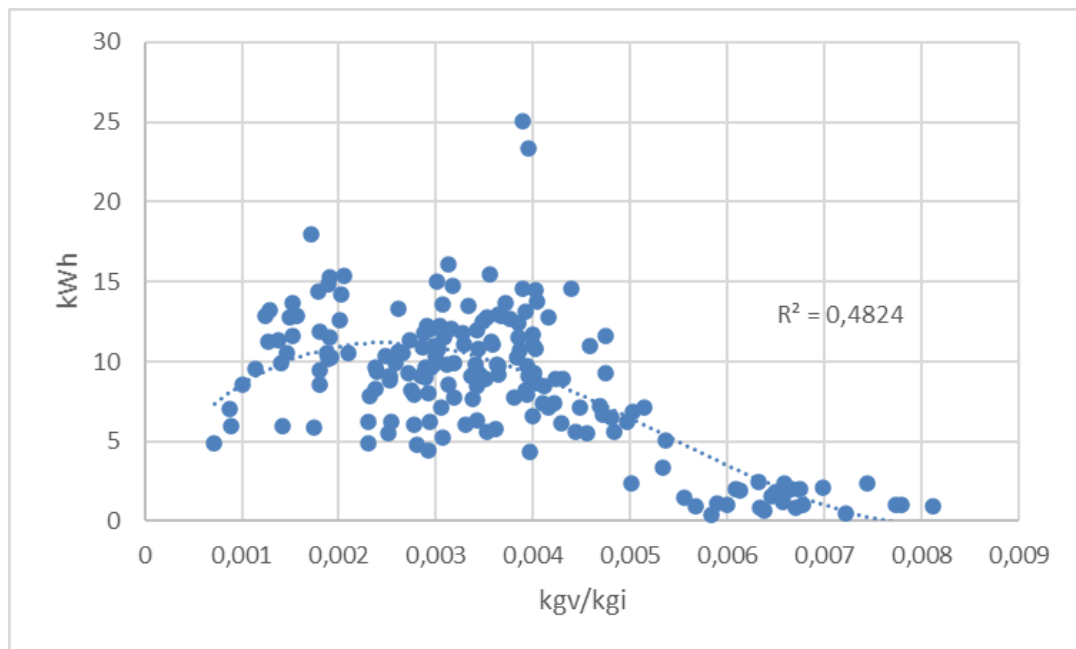
Kaava 11. Absoluuttisten kosteuksien muutos.

Absoluuttisten kosteuksien muutoksen arvon ollessa positiivinen, edustaa se kosteuden määrää, joka tiivistyy lamellien pinnoille ilman virratessa höyrystimen läpi. Mikäli muutoksen arvo on negatiivinen, niin tämä kuvaa kosteuden määrää, jonka ilmaan voi lisätä ennen, kun kosteus alkaa tiivistymään lamellien pinnoille. Muutoksen ollessa negatiivinen, se ei kuitenkaan tarkoita, että vuorokauden aikana ei olisi ollenkaan käytetty sulatustoimintoa. Kosteudet ovat vuorokausikohtaisia keskiarvoja, jolloin on hyvin mahdollista, että ulkoyksikköä on sulateltu kyseisen päivän aikana, vaikka muutoksen arvo on negatiivinen. Toisin sanoen kosteuksien muutos kertoo suuntaa antavasti, kuinka paljon vettä lamellien pinnoille on tiivistynyt vuorokauden aikana. Absoluuttisten kosteuksien muutoksen yhteydessä höyrystimen lämpötilan on oltava pakkasen puolella, jotta jäätyminen on mahdollista. Absoluuttisten kosteuksien muutoksen kuvioissa on käytetty 57 vuorokauden mittausjaksoa, koska höyrystimen lämpöanturin tietoja oli vain tämä verran saatavilla. Kuviossa 6 on esitetty höyrystimen lämpötila-anturin 57 vuorokauden ajalta vuorokausikohtaiset kosteuksien muutokset ja sulatukseen käytetyt energiat. X-akselilla on ulkoilman absoluuttisen kosteuden ja lamellien välissä olevan ilman lämpötilaa vastaava maksimiabsoluuttisen kosteuden muutos. Y-akselilla on vuorokauden aikana käytetty sulatusenergiaa. Lamellien välistä kulkeutuvan ilman lämpötila on arvioitu oleva höyrystimen ja ulkoilman keskiarvoinen lämpötila. Toisen asteen polynomifunktion selityskertoimeksi saatiin liki 86 %, jota voidaan ajatella jo suuntaa antavana. Tämän datan perusteella:

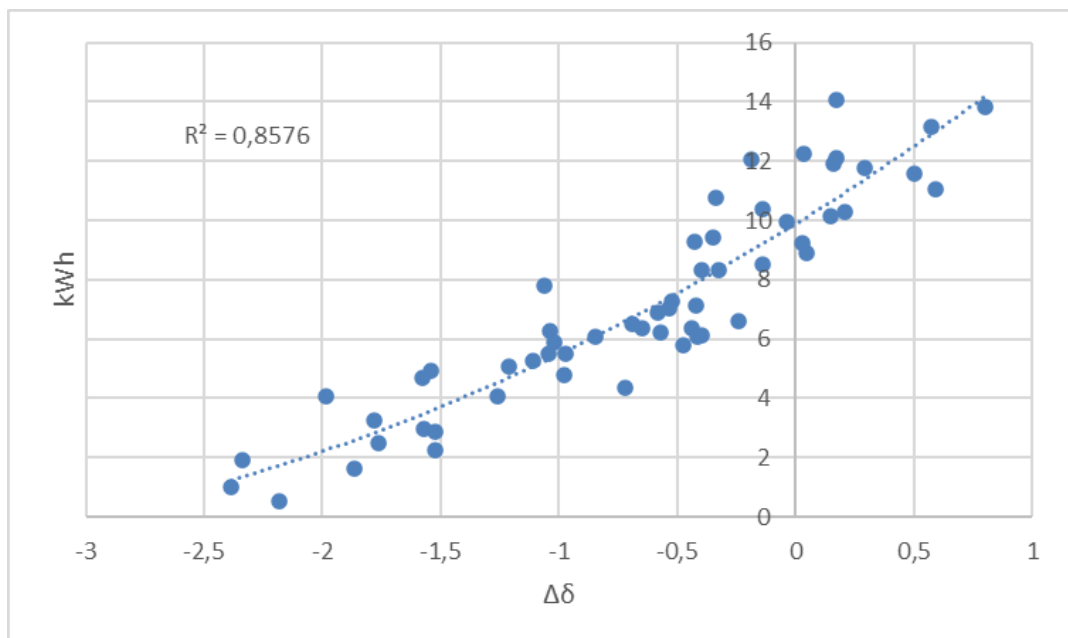
$$Q_{sulatus} = 0,5559\Delta\delta^2 + 4,9478\Delta\delta + 9,883$$

Kaava 12. Sulatusenergian määrä absoluuttisten kosteuksien muutoksen funktiona.

Toisen asteen polynomifunktiossa $\Delta\delta$ edustaa ilman absoluuttisen kosteuden ja höyrystimen lämpötilaa vastaavaa maksimiabsoluuttisen kosteuden muutosta (g/m³).



Kuvio 5. Sulatusenergian ja ulkoilman absoluuttisen kosteuden kaavio. Y-akselilla on vuorokauden keskimääräinen sulatusenergia ja x-akselilla on vuorokauden keskimääräinen absoluuttinen kosteus. Kolmannen asteen polynomifunktio on esitetty katkoviivalla ja tämä kuvaa pisteiden riippuvuutta toisiinsa.



Kuvio 6. X-akselilla on kuvattu absoluuttisen ilmakesteyden ja höyrystimen sisällä virtaavan ilmanlämpötilaa vastaava maksimiabsoluuttisen kosteuden muutosta (g/m^3). Höyrystimen sisällä virtaavan ilman lämpötilaa on arvioitu

lamellien sekä ulkoilman keskilämpötilana. Nollapisteeksi valittiin se piste, jossa höyrystimeltä lähtevän ilman absoluuttinen kosteus on yhtä suuri kuin ympäröivän ilman maksimiabsoluuttinen kosteus. Muutos kertoo karkeasti lamellien pinnoille tiivistyneen veden määrästä. Positiivinen arvo viittaa, että kosteutta on tiivistynyt paljon ja negatiivinen arvo, että vähän. Y-akselilla on sulatukseen käytetty vuorokausikohtainen sulatusenergia. Toisen asteen polynomifunktion selityskertoimeksi tuli lähes 86 %.

4.4 Sulatusenergiaa kuvaava mallifunktio

Ilman absoluuttisen ja höyrystimen maksimiabsoluuttisen ilmakeuhteiden muutoksen laskemiseksi tarvittiin ulkoilman suhteellinen kosteus sekä ulkoilman lämpötila (Kaava 11). Näitä arvoja on mahdotonta laskea, vaan ne pitää konkreettisesti mitata. Maksimiabsoluuttisen kosteuden ja ulkoilman lämpötilan välille voidaan luoda yhteys kerätyistä datapisteistä. Lopputuloksena saatiin funktio, johon sijoittamalla ulkoilman lämpötila, saadaan sitä lämpötilaa vastaava maksimiabsoluuttinen kosteus. Samanlaisen funktion voi tehdä myös höyrystimen ja ulkoilman lämpötilan välille, eli kullekin ulkolämpötilalle on jokin tietty höyrystymislämpötila. Maksimiabsoluuttisen kosteuden ja sitä vastaavan lämpötilan pisteet lisättiin x,y -koordinaatistoon ja näiden pisteiden päälle tehtiin trendiviiva. Pisteiden yhtenäisyyden varmistamiseksi tarkasteltiin pisteiden yhtenäisyyttä trendiviivaan selityskertoimen avulla, joka kuvaa, kuinka suuren osan pisteistä trendiviiva selittää. Absoluuttisen kosteuden funktioksi saatiin edellä mainitulla menetelmällä:

$$A(T_u) = 4,7299e^{0,0713T_u}$$

Kaava 13. Maksimiabsoluuttisen kosteus ulkolämpötilan funktiona.

Funktio antaa ulkolämpötilan mukaan sitä vastaavan maksimiabsoluuttisen kosteuden arvon (g/m³). Tämän selityskertoimeksi saatiin 99,7 %.

Sama toimenpide toistettiin höyrystimen lamellien lämpötilan arvioimiseksi perustuen kerättyyn dataan. Tähän funktioon syötetyllä ulkoilman lämpötilalla

saatiin ulkoilman lämpötilaa vastaava ulkoyksikön höyrystimen lamellien lämpötila:

$$T_H(T_u) = 0,7086T_u - 5,4771$$

Kaava 14. Höyrystimen lämpötila ulkolämpötilan funktiona.

Tämän funktion selityskertoimeksi saatiin 94 %.

Kun näillä kahdella funktiolla esitetään kaava 11, joka kuvaa ilman absoluuttisen kosteuden ja lamellien välissä olevan ilman maksimiabsoluuttisen kosteuden muutosta, saatiin:

$$\Delta\delta(T_u, \varphi) = A(T_u)\varphi - A\left(\frac{T_H(T_u) + T_u}{2}\right)$$

Kaava 15. Absoluuttisten kosteuksien muutos ilman suhteellisen kosteuden ja ulkoilman lämpötilan funktiona.

Tämän kaavan ensimmäinen termi laskee ulkoilman lämpötilan ja suhteellisen kosteuden perusteella ilmassa vallitsevan absoluuttisen kosteuden määrän. Toinen termi kuvaa höyrystimen lamellien välissä virtaavan ilman maksimiabsoluuttista kosteuden pitoisuutta. Kappaleessa 4.3.4 todettiin absoluuttisten kosteuksien muutoksen yhteys sulatusenergian määrään (Kuvio 6). Kun tämä absoluuttisten kosteuksien muutoksen funktio (Kaava 15) istutettiin kaavaan 12, jossa ainut muuttuja on ulkoilma absoluuttisen kosteuden ja höyrystimen sisällä virtaavan ilman maksimiabsoluuttisen kosteuden muutos. Tästä saatiin:

$$Q_s(T_u, \varphi) = 0,5559 \cdot \Delta\delta(T_u, \varphi)^2 + 4,9478 \cdot \Delta\delta(T_u, \varphi) + 9,883$$

$Q_s = \text{Sulatusenergia [kWh]}$

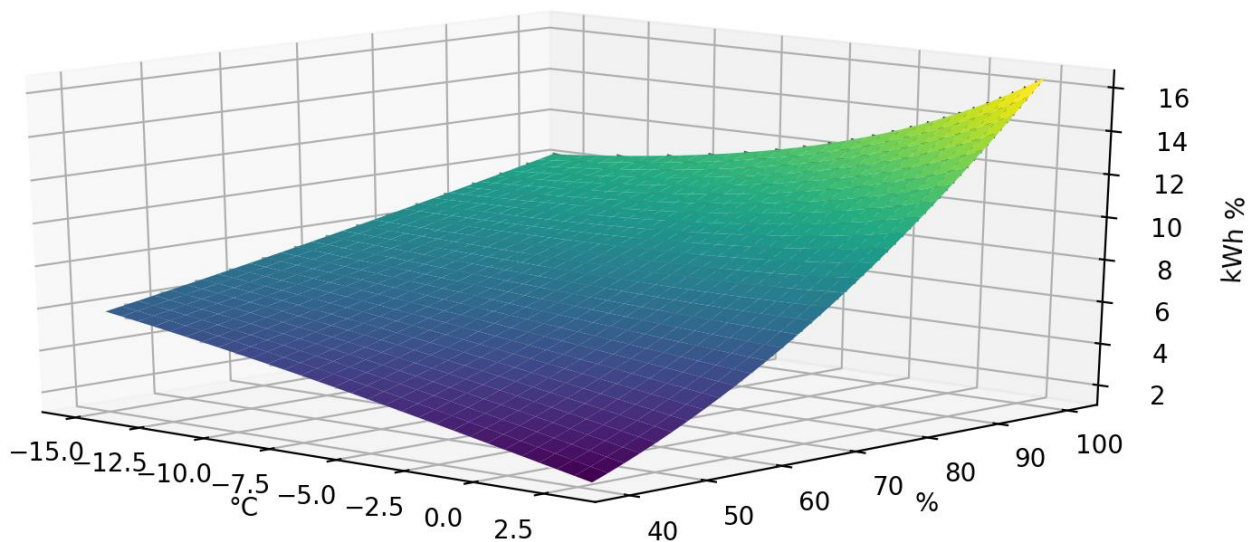
$T_u = \text{Ulkoilman lämpötila [}^\circ\text{C]}$

$\varphi = \text{Ulkoilman suhteellinen kosteus [%]}$

$$\Delta\delta = \text{Absoluuttisten kosteuksien muutos} \left[\frac{\text{g}}{\text{m}^3} \right]$$

Kaava 16. Sulatusenergian määrä ulkolämpötilan ja suhteellisen kosteuden funktiona.

Tähän kaavaan, kun sijoitettiin suhteellisen kosteuden ja ulkoilman lämpötilan tyypillinen vuorokausikohtainen vaihteluväli, niin lopputuloksena saatiin 3D-funktio. Mallifunktio kuvaa maaliskuu-toukokuun datan perusteella sulatusenergian riippuvuutta ulkoilman suhteelliseen kosteuteen ja ulkoilman lämpötilaan (Kuvio 7).

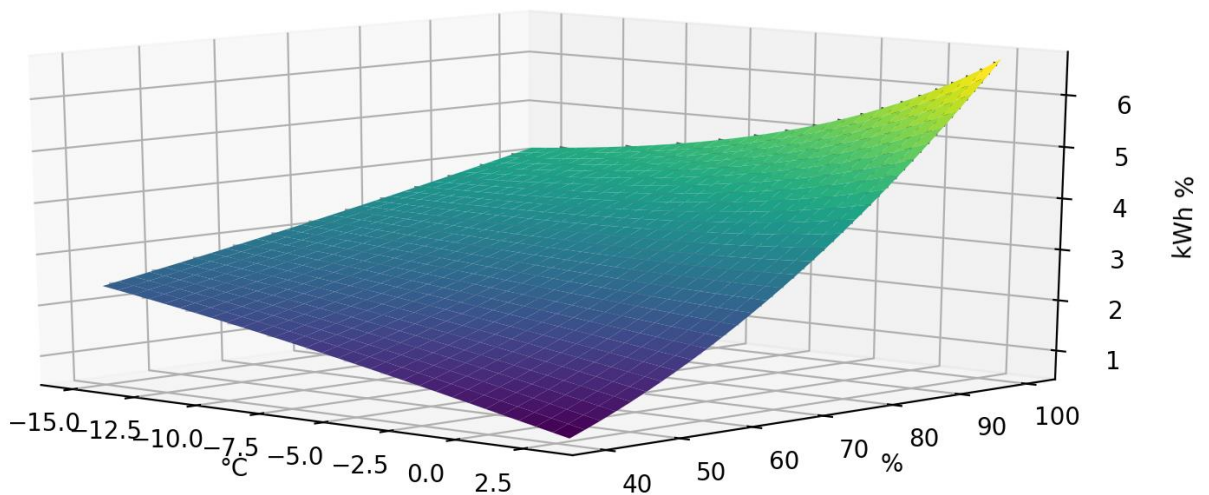


Kuvio 7. Sulatusenergian riippuvuus suhteellisen kosteuden ja ilman lämpötilan muutoksien seurauksena.

Mallifunktiosta voi havaita, että vuorokauden aikana sulatusenergiaa kuluu eniten, kun lämpötila on nollan tuntumassa. Lämpötilan ollessa korkeampi, ilma pystyy kantamaan suuremman määrän kosteutta, mikä todettiin jo kappaleessa 4.2.1. Kovilla pakkasilla ilmassa on vähemmän kosteutta, mutta se vähäinen kosteus, joka tiivistyy höyrystimen lamellien pinnoille, jäätyy myös nopeasti. Sulatusenergian kulutuksen suurimmat piikit jatkuvat mitatun datan perusteella usein +3 °C:een saakka. Tämä vastaa lamellien lämpötilassa noin -3,4 °C (Kaava 14), jolloin lamellien välissä kulkevan ilman lämpötilaa arvioitiin näiden

keskilämpötilana, joka on tällöin hieman 0 °C:n alapuolella. Tällöin ilmassa on runsaasti kosteutta ja hyvät olosuhteet jäätymiselle. Lämpötilan noustessa noin 8 °C:n, nousee lamellien pinnan lämpötila yli 0 °C, jolloin jäätymistä ei tapahdu. Tämän vuoksi kuvioiden 7 & 8 ulkoilman lämpötilat on rajoitettu +3 °C:een, jolloin datan perusteella jäätyminen on ollut voimakasta.

57 vuorokauden aikana ulkoyksikön lämmitysenergian tuotto noudattaa hyvin vakiofunktioita, eli energian tuotto on kullakin päivänä ollut tasaista. Tämä ulkoyksikkö tuottaa pääasiassa lämmintä käyttövettä, jonka voi kuvitella olevan melko vakio päivästä riippumatta. Kun tarkastellaan tämän mittausjakson aikana tuotettua lämmitysenergiaa, saadaan näiden keskiarvoksi noin 256 kWh vuorokaudessa. Kuviossa 8 on laskettu sulatusenergian osuus vuorokauden keskiarvoisesta lämmitysenergiasta, eli saatiin z-akselille prosenttiosuus.



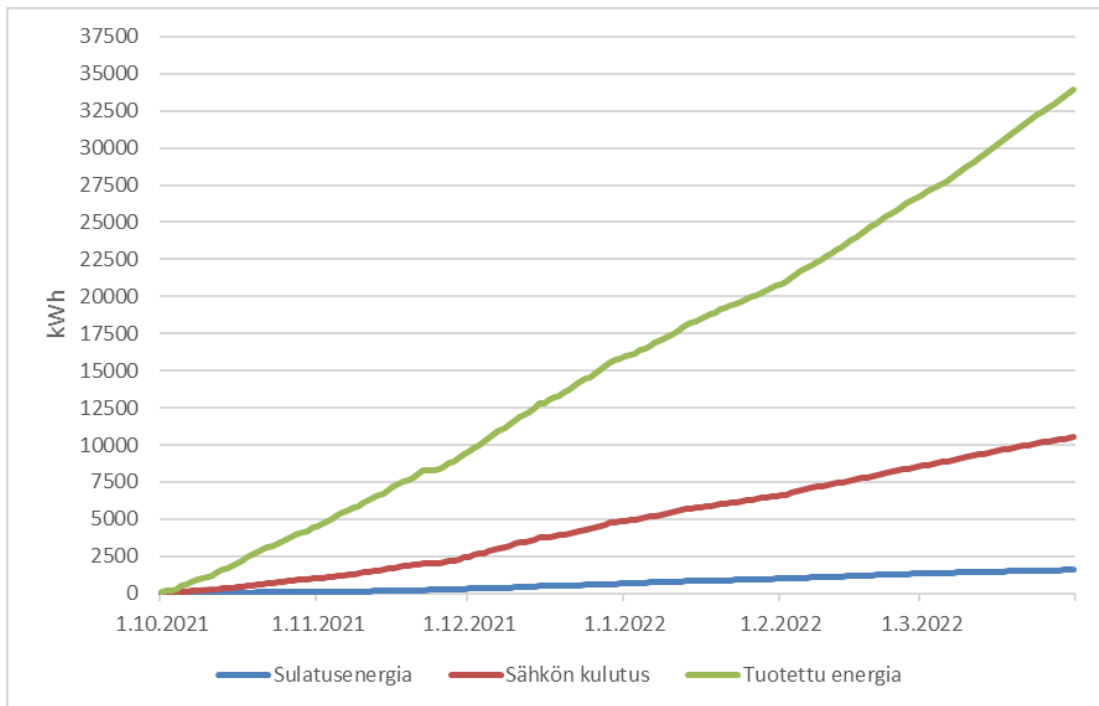
Kuvio 8. Ulkoyksikön sulatusenergian osuus tuotetusta lämmitysenergiasta, mikä on esitetty z-akselilla.

5 Sulatusenergian vaikutukset COP-arvoon

| Osa-alue | kWh |
|---------------------------------|-------|
| UVLP-1 tuotama energia | 34436 |
| Sulatusenergia | 1582 |
| Sähkön kulutus | 10699 |
| Höyrystimen tuottama energia | 22155 |
| Tekemätön energia sulatusajalta | 8340 |

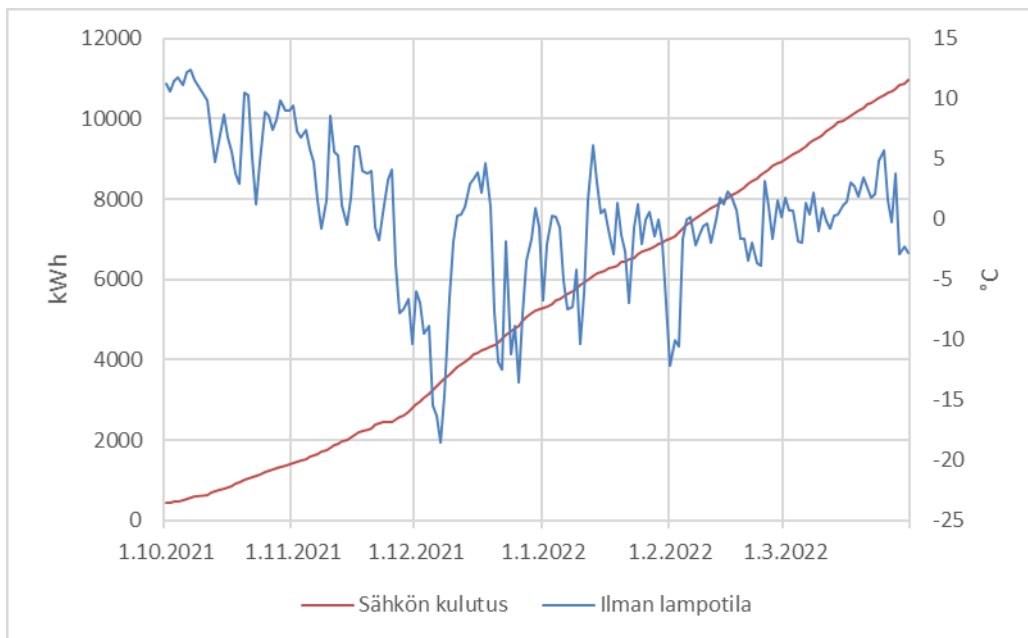
Taulukko 5. Energia-arvot mittausjaksolta.

Mittausjaksolta tarkat energia-arvot on esitetty taulukossa 5 ja kumulatiivisten energioiden kehitys kuviossa 9. Höyrystimeltä saatu energia saadaan, kun tuotetusta energiasta vähennetään sähkönkulutus ja sulatusenergia, eli 22155 kWh. Tämä on energiaa, mikä on periaatteessa saatu ilmaiseksi, joten COP-1 arvo kuvaa tätä energiamäärää. Tuotettu energia on kompressorin tuottaman lämpöenergian sekä höyrystimeltä saadun lämpöenergian summa. Tekemätön energia kuvaa energian määrää, joka sulatuksen aikana olisi voitu tehdä.



Kuvio 9. Kumulatiivisten energioiden kehittyminen mittausjakson aikana.

Ulkoyksikön (UVLP-1) kumuloitua sähköenergian kulutus on kuvattu kuviossa 10, jossa vasemmalla y-akselilla on kuvattu ulkoyksikön kuluttama sähköenergia ja oikealla y-akselilla lämpötila-asteikko. Kuvaajista huomaa sähkönkulutuksen kasvun, kun lämpötila laskee. Etenkin joulukuussa, jolloin oli mittausjakson kylmin päivä. Sähköenergian mittausdatasta on poistettu syyskuulta saadut arvot, joten nolllapiste on tässä tarkastelussa 413 kWh. Tällöin ulkoyksikön sähkönkulutus on ollut mittausjakson aikana $11112 \text{ kWh} - 413 \text{ kWh} = 10699 \text{ kWh}$.



Kuvio 10. UVLP-1 kumuloitua energian kulutus mittausjaksolta.

5.1 Sulatusenergia

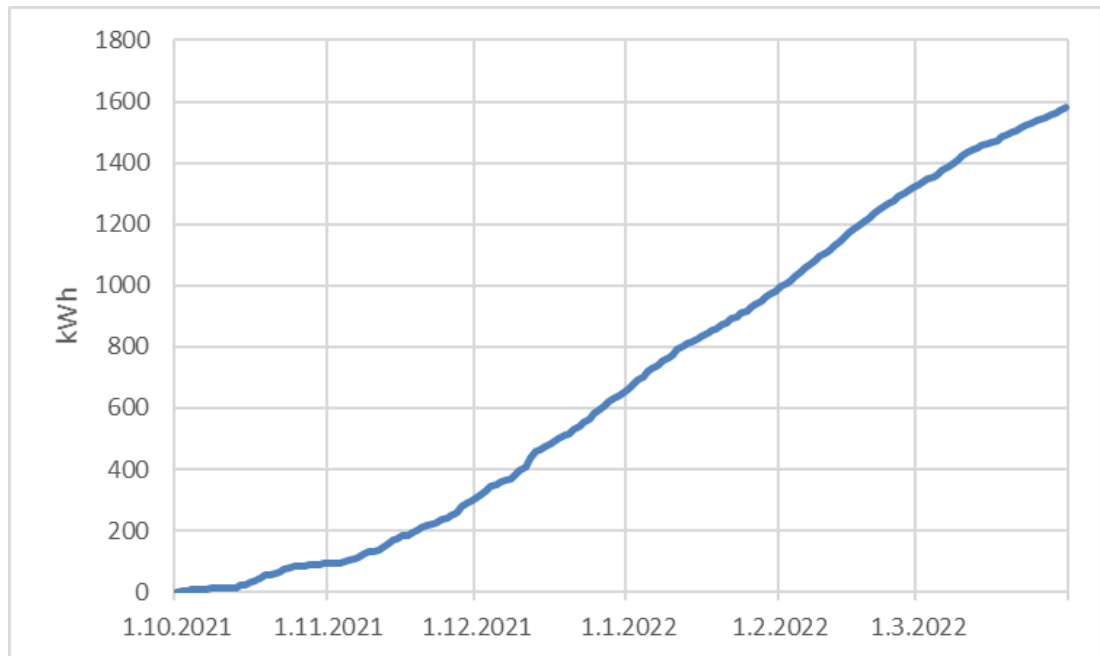
Kerätyn datan perusteella sulatukseen käytetty aika mittausjaksolta oli 50368 minuuttia, eli noin 35 vuorokautta. Tämä on se aika, kun ulkoyksikkö on luovuttanut energiaa ulos ja ollut tuottamatta energiaa. Kuvio 11 on esitetty kumulatiivinen sulatusenergia mittausjaksolta. Kun otetaan huomioon sulatusajalta tuottamaton energia 35 vuorokauden ajalta, niin luku on huomattavasti suurempi. Datasta 182 vuorokauden keskiarvosta laskettu

lämmitystehon keskiarvo on 9928 W ja 35 vuorokautta on 3024000 sekuntia. Näistä voi laskea energian, mikä jää sulatusajalta tekemättä kaavalla 6:

$$Q = \Phi_{KA} t$$

$$Q = 9928 \text{ W} \cdot 3024000 \text{ s} = 3,002 \cdot 10^{10} \text{ J} = 8339,52 \text{ kWh}$$

Kuviossa 11 on esitetty kumuloitunut sulatusenergia mittausjakson ajalta, jolloin suoraan sulatukseen on kulunut 1582 kWh. Voi ajatella, että sulatusteho on näiden kahden summa, eli 9922 kWh on sulatuksen vuoksi jäänyt käyttämättä tai mennyt hukkaan.

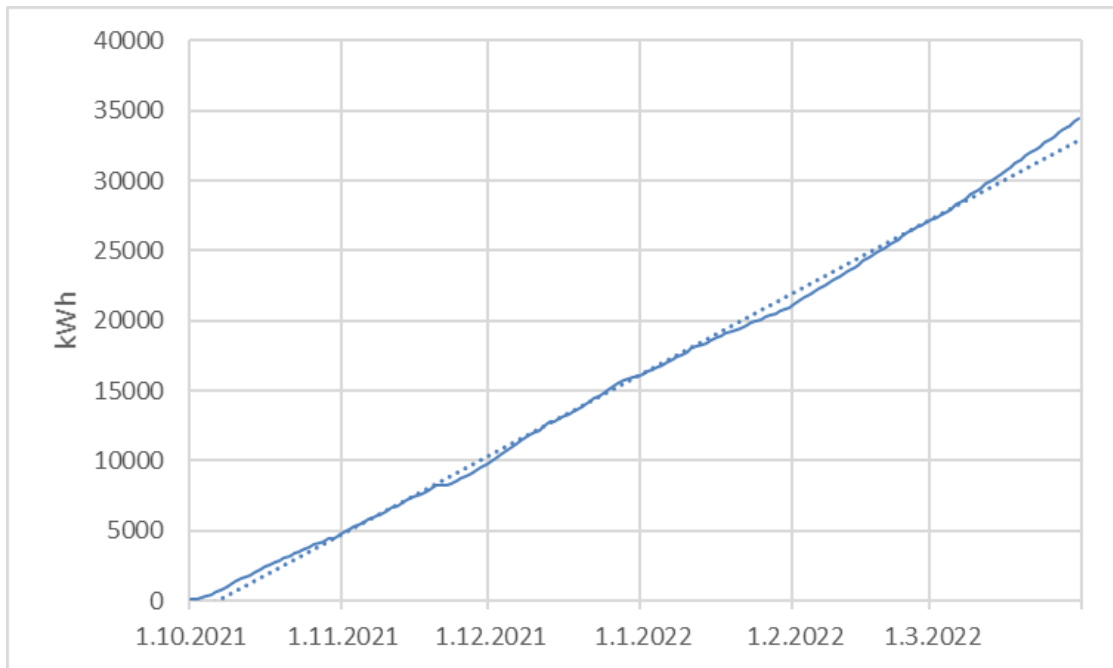


Kuvio 11. Kumuloituva sulatusenergia mittausjaksolta.

5.2 Tuotettu energia

Kun unohdetaan hetkeksi sulatukseen kuluva energia ja tarkastellaan paljon, ilma-vesilämpöpumppu on tuottanut mittausjaksolla lämpöenergiaa. Kuviossa 12 on kerääntyneen lämmitysenergian määrä ajan funktiona. Sininen funktio edustaa energiaa ja katkoviiva funktion pisteiden keskiarvoa. Lämmitysenergian kumulatiivinen energiantuotto mittausjaksolta noudattaa hyvin lineaarista

funktiota, joka on $187,5x = y$, missä x on vuorokausien määrä ja y on kumuloituneen lämmitysenergian määrä. Yhteensä energiaa on siis tuotettu tarkalleen 34336,49 kWh.



Kuvio 12. Ilma-vesilämpöpumpun tuottama energia mittausjakson aikana. Katkoviiva on pisteiden keskiarvoa kuvaava viiva.

5.3 COP

Mittausjakson ajalta laskettuna COP-arvo ilman, että otetaan huomioon sulatukseen kuluvaa energiaa kaavalla 4. Jakajan yläpuolelle sijoitetaan ulkoyksikön tuotettu energian määrä ja alapuolelle ulkoyksikön kuluttama sähköenergian määrä. Kappaleissa 5 ja 5.2 todettiin ulkoyksikön tuotetun energian määräksi 34336 kWh ja sähkön kulutukseksi 10699 kWh, joten:

$$\text{COP} = \frac{34336 \text{ kWh}}{10699 \text{ kWh}} = 3,21$$

Kun otetaan huomioon suoraan sulatukseen kulutettu energia kappaleesta 5.1, joka oli 1582 kWh:

$$\text{COP} = \frac{34336 \text{ kWh} - 1582 \text{ kWh}}{10699 \text{ kWh}} = 3,06$$

Mikäli sulatukseen ei käytettäisi energiaa ja tämä aika käytettäisiin pelkästään lämmitykseen, joka laskettiin kappaleessa 5.1:

$$\text{COP} = \frac{34336 \text{ kWh} + 8340 \text{ kWh}}{10699 \text{ kWh}} = 4,0$$

Oletuksena, että lämmitys- ja sulatusvaiheiden energiankulutus on sama. Näistä luvuista kuitenkin huomaa, että sulatuksella on merkittävä vaikutus COP-arvoon ja tämän myötä myös lämmitysenergian edullisuuteen.

5.4 Energiajakauma

Sähkön hinta Suomessa on kasvanut muutaman vuosikymmenen ajan ja viime vuosina vauhti on kiristynyt. Tämän työn laskelmissa on käytetty vuoden 2021 vuoden alusta vuoteen 2022 tammikuuhun saakka laskettua keskiarvollista sähkön hintaa, joka oli 23,12 snt/kWh. Tämä hinta sisältää keskiarvoiset myyntihinnat, siirtomaksun sekä verot. (Energiavirasto n.d.)

Vertaillen ulkoyksikön lämmitysenergian tuottoa ja sulatusenergiaan menevää energian määrää:

$$\%_{sulatus} = \frac{1582 \text{ kWh}}{34436 \text{ kWh}} \cdot 100 \% = 4,59 \%$$

Mikäli huomioidaan se energia, joka jäi sulatusvaiheiden aikana tekemättä (Taulukko 5) olisi tämä 28,8 % tuotetun energian osuudesta. Suoranaisesti yhteen ulkoyksikön sulatukseen kohdistuvan energian rahallinen arvo:

$$\text{€}_{sulatus} = 1582 \text{ kWh} \cdot 0,2312 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 365,76 \text{ €}$$

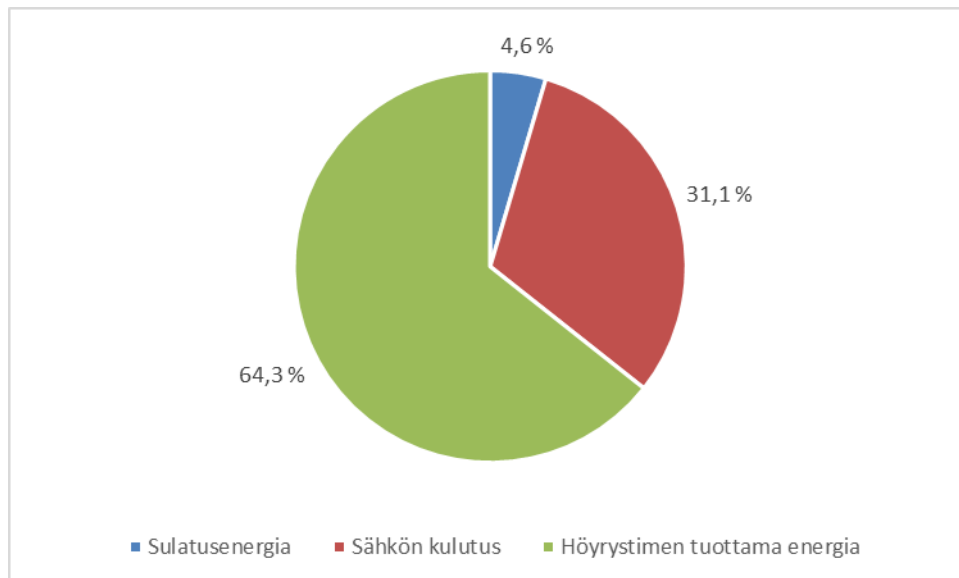
Tähän lisättyä tekemättä jäänyt energia, niin arvo on 2317,09 euroa, jos käytettäisiin suora sähköä. Pelkästään ulkoyksikön sulattamiseen kulunut energian osuus on noin 14,8 % mittausjakson energiankulutuksesta. Ilma-

vesilämpöpumpun COP-arvon ollessa 3,21, niin näkyy tämä konkreettisesti sähkölaskussa:

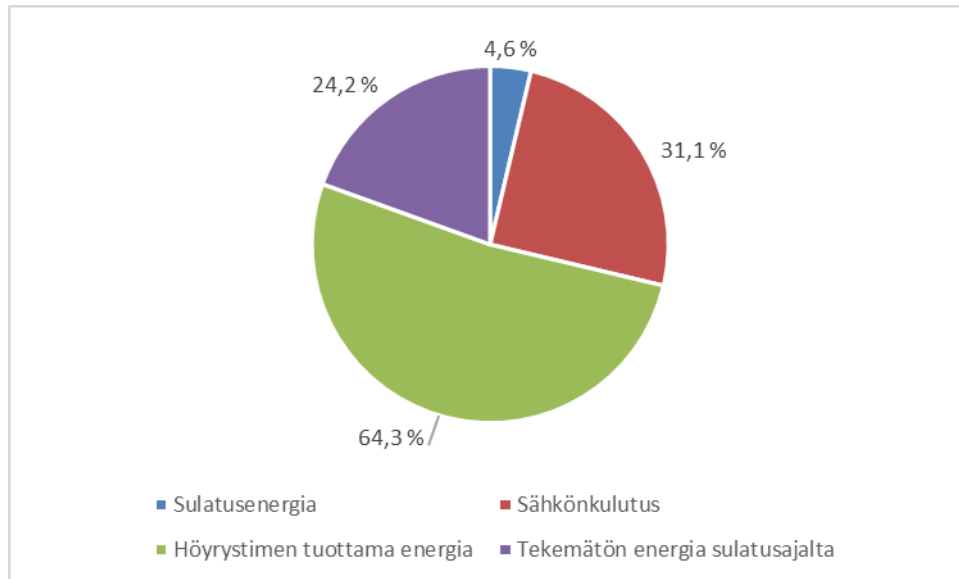
$$\Phi_{kompressori} = \frac{\Phi_{sähkö}}{COP} \cdot \epsilon_{sähkö} = \frac{1582 \text{ kWh}}{3,21} \cdot 0,2312 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 113,94 \text{ €}$$

Jos otetaan huomioon tekemättä jäänyt energia, hinta olisi 714,63 euroa. Olettaen, että lämmitysenergialle on tarvetta sulatusjaksojen aikana.

Kuvioissa 13 ja 14 on havainnollistettu tarkastelun kohteena olevien osa-alueiden energiajakaumaa. Kuviossa 11 on esitetty sähkön kulutuksen, sulatusenergian ja höyrystimeltä saatujen energioiden osuudet ulkoyksikön tuottamasta lämpöenergiasta. Kun huomioidaan ajanjaksot, jolloin ulkoyksikkö oli sulatusjaksolla, niin sulatusenergian osuus on huomattavasti suurempi. Kuviossa 12 on sulatusenergiaan lisätty energia, joka jäi sulatusajalta tekemättä. Kun tämä otetaan sulatusenergian tarkastelussa huomioon, alkaa tämä lähentelemään ulkoyksikön sähköenergian kulutusta.



Kuvio 13. Sulatusenergian, sähkönkulutuksen sekä höyrystimeltä saadun energian osuudet ulkoyksikön tuottamasta energiasta, joka oli 34436 kWh.



Kuvio 14. Sulatusenergian, sähkön kulutuksen, höyrystimeltä saadun energian sekä sulatusajalta tekemättä jääneen energian osuudet ulkoyksikön tuottamasta energiasta, joka oli 34436 kWh.

6 Yhteenveto

Sulatusenergian määrällä on tämän datan perusteella huomattava merkitys ilma-vesilämpöpumpun energiankulutukseen. Varsinkin, kun sulatusenergian määrää verrataan ulkoyksikön sähkönkulutuksen osuuteen ja hyötysuhteisiin sekä siihen, mitä ne olisivat ilman sulatukseen kuluva energiaa. Lisäksi sulatusajalta tekemättä jääneen lämpöenergian määrä on suuri. Kun ajatellaan sulatusenergiana näiden kahden summaa, on se lähes käytetyn sähköenergian verran menetettyä energiaa. Kuitenkin vuosittainen hyötysuhde on tässä työssä laskettuja hyötysuhteita selkeästi parempi, koska kevät-, kesä- ja syyskuukausina sulatukselle ei ole tarvetta tai ne ovat hyvin marginaalisia. Lisäksi rakennuksen lämmitykselle ei ole samanlaista tarvetta, kuin talvikuukausina.

Työssä esitettyjen kuvioiden perusteella voidaan todeta, että sääolosuhteilla on merkittäviä vaikutuksia sulatusenergiaan. Näistä löydöksistä merkittävin on ilman absoluuttisen kosteuden ja höyrystimen sisällä olevan ilman maksimiabsoluuttisen kosteuden muutos, joka kuvaa karkeasti kuinka paljon vettä on tiivistynyt lamellien pinnoille vuorokauden aikana. Tähän liittyvä x, y-koordinaatiston pisteiden trendiviivan selityskertoimeksi saatiin liki 86 % (Kuvio 6). X-akseliksi valittiin ulkoilman absoluuttisen kosteuden ja höyrystimen lamellien välistä kulkevan ilman lämpötilaa vastaava maksimikosteuden muutos. Y-akselilla vuorokauden aikana sulatukseen kuluvan energian määrä. Toisessa löydöksessä absoluuttisen kosteuden määrän pistekaavio (Kuvio 5), jossa x-akselilla on ilman absoluuttisen kosteuden määrä ja y-akselilla sulatusenergia. Pistekaaviolla (Kuvio 5) saatiin heikompi yhteys sulatusenergialle kuin vastaavalla lämpötilan pistekaaviolla (Kuvio 2), vaikka nämä kuitenkin ovat vahvasti kytköksissä toisiinsa. Lämpötilan ja kosteuden määrässä kuitenkin tarkasteltiin vain, että voiko tietyille kosteuden tai lämpötilan arvoille ennustaa tiettyä sulatusenergian määrää. Tämän työn perusteella kuitenkin pelkällä määrällä ei ole niinkään merkitystä, kuin muutoksella ja nimenomaan höyrystimen sekä sitä ympäröivän ilman kosteuksien muutoksella. Höyrystin on

aina kylmempi kuin ilma ja siihen koko ilma-vesilämpöpumpun energian siirtäminen perustuu, eli aina tapahtuu lämpötilan muutosta ja sitä myötä myös ilman kosteuden muutosta. Painoarvoa näyttäisi olevan kuitenkin sillä, että kuinka suuri tämä muutos on. Kuviossa 7 ja 8 tehdyssä mallifunktiossa piti ulkolämpötilan arvoja rajoittaa, koska kerättyä dataa ei ollut riittävästi. Muuten funktio antaisi suuria sulatusenergiämääriä, vaikka ulkolämpötila on +20 °C. Mikäli tallennettu tietomäärä olisi ollut kattavampi, tämä olisi myös tehnyt funktioista ”viisaampia”. Tällöin funktiot olisivat myös huomioineet pisteet, jolloin lamellien pinnoille tiivistyy paljon kosteutta, mutta sulatusenergian määrä on silti nolla. Tämän työn datasta puuttuu täysin kesäkuukausien tiedot. Tämän vuoksi 3D-funktiota piti rajoittaa siten, että se antaa suuntaa sulatusenergian määrälle syys-, talvi- ja kevätkuukausina.

Lähteet

Aittomäki, A. 2012. Kylmäteknikka. 4. painos. Porvoo: Bookwell Oy.

Alfa Laval N.d. Industrial gasketed plate heat exchangers. Viitattu 3.4.2022.

<https://www.alfalaval.fi/microsites/tiivisteelliset-levylammonvaihtimet/mallit/teolliset/>

Gavazzi, C. N.d. EM300 Series and ET300 Series communication protocol.

Viitattu 28.2.2022 <https://kesko-onninen-pim-resources-production.s3-eu-west-1.amazonaws.com/pimdocuments/EM3x0%20and%20ET3x0%20Modbus%20protocol%20rev.2.11.pdf>

Danfoss N.d. Thermostatic expansion valves. Viitattu 10.3.2022.

<https://www.danfoss.com/en/products/dcs/valves/thermostatic-expansion-valves/thermostatic-expansion-valves/#tab-support>

Energiavirasto n.d. Sähkön hintatilastot. Viitattu 28.3.2022.

<https://energiavirasto.fi/sahkon-hintatilastot>

Engineerin ToolBox 2008. Air - Maximum Moisture Carrying Capacity. Viitattu

23.3.2022. https://www.engineeringtoolbox.com/maximum-moisture-content-air-d_1403.html

Hakala, P. & Kaappola, E. 2005. Kylmälaitoksen suunnittelu. 1.Painos. Helsinki: Opetushallitus.

Huang, D. He, Z Yuan, X. 2007. Dynamic characteristics of an air-to-water heat pump under frosting/defrosting conditions. Applied thermal engineering. Vol 27 (11), 1996–2002.

Ilmatieteenlaitos N.d. Havaintojen lataus. Viitattu 4.4.2022.

<https://www.ilmatieteenlaitos.fi/havaintojen-lataus>

Inkinen, P. & Tuohi, J. 2006. Momentti 1. Insinöörifysiikka. 4. Painos. Helsinki: Otava.

Kaappola, E. Hirvelä, A. Jokela, M. & Kianta, J. 2011. Kylmäteknikan perusteet. Helsinki: Opetushallitus.

Engineer toolbox 2005. Refrigerants – Physical properties. Viitattu 23.2.2022.
https://www.engineeringtoolbox.com/refrigerants-d_902.html

Motiva Oy 2012. Lämpöä ilmassa. Viitattu 21.3.2022.
https://www.motiva.fi/ajankohtaista/julkaisut/kaikki_julkaisut/lampoa_ilmassa_ilmalampopumput.9236.shtml

Motiva Oy 2022. Ilma-vesilämpöpumppu. Viitattu 1.3.2022.
https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/lampopumput/lampopumpput_eknologiat/ilma-vesilampopumppu

Pandas documentation 2019. Pandas.merge_asof. Viitattu 19.3.2022.
https://pandas.pydata.org/pandas-docs/version/0.25.0/reference/api/pandas.merge_asof.html

Saint-Gobain Oy 2021. Sharky 775. Viitattu 9.3.2022.
[file:///C:/Users/aleks/Downloads/Esite_MIT_Sharky%20775%20-energiamittari%202021.03%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/aleks/Downloads/Esite_MIT_Sharky%20775%20-energiamittari%202021.03%20(1).pdf)

Sandberg, E. 2016. Ilmastointilaitoksen mitoitus. 2. painos. Helsinki: Talotekniikka-Julkaisut Oy

Suomen Lähienergialiitto ry 2019. Maa-, ilma- ja vesilämpö. Viitattu 18.3.2022.
<https://lahienergia.org/lahienergia/maa-ilma-ja-vesilampo/>

Suomen lämpöpumppuyhdistys 2021. Myydyt lämpöpumput, kappaleina, euroina, kumulatiivisesti ja tyypeittäin. Viitattu 18.3.2022.
<https://www.sulpu.fi/wp-content/uploads/2022/01/SULPU-lampopumpputilasto-2021-kuvaajat.pdf>

Trott, A. R. 2008. Refrigeration and air-conditioning. 4. Painos. Oxford: Butterworth Heinemann.

Mitattujen tietojen yhdistäminen ja sulatusenergian laskenta

```
import pandas as pd
import numpy as np

#Absoluuttisen kosteuden laskeminen ja lisääminen tiedostoon
def lisaa_vedenpitoisuus(df_merged):
    df_merged["Ilman lamputila"] = df_merged["Ilman lamputila"].round(1)
    df = pd.read_csv("Kosteus2.csv",sep=";", usecols=["lamputila",
"max"],decimal=",")
    lamputila = list(df["lamputila"])
    max_kosteus = list(df["max"])
    d = dict(zip(lamputila,max_kosteus))
    muutettavat = list(df_merged["Ilman lamputila"])
    suht_kost = list(df_merged["Suhteellinen kosteus"])
    vetta_kuutiossa = list()
    max_hoyrypitoisuus = list()
    for i,lamputila in enumerate(muutettavat):
        max = d.get(lamputila)
        kosteus = max * suht_kost[i] / 100
        vetta_kuutiossa.append(kosteus)
        max_hoyrypitoisuus.append(max)
    df_merged["Absoluuttinen kosteus g/m3"] = vetta_kuutiossa
    df_merged["max höyry"] = max_hoyrypitoisuus
    return df_merged

#Lisätään tiedostoon ilman tiheydet keskiarvollisen lämpötilan mukaan
def Lisaa_ilman_tiheys(df_merged):
    df_merged["Ilman lamputila"] = df_merged["Ilman lamputila"].round(1)
    df = pd.read_csv("Tiheydet.csv",sep=";", usecols=["Tilma",
"Ideal"],decimal=",")
    df = df.dropna(how="any",axis=0)
    Tiheys = list(df["Ideal"])
    Tilma = list(df["Tilma"])
    d = dict(zip(Tilma,Tiheys))
    muutettavat = list(df_merged["Ilman lamputila"])
    Tiheydet = list()
    for lamputila in muutettavat:
        Tiheydet.append(d.get(lamputila))
    df_merged["Ilman tiheydet"] = Tiheydet
    return df_merged

#X laskeminen
```

```
def Laske_x(df_merged):
    df_merged["Absoluuttinen kosteus kgv/kgi"] =
(df_merged["Absoluuttinen kosteus g/m3"]/1000) / df_merged["Ilman
tiheydet"]
    return df_merged

#Vuorokauden keskiarvollinen sulatukseen kuluva energian laskeminen
def Laske_energia(df_merged):
    df_merged["Energia"] = df_merged["Teho"]*df_merged["Aika"]*60*(-1)
    df_merged["kWh"] = df_merged["Energia"]/3600000

#Lämmitysjärjestelmän datan suodatus
data = pd.read_csv("F2120-1-LOKA-MAALIS.csv",usecols=
['energia','teho','virtaus',"menolampo","paluulampo","Time"])
data = data.replace("", np.nan)
data = data.dropna(how="any",axis=0)
data = data[data.teho < 0]
data = data[data.virtaus != 0]

#Päivämäärän asetus
data["date"] = data["Time"].astype(str)
data[["pvm","klo"]] = data["date"].str.split(" ",expand=True)
data["date"] = data["pvm"].astype(str) + " " + data["klo"].astype(str)
data["date"] = pd.to_datetime(data["date"])
data = data.drop(columns=["pvm","klo","Time"])
data = data.set_index("date")

#ilmatieteen laitoksen datan suodatus
ilmatieteen_laitos = pd.read_csv("ilmatieteen-laitos-loka-
maalis.csv",usecols= ['Vuosi','Kk',"Pv","Klo","Suhteellinen
kosteus","Ilman lampotila"])
ilmatieteen_laitos = ilmatiete_n_laitos.replace("",np.nan)
ilmatieteen_laitos = ilmatiete_n_laitos.dropna(how="any", axis=0)

#Päivämäärän asetus
ilmatieteen_laitos["date"] = ilmatiete_n_laitos["Vuosi"].astype(str)+"-
"+ilmatiete_n_laitos["Kk"].astype(str)+"-
"+ilmatiete_n_laitos["Pv"].astype(str)+" "+ilmatiete_n_laitos["Klo"]
ilmatieteen_laitos["date"] = pd.to_datetime(ilmatiete_n_laitos["date"])
ilmatieteen_laitos = ilmatiete_n_laitos.set_index("date")
ilmatieteen_laitos =
ilmatiete_n_laitos.drop(columns=["Vuosi","Klo","Pv","Kk"])

#Ilman kosteuden ja lämpötilojen keskiarvojen laskeminen
ilmatieteen_laitos2 =
ilmatiete_n_laitos.groupby(pd.Grouper(level="date",freq="D")).mean()
```

```
#Datan jakaminen vuorokauden jaksoihin
df_merger_split = data.groupby(pd.Grouper(level="date", freq="D"))

#Keskiarvojen laskenta
idx = list()
vrk_ka_teho = list()
ilman_kosteus = list()
ilman_lamputila = list()
minuutit = list()
for _, df_vrk in df_merger_split:
    if df_vrk.shape[0] == 0:
        continue
    vrk_ka_teho.append(df_vrk["teho"].mean())
    idx.append(df_vrk.index[df_vrk.shape[0]-1])
    minuutit.append(df_vrk.shape[0])
d = {"Teho" : vrk_ka_teho, "Aika" : minuutit}
ka = pd.DataFrame(index=idx,data=d)
ka.index.name = "date"

#Mittaustiedostojen yhdistäminen
df_merged = pd.merge_asof(ka,ilmatieteen_laitos2,on="date")

#Laskeminen ja Exceeliin vienti
df_merged = df_merged.set_index("date")
lisaa_vedenpitoisuus(df_merged)
Lisää_ilman_tiheys(df_merged)
Laske_x(df_merged)
Laske_energia(df_merged)
df_merged.to_excel("UY-1-output_LÄMMITYS-loka-maalis.xlsx",
sheet_name="sheet1")
```