

Opinnäytetyö (YAMK)

Hajautettu energiantuotanto

2023

Petri Hautakoski

Ilmalämpöpumpun sulatusjakson tehostaminen lämpövaraston avulla

TURKU AMK 
TURKU UNIVERSITY OF
APPLIED SCIENCES

Opinnäytetyö (YAMK) | Tiivistelmä

Turun ammattikorkeakoulu

Hajautettu energiantuotanto

2023 | 53 sivua

Petri Hautakoski

Ilmalämpöpumpun sulatusjakson tehostaminen lämpövaraston avulla

Ilmalämpöpumput ovat energiatehokkaita lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmiä. Yksi lämpöpumpun toiminnan merkittävimmistä haasteista on huurteen kerääntyminen ulkoyksikön lämmönsiirtimeen talvikaudella. Perinteisinä sulatusmenetelminä käytetään lämpöpumpun käänteistä kiertosulatusa sekä kuumakaasusulatusa. Molemmista sulatusmenetelmistä seurauksena on lämmitystoiminnon tilapäinen keskeytys.

PCM-lämmönvarastointi on innovatiivinen lähestymistapa sulatusprosessin optimointiin ja energiankulutuksen vähentämiseen. Tässä opinnäytetyössä tarkastellaan lämpöpumpun toiminnan periaatteita, sulatukseen liittyviä haasteita ja PCM-lämpövarastolla mahdollisesti saavutettavia hyötyjä. Kokeellisessa osassa tutkittiin lämmönvaraston vaikutusta käänteistä kiertosulatusa käyttävän ilmalämpöpumpun sulatusjaksojen kestoon sekä energiankulutukseen.

Kokeellista osiota varten rakennettiin koelaitteisto, jossa ilmalämpöpumppuun liitettiin omavalmisteinen latenttia ja tuntuvaa lämpöä varastoiva lämpövarasto. Koeajon perusteella lämpövarasto sekä lyhensi sulatusjaksojen kestoa että pienensi sisäyksikön lämpötilavaihteluita. Koelaitteistolla tehty tutkimus tukee aiheesta aikaisemmin tehtyjen tutkimusten tuloksia sulatusjaksojen lyhentymisestä sekä lämpökertoimen parantumisesta. Lämpövarastolla tuettu sulatus vähentää sisäilman lämpötilavaihteluita.

Asiasanat:

Lämpövarasto, faasimuunnosmateriaali, latentti lämpö

Master's Thesis | Abstract

Turku University of Applied Sciences

Decentralized energy production

2023 | 53 pages

Petri Hautakoski

Enhancing the air heat pump's defrosting cycle with the help of heat storage

Air source heat pumps are energy efficient heating and air conditioning systems. One of the most significant challenges of heat pump operation is the accumulation of frost in the heat exchanger of the outdoor unit during the winter season. Traditional defrosting methods use heat pump reverse circulation defrosting and hot gas defrosting. The result of both defrosting methods is a temporary interruption of the heating function.

PCM heat storage is an innovative approach to optimizing the melting process and reducing energy consumption. This thesis examines the principles of heat pump operation, the challenges related to defrosting and the benefits that can be achieved with PCM heat storage. In the experimental part, the effect of heat storage on the duration of the defrost cycles and energy consumption of an air source heat pump using reverse circulation defrosting was investigated.

For the experimental section, a test equipment was built, where a self-made heat storage, storing latent and sensible heat, was connected to the air source heat pump. Based on the trial run, the thermal storage both shortened the duration of the defrost cycles and reduced the temperature fluctuations of the indoor unit. The research carried out with the test equipment supports the results of earlier studies on the topic regarding the shortening of the defrosting cycles and the improvement of the heat coefficient. Defrosting supported by a thermal storage reduces temperature fluctuations in the indoor air.

Keywords:

Heat storage, Phase change material, latent heat

Sisältö

Käytetyt lyhenteet tai sanasto	8
1 Johdanto	9
2 Lämpöpumpun toiminta ja huurteen muodostuminen	10
2.1 Kylmätekninen kiertoprosessi	10
2.2 Huurteen muodostuminen	12
2.3 Perinteisten sulatusmenetelmien haasteet	15
3 Faasimuutosmateriaalit	17
3.1 Faasimuutosmateriaalien määritelmä ja ominaisuudet	17
3.2 Ilmalämpöpumpun lämpövarastoksi soveltuvat faasimuunnosmateriaalit	18
3.3 Tuntuva ja latentti lämpö	20
3.4 PCM-lämpövarastolla saavutettavat edut	21
3.5 Aikaisemmissa tutkimuksissa käytettyjen koelaitteistojen rakenteita	22
4 Koelaitteiston suunnittelu	27
4.1 PCM-lämpövarastointijärjestelmien suunnittelunäkökohdat	27
4.1.1 Lämpövaraston faasimuutosmateriaalin valinta	27
4.1.2 PCM-lämpövaraston integrointi lämpöpumppujärjestelmään	28
4.1.3 Koelaitteiston ohjausjärjestelmä	29
4.2 Lämpövaraston mitoittaminen koelaitteistoon	31
4.3 Lämpövaraston rakentaminen	39
5 Koelaitteiston koeajo	44
5.1 Tutkimuksen tavoite	44
5.3 Tutkimuksen suorittaminen	44
6 Tulokset ja analyysi	47
7 Johtopäätökset	50
7.1 Edut	50
7.2 Rajoitukset	50

7.3 Tulevaisuuden tutkimussuunnat	51
8 Yhteenveto	53
Lähteet	55

Liitteet

Liite 1. Panasonic CS-W9CKP / CU-W9CKPS tekniset tiedot

Kaavat

Kaava 1. Tuntuvan lämmön varastointi (Azizi & Castelló Péres 2016, 22).	20
Kaava 2. Latentin lämmön varastointi (Azizi & Castelló Péres 2016, 22).	20
Kaava 3. Tuntuvan ja latentin lämmön varastointi (Azizi & Castelló Péres 2016).	21
Kaava 4. Nusseltin luku (Hirvijoki 2022).	36
Kaava 5. Prandtlin luku (Lampinen & Kotiaho 2015).	36
Kaava 6. Rayleighin luku (Lampinen & Kotiaho 2015).	36
Kaava 7. Lämpölaajenemiskerroin (Szergényi, I. 1974).	36
Kaava 8. Grashofin luku (Lampinen & Kotiaho 2015).	37
Kaava 9. Nusseltin luku (Hirvijoki 2022).	38
Kaava 10. Lämmönsiirtokerroin (Hirvijoki 2022).	38
Kaava 11. Lämmönsiirtoteho (Lampinen & Kotiaho 2015).	38

Kuvat

Kuva 1. Kylmätekniinen kierto-prosessi	10
Kuva 2. Lämpöpumppu, jossa on jäähdytystoiminto	11
Kuva 3. Lämpöpumppu, jossa on lämmitystoiminto	11

Kuva 4. Kaavioesitys huurtumisprosessista kylmällä pinnalla	Virhe.
Kirjanmerkkiä ei ole määritetty. 3	
Kuva 5. Lämpösulatusmenetelmien toimintakaavio	15
Kuva 6. Lämpöpumppujen lämpövarastorakenteita	19
Kuva 7. Ilmalämpöpumpun sarjasulatusjärjestelmä	Virhe. Kirjanmerkkiä ei ole määritetty. 3
Kuva 8. Ilmalämpöpumpun sarja- ja rinnakkaissulatusjärjestelmä	Virhe.
Kirjanmerkkiä ei ole määritetty. 4	
Kuva 9. Kompressorin hukkalämpöä hyödyntävä lämpövarasto ja jatkuva lämmitys	Virhe. Kirjanmerkkiä ei ole määritetty. 5
Kuva 10. PCM-lämpövarasto kaskadilämpöpumpussa	Virhe. Kirjanmerkkiä ei ole määritetty. 6
Kuva 11. Koelaitteiston ilmalämpöpumppu	Virhe. Kirjanmerkkiä ei ole määritetty. 9
Kuva 12. Sulatukseen käytettävän energian jakauma	Virhe. Kirjanmerkkiä ei ole määritetty. 33
Kuva 13. Sulatuslämmönlähteiden jakauma	34
Kuva 14. Kierukan taivutus käynnissä	40
Kuva 15. Valmis kierukka lämpövaraston sisällä	40
Kuva 16. Koelaitteiston palloventtiiliasetelma	41
Kuva 17. Lämpövaraston grafiittijauhe-parafiinivahatäyttö	42
Kuva 18. Koelaitteiston kokoonpano ulkona	Virhe. Kirjanmerkkiä ei ole määritetty.
Kuva 19. Koelaitteiston kokoonpano sisällä	43
Kuva 20. Home Assistant logitietoa	45
Kuva 21. Parafiinivahatäyttö koejakson jälkeen	46

Kuviot

Kuvaotsikkoluettelon hakusanoja ei löytynyt. Kuvio 2. Sisäyksikön lämpötila sulatusjaksojen aikana	48
---	----

Taulukot

Taulukko 1. Ulkolämmönsiirtimen geometriatiedot **Virhe. Kirjanmerkkiä ei ole määritetty.**

Käytetyt lyhenteet tai sanasto

COP-arvo	lämpökerroin
Dynaaminen viskositeetti	paineen ja ajan tulo
Eutektinen seos	kahden tai useamman kiteisen aineen hienojakoinen kiinteä fysikaalinen seos
Hyötysuhde	hyötyenergian suhde kokonaisenergiaan
Kinemaattinen viskositeetti osamäärä	dynaamisen viskositeetin ja tiheyden
Latentti lämpö	faasimuunnoksen yhteydessä sitoutuva ja vapautuva lämpö
Lämpökerroin	lämpöenergian suhde sähköenergiaan
Lämpökonduktanssi	lämmön kulkeutumisenopeus materiaalissa
Rasvahappo	ketjumainen rengasrakenteeton monokarboksyylihappo
PCM	faasimuunnosmateriaali
RH	vesihöyryn prosentuaalinen osuus kyllästyspistettä vastaavasta vesihöyryn määrästä sen hetkisessä lämpötilassa
Sokerialkoholi	hiilihydraattien hydrattu muoto polyoli
Suolahydraatti	epäorgaanisten suolojen ja veden seos
terminen diffusiivisuus	materiaalin lämmönjohtavuuden suhde tilavuudelliseen ominaislämpökapasiteettiin
Tuntuva lämpö	materiaalille ominainen kyky sitoa lämpöä itseensä

1 Johdanto

Energian hinnan kallistuminen ja ilmastonmuutoksen torjunta ovat sysänneet energiamarkkinat muutokseen. Perinteisten lämmitysjärjestelmien tilalle vaihdetaan energiatehokkaampia ja ympäristöystävällisempiä lämmitysmuotoja. Lämpöpumput ovat osoittautuneet toimiviksi lämmönlähteiksi ja niiden ominaisuudet ovat kehittyneet siten, että ne ovat energiataloudellisesti järkeviä myös kylmässä ilmastossa. European Heat Pump Associationin alustavien tilastojen mukaan Suomessa on 1,45 miljoonaa lämpöpumppua, mikä on väkilukuun suhteutettuna eniten koko Euroopassa (LämpöYkkönen Oy 2023).

Ilmalämpöpumppujen keskeisin haaste on ulkolämmönsiirtimen huurtuminen tietyissä olosuhteissa ja pumppujen sulatustoimintojen optimoimiseen on panostettu suunnittelussa. Laadukkaammissa pohjosiin oloihin suunnitelluissa ilmalämpöpumpuissa on kehittynyt sulatustekniikka, joka tunnistaa ulkoyksikön sulatustarpeen silloin kun sen lämmönsiirtokyky heikentyy ja laite siirtyy sulatustoiminnolle automaattisesti. Laitteisto osaa myös seurata sulatusprosessia ja siirtyä takaisin normaalitoimintaan heti kun kenno on sulanut riittävästi (Solves 2023).

Lämpöpumpun sulatus on kriittinen prosessi jään muodostumisen torjumiseksi ja lämpöpumppujärjestelmien optimaalisen toiminnan varmistamiseksi. Perinteiset sulatusmenetelmät ovat kuitenkin energiantensiivisiä ja aikaa vieviä. PCM-lämmönvarastointi tarjoaa lupaavan ratkaisun absorboimalla lämpöä lämmityksen ohessa ja vapauttamalla sitä sulatusprosessin aikana, mikä parantaa järjestelmän yleistä tehokkuutta.

Opinnäytetyön tavoitteena oli tutustua faasimuunnosta hyödyntävien lämpövarastojen toimintaan sekä tutkia niiden soveltuvuutta ilmalämpöpumpun sulatuksen tehostamiseen.

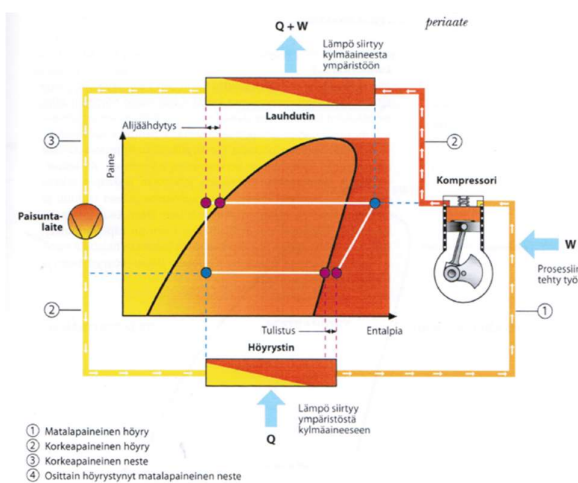
Lämpövaraston hyötyjen selvittämiseksi rakennettiin lämpövarasto, jossa faasimuunnosta hyödyntäen varastoitettiin energiaa lämmitysjakson aikana ja sulatuksen käynnistyessä energiaa vapautettiin tukemaan sulatusta.

2 Lämpöpumpun toiminta ja huurteen muodostuminen

2.1 Kylmätekniinen kiertoprosessi

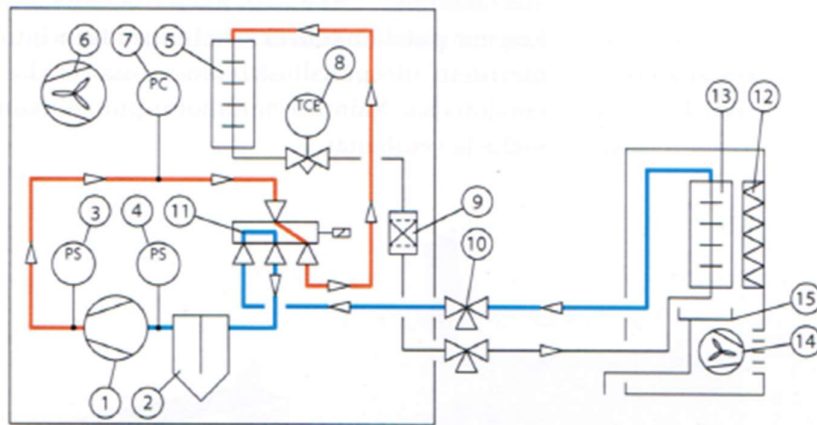
Kylmäteknisessä kiertoprosessissa siirretään tehdyn työn avulla lämpöä matalammasta lämpötilasta korkeampaan. Kiertoprosessi perustuu työaineena toimivan kylmäaineen höyrystymiseen ja lauhtumiseen eri painetasoilla.

Kylmätekniistä kiertoprosessia hyödynnetään monissa eri laitteissa, muun muassa lämpöpumpuissa. Lämpöpumpujen keskeisimpiä komponentteja ovat höyrystin, lauhdutin, kompressori ja paisuntalaite. Höyrystimessä matalapaineinen ja lämpötilainen kylmäaine sitoo lämpöä ympäristöstään ja höyrystyy. Höyrystynyt kylmäaine imetään kompressoriin, joka puristaa kylmäaineen korkeampaan paineeseen. Puristuksen aikana kylmäaine tulistuu ja sen lämpötila nousee merkittävästi. Kompressorista korkeapaineinen ja -lämpöinen tulistunut höyry johdetaan lauhduttimeen, jossa kylmäaine jälleen tiivistyy nesteeksi eli lauhtuu luovuttaen samalla lämpöenergiaa ympäristöönsä. Lauhduttimesta kylmäaine siirtyy paisuntalaitteelle, jossa nestemäisen kylmäaineen paine ja lämpötila laskevat ja osa seoksesta höyrystyy jo ennen höyrystintä. Tämän jälkeen kiertoprosessi alkaa jälleen alusta. Kylmätekniinen kiertoprosessi on esitetty kuvassa 1.

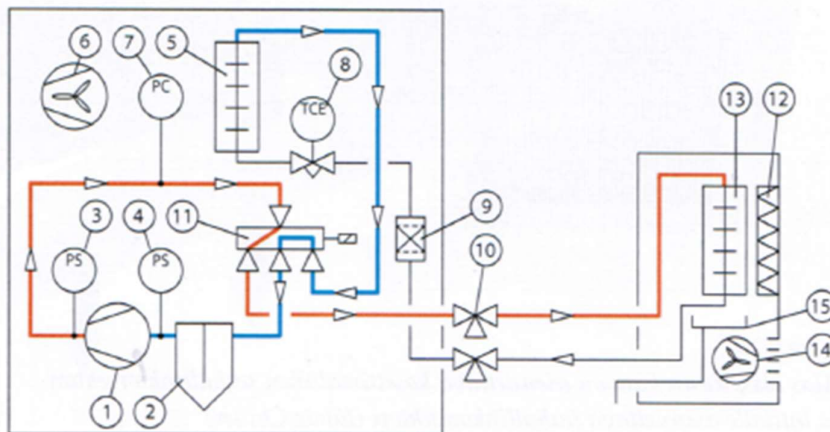


Kuva 1. Kylmätekniinen kiertoprosessi (Kaapola ym. 2020, 17.)

Ilmalämpöpumpua voidaan käyttää kahdessa eri toimintatilassa. Jäähdytyskäytössä sisäyksikön lämmönsiirrin toimii höyrystimenä ja ulkoyksikön lämmönsiirrin lauhduttimena. Lämmityskäytössä em. yksiköt vaihtavat toiminnallisuutta keskenään. Jäähdytys- ja lämmitystoimintojen välillä siirtyminen edellyttää kiertoprosessin suunnan muutosta. Tämä toteutetaan ilmalämpöpumpussa olevan 4-tiemagneettiventtiilin avulla. Kuvassa 2 esitetään lämpöpumpun jäähdytystoiminto kaaviona ja kuvassa 3 lämpöpumpun lämmitystoiminto kaaviona. Korkeapaineinen kylmäaine esitetään punaisella värillä ja matalapaineinen sinisellä.



Kuva 2. Lämpöpumppu, jossa on jäähdytystoiminto (Kaapola ym. 2020, 93.)



Kuva 3. Lämpöpumppu, jossa on lämmitystoiminto (Kaapola ym. 2020, 93.)

2.2 Huurteen muodostuminen

Lämmityskäytössä ilmalämpöpumput ottavat lämpöä ulkoilmasta ja siirtävät sitä sisätiloihin. Kylmissä olosuhteissa ilman kosteus voi alkaa tiivistyä ja jäätyä ulkoyksikön lämmönsiirtimeen, mikä jatkuessaan heikentää ilman virtausta kennon läpi ja heikentää siten lämpöpumpun lämpökerrointa.

Merkittävimmät tekijät jään ja huurteen muodostumiseksi ovat lämpötila, ilmanpaine ja kosteus. Normaalisissa ilmanpaineissa jäätä ja huurretta muodostuu 0 °C:een lämpötilassa. (Karttunen ym. 2008.)

Vesihöyry pysyy höyrynä, kunnes vesihöyryn osapaine ylittää kriittisen pisteensä ja alkaa tiivistyä vedeksi. Huurretta voi muodostua vesihöyrystä tai vesipisaroista myös, kun nämä joutuvat kosketuksiin kylmän kiinteän aineen kanssa, jonka pintalämpötila on kastepistettä alhaisempi ja alle 0 °C. (Sandberg 2014.)

Zhangin ym. (1997) mukaan huurtumisolosuhteiden täytyessä, huurretta alkaa muodostua seuraavien vaiheiden kautta: vesipisarat → jääkerros → huurrekide → huurrehaara → huurrekerros. Jääkerroksen paksuus kasvaa lämpöpumpun toiminnan myötä yhä paksummaksi. (Shen ym. 2019, 492.)

Minglu ym. (2012) osoittavat ilmalämpöpumpun ulkoyksikön kennon "huurtumis- / jäätymisilmiön" tapahtuvan, kun seuraavat kaksi ehtoa täyttyvät:

1. ulkoyksikön kennon pintalämpötilan tulee olla alle 0 °C
2. ulkoyksikön kennon pintalämpötilan on oltava alhaisempi kuin ympäröivän ilman kastepistelämpötila

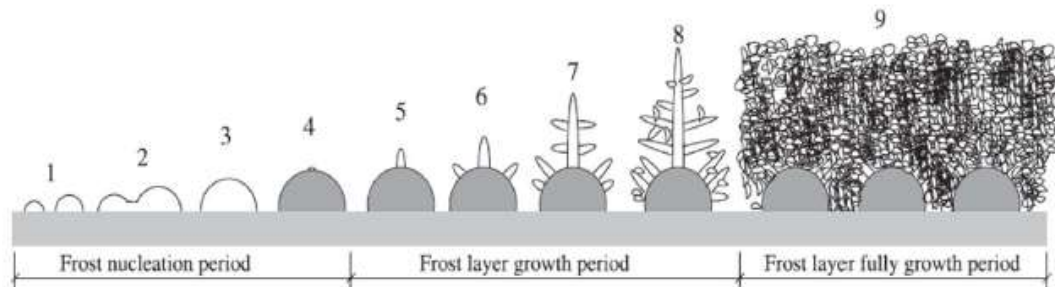
Ulkoyksikön lämmönsiirtimen lämpötilaan vaikuttaa lämpötilaero kylmäaineen höyrystymislämpötilan ja ulkolämpötilan välillä. Ulkoilman suhteellinen kosteus puolestaan määrittää kastepistelämpötilan. Huurteen muodostumisen kannalta ulkoilman lämpötila ja kosteus ovat kaksi merkittävintä kriteeriä. Huurtumista voi tapahtua lämmönsiirtimen kennoon myös ulkolämpötilan ollessa nollan

yläpuolella, koska kylmäaineen lämpötila on höyrystymisestä johtuen negatiivinen. (Shen ym. 2019, 492.)

Piucon ym. (2008) mukaan huurteen muodostuminen voidaan jakaa kolmeen eri vaiheeseen, Näitä vaiheita ovat:

1. huurteen muodostumisjakso (kiteinen)
2. huurteen kasvujakso
3. huurrekerroksen täysi kasvujakso

Jaksot on esitetty kuvassa 4.



Kuva 4. Kaavioesitys huurtumisprosessista kylmällä pinnalla (Amer & Wang 2017, 55.)

Wangin ym. mukaan otollisin ulkolämpötila huurteen muodostukselle lämmönvaihtimessa on ulkolämpötilan ollessa $-5...+5$ °C välillä ja kun suhteellinen kosteus on yli RH 70 %. Ulkolämpötilan ollessa < -5 °C, edes korkeassa ilman suhteellisessa kosteudessa ei tapahdu merkittävää huurteen muodostumista, koska absoluuttisesti ilmassa on hyvin vähän kosteutta. (Shen ym. 2019, 492.)

Cunyangin ym. (1986) mukaan japanilaisessa kokeellisessa tutkimuksessa todettiin, että huurtumisen mahdollistavat olosuhteet vallitsevat ulkolämpötilan ollessa $-12,8...+5,8$ °C. Lisäksi ilman suhteellisen kosteuden tulee olla vähintään RH 67 %. Ameenin ym. (1993) mukaan huurretta syntyy merkittävästi

ulkolämpötilan laskiessa $-7 \dots -5,5$ °C:een ja suhteellisen kosteuden ollessa $> RH$ 60 %. (Shen ym. 2019, 492.)

Huurteen torjunta

Ilmalämpöpumpun toimiessa huurteen muodostumista ylläpitävissä olosuhteissa, on sen toiminnan kannalta tärkeää huolehtia ulkoyksikön lämmönsiirtimen huurteen torjunnasta.

Amerin ja Wang (2017) mukaan huurteen torjuntaan käytettävät menetelmät voidaan jakaa kahteen eri luokkaan:

1. Huurtumisolosuhteiden heikentäminen
2. Kennon sulatusmenetelmät

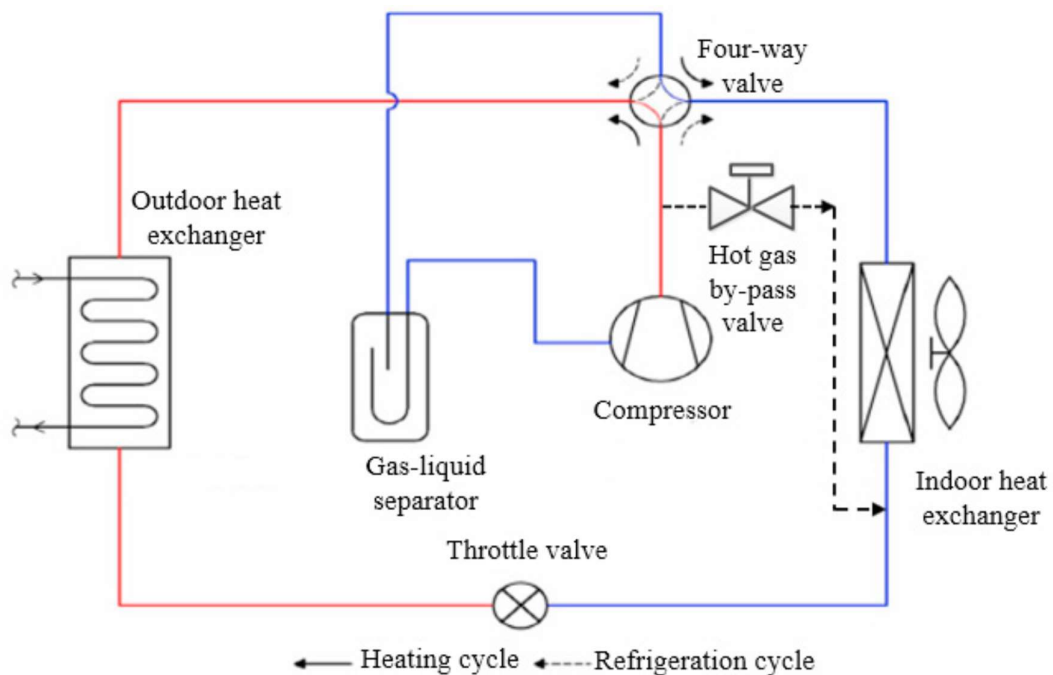
Sulatuksen toteutuksessa voidaan käyttää useita eri menetelmiä. Käytettyjä menetelmiä ovat kuumavesisumu, sähkölämmitys, kompressorin pysäyttäminen, kuumakaasu- ja käänteinen kuumakaasusulatus. Lisäksi huurtumisolosuhteita voidaan heikentää lämmönsiirtimen pintakäsittelyllä tai tuottamalla kennoon värähtelyä, kuten ultraäänivärähtelyä. Mahdollisia pintakäsittelymenetelmiä ovat pinnan ominaisuuksien, kuten muodon, geometrian, rakenteen tai pinnoitteen muutokset. (Amer & Wang 2017, 54; Hu 2010, 363.)

Yleisimmät sulatusmenetelmät ovat käänteinen kiertosulatus ja kuumakaasusulatus. Näitä sulatusmenetelmiä voidaan kutsua yhteisnimityksellä lämpösulatusmenetelmät.

Käänteinen kiertosulatus toteutetaan vaihtamalla järjestelmän toimintatila jäähdytykselle nelitieventtiin avulla. Puristettu kylmäainehöyry menee ulkoyksikön lämmönsiirtokennoon ja lauhtuessaan luovuttaa lämpöenergiaa sulatukseen. Tässä sulatusmenetelmässä lämpöenergia otetaan sisäyksikön lämmönsiirtokennon pinnalla olevasta jäännöslämmöstä. Käytettävissä olevan lämpöenergian riittävyys on perustavanlaatuinen ongelma tässä sulatusmenetelmässä. Kyseiselle sulatustekniikalle ovat ominaisia liian lyhyet

sulatusvälistä ja pitkä sulatusaika, joista seuraa negatiivinen vaikutus sisälämpötilaan. (Dong ym. 2012, 224; Dong ym. 2015, 50.)

Kuumakaasusulatus toteutetaan lisäämällä putkisto ja ohitusventtiili kompressorin painepuolen ja ulkoyksikön lämmönsiirtokennon väliin. Sulatusjakson aikana ohitusventtiili avautuu ja puristunut kylmäaine tulee suoraan ulkolämmönsiirtimeen luovuttaen lämpöenergiaa sulatukseen. Kylmäaine palaa kaasu-neste-erottimen kautta kompressoriin. Tässä sulatusmenetelmässä lämpöenergia otetaan kompressorin puristustehosta. Lämpösulatusmenetelmien toimintakaavio on esitetty kuvassa 5. (Shen ym. 2019, 493.)



Kuva 5. Lämpösulatusmenetelmien toimintakaavio (Shen ym. 2019, 493.)

2.3 Perinteisten sulatusmenetelmien haasteet

Kummallakin perinteisellä menetelmällä on omat etunsa, mutta niillä on myös yhteinen ongelma, koska kummassakaan menetelmässä ei ole lämmönlähdettä sulatuksen tehostamiseksi eikä huoneilman lämpötilan ylläpitämiseksi.

Sulatusjakson aikana sisäyksikön puhallin pysähtyy, eikä lämpöä vapaudu huonetilaan. Tämän seurauksena sulatusajan ollessa pitkä, vaikuttaa sulatus sisätilan viihtyvyyteen. Sulatusaika on tärkeä parametri arvioitaessa eri sulatusmenetelmien suorituskykyä. Sisälämpötilan heilunnan lisäksi lämpösulatusjaksot lisäävät energiankulutusta ja pienentävät lämpökerrointa. (Shen ym. 2019, 493.)

Keskeinen haaste liittyy myös sulatusjaksojen ajoittamiseen. Ihanteellinen tapa olisi ajoittaa sulatus tarpeen mukaan, kun ulkoyksikön lämmönsiirtimen lämmönsiirtokyky on heikentynyt riittävästi. Sulatusjaksojen huono ajoitus voi aiheuttaa lämmityskapasiteetin laskua, lisääntynyttä energian kulutusta ja pahimmillaan koko lämmönsiirtimen jäätyminen. Sulatuksen ajoitukseen on kehitetty monenlaisia menetelmiä, kuten siirtimen lämpötilaan, paine-eroon, tuulettimen tehonkulutukseen, kylmäaineen tulistusasteeseen ja huurteen paksuuteen perustuvat ohjaukset. Yleisin kaupallisissa sovelluksissa käytetty ohjaus perustuu siirtimen lämpötilaan ja lämmitysjaksojen pituuteen. Tässä opinnäytetyössä ei perehdytä syvällisemmin sulatuksen eri ohjausvaihtoehtoihin. (Zhu ym. 2015, 46.)

3 Faasimuutosmateriaalit

3.1 Faasimuutosmateriaalien määritelmä ja ominaisuudet

Faasimuutosmateriaaleilla (phase change materials, PCM) on kyky varastoida ja vapauttaa suuri määrä lämpöenergiaa niiden vaihtaessa olomuotoaan.

Faasimuutosmateriaaleja käytetään yleisesti lyhytaikaiseen lämpöenergian varastointiin, koska useimmat niistä kykenevät varastoimaan suuremman lämpömäärän vastaavaan vesitilavuuteen verrattuna ilmalämpöpumpun toimintalämpötila-alueella, jossa veden latentti lämmönvarauskyky ei tule kyseeseen. Lisäksi faasimuutosmateriaaliin varastoitu lämpö voidaan purkaa varastosta kohtuullisen lyhyessä ajassa. Faasimuutosmateriaalien sulamislämmöt sijoittuvat pääsääntöisesti välille 100–300 kJ/kg. Sulamislämpötilat ovat eri materiaaleilla yksilöllisiä. Yleisiä toivottuja ominaisuuksia faasimuutosmateriaalille ovat:

- Korkea sulamis- ja ominaislämpö tilavuutta ja massaa kohden
- sovellukseen sopiva faasimuutoslämpötila
- alhainen höyrynpaine toimintalämpötilassa
- hyvä kemiallinen tasapaino
- materiaalin vaarattomuus, palamattomuus, ei myrkyllinen
- hyvä uudelleenkiteytyminen ilman ominaisuuksien heikentymistä
- alhainen alijäähtymisen määrä ja nopea kiteytyminen
- pieni tilavuuden muutos
- korkea lämmönjohtavuus (suuri lämpökonduktanssin arvo)
- hyvä saatavuus ja alhainen hinta.

Koska yksittäisellä materiaalilla ei voi olla kaikkia em. ominaisuuksia, joudutaan materiaalivalinnassa tekemään lähes aina kompromisseja. Joidenkin puutteiden ja ominaisuuksien suhteen parannusta voi saavuttaa lisäaineilla tai teknisillä ratkaisulla. Faasimuutosmateriaaleista eniten tutkimusta on tehty suolahydraateille, parafiinivahoille, rasvahapoille, eutektisille seoksille, sokerialkoholeille sekä erilaisille yhdistelmäa materiaaleille.

Faasimuutosmateriaalien ongelmaksi osoittautuu usein niiden puutteellinen lämmönsiirtokyky. Lämmönsiirtoa voidaan yrittää parantaa mm. seostamalla materiaaliin hyvin lämpöä johtavia hiukkasia, hyödyntämällä mikrokapselointia tai kokeilemalla erilaisia varastosäiliön geometrioita. (Pönkä 2012, 10–11.)

Lämmönvarastointijärjestelmissä käytetyillä materiaaleilla on tyypillisesti faasimuutoslämpötila, joka sopii haluttuun sovellukseen, kuten sulatukseen. Mahdollisista faasimuutosprosesseista, joita ovat kaasunestefaasimuutos ja kiinteä-nestefaasimuutos, on neste-kiinteäfaasimuutosprosessi käytännöllisempi lämmön varastoinnissa, koska näissä prosesseissa kahden faasin tilavuusero jää pienemmäksi. Ilmalämpöpumppuihin kohdistetuissa tutkimuksissa, lämpövarastona käytetyt faasinmuutosmateriaalit olivat kaikki kiinteä-nestefaasimuutosmateriaaleja. (Shen ym. 2019, 497.)

3.2 Ilmalämpöpumpun lämpövarastoksi soveltuvat faasimuunnosmateriaalit

PCM-lämpövaraston lisääminen ilmalämpöpumppuun voi toimia ratkaisuna luvussa 2.4. esiteltyihin, perinteisten käänteiskierto- ja kuumakaasusulatuksen ongelmiin. Aikaisempien tutkimusten perusteella voidaan lämpövaraston lisäämisellä odottaa myös lämpöpumpun suorituskyvyn parantuvan.

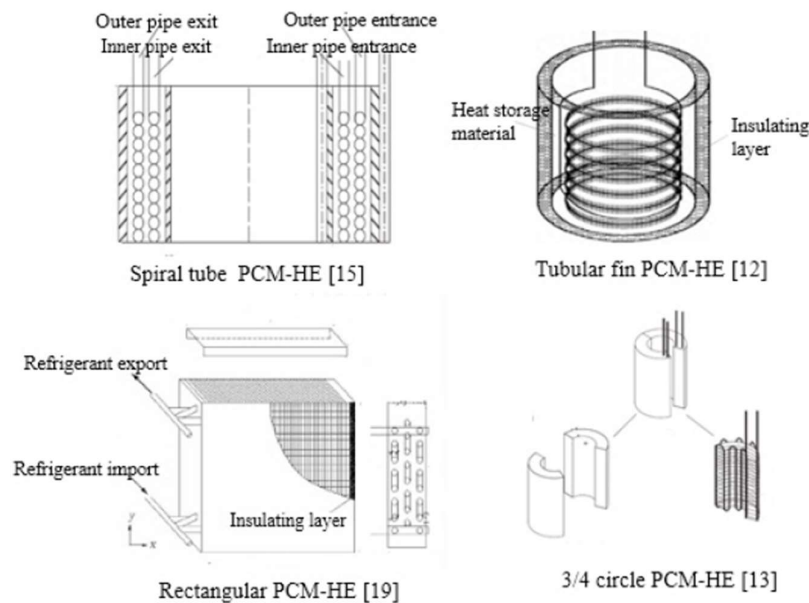
Lämpövaraston lisäämiselle suurin haaste on sen vaatima tila, joka on riippuvainen sekä käytetystä varastointimateriaalista, että tarvittavasta sulatuslämmöstä. Jotta lämpövaraston koko saadaan pidettyä mahdollisimman pienenä, tulee valita tai kehittää tehokas lämmönvarausmateriaali sekä lämmönvaihtimen rakenne. (Shen ym. 2019, 496–497.)

Ennen faasimuutosmateriaalin lopullista valintaa tulee selvittää rakennettavan lämpövaraston toimintalämpötila-alue. Yleensä valittavan materiaalin faasimuutoslämpötilan tulisi olla höyrystymis- ja lauhtumislämpötilojen välillä, lähellä lauhtumislämpötilaa, noin 10 °C lauhtumislämpötilan alapuolella. (Shen ym. 2019, 497.)

Lämpövarastoissa yleisimmin käytettyjä faasimuutosmateriaaleja ovat Kalsiumkloridi 6-hydraatti sekä parafiini. Syynä tähän on se, että kalsiumkloridi 6-hydraatilla on suuri latentti lämpö ja hyvä lämmönjohtokyky. Kalsiumkloridi 6-hydraatin tiheys on myös suuri, mistä on hyötyä lämpövaraston koon minimoinnissa. Parafiinin etuna on se, että säätämällä kiinteän ja nestemäisen parafiinin suhdetta seoksessa, voidaan materiaalin sulamislämpötilaa muuttaa vastaamaan faasimuutoksen lämpötilavaatimuksia. (Shen ym. 2019, 497.)

Materiaalivalinnan ohella huomiota tulee kiinnittää myös lämpövaraston rakennesuunnitteluun, koska rakenteella on myös merkittävä vaikutus lämpövaraston sulatusvaikutukseen. Rakennesuunnittelun periaatteista ei tietävästi ole olemassa tutkimustietoa. Kuvassa 6 on esitetty useita kirjallisuudessa mainittuja tyypillisiä lämpövarastorakenteita:

1. kierreputkityyppinen lämmönvaihdin
2. putkimainen evälämmönvaihdin
3. suorakaiteen muotoinen lämmönvaihdin
- 4) kompressorin ympärille asennettava lämpövarasto (Shen ym. 2019, 497.)



Kuva 6. Lämpöpumppujen lämpövarastorakenteita (Shen ym. 2019, 497.)

3.3 Tuntuva ja latentti lämpö

Tuntuva lämpövarasto perustuu materiaalin lämpötilan nostoon ja laskuun. Tuntuvan lämmön varauskyky perustuu varastointimateriaalin ominaislämpökapasiteettiin (C_p) ja varastointikapasiteetti voidaan laskea kaavalla

$$Q = mC_p (T_f - T_i), \quad (1)$$

jossa:

- Q on lämpömäärä
- m on lämpövaraston massa
- C_p on materiaalin ominaislämpökapasiteetti
- T_f on loppulämpötila
- T_i on alkulämpötila

Latentti lämpövarasto on kaikkein tehokkain varastointimuoto. Tässä tavassa hyödynnetään materiaalien faasimuutosta lämmön varastointiin ja vapauttamiseen. Tuntuvasta lämpövarastosta poiketen tässä menetelmässä lämmönvaihto on yleensä isoterminen ja tapahtuu kapealla lämpötila-alueella.

Lämpövaraston varauskyky voidaan laskea kaavasta

$$\dot{Q} = mL_H, \quad (2)$$

jossa:

- \dot{Q} on lämpömäärä
- m on materiaalin massa
- L_H on materiaalille ominainen latentti lämpö

Tässä varastointimenetelmässä lauhtumislämpötila on kriittinen parametri, joka tulee huomioida materiaalia valittaessa. Sulamispiste tulee olla systeemin lämpötila-alueella. Muita huomioitavia seikkoja materiaalia valitessa ovat lämmönjohtavuus tai spesifinen latentti lämpö.

Tehokas tapa lisätä varastoitavan lämmön määrää on yhdistää tuntuva ja latentti lämpökapasiteetti. Tämä lämpö voidaan laskea kaavalla

$$\dot{Q} = m * C_p(T_f - T_m) + mL_H + m * C_p(T_m - T_i) \quad (3)$$

jossa:

- \dot{Q} on lämpömäärä
- m on faasimuunnosmateriaalin massa
- C_p on faasimuunnosmateriaalin ominaislämpökapasiteetti
- T_f on loppulämpötila
- T_m on faasimuunnoslämpötila
- L_H on materiaalille ominainen latentti lämpö
- T_i on alkulämpötila

Kaavassa lasketaan tuntevan lämmön määrä ennen ja jälkeen sulamisen, koska kiinteällä aineella ja nesteellä on omat ominaislämpökapasiteettinsa. (Azizi & Castelló Péres 2016, 22.)

3.4 PCM-lämpövarastolla saavutettavat edut

Lämpövarastoa koskevissa tutkimuksissa on havaittu, että lisäämällä ilmalämpöpumpulaitokseen PCM-lämpövarasto, on höyrystyminen säännöllistä sulattamista vaativissa olosuhteissa voitu parantaa laitteiston energiatehokkuutta, lyhentää sulatusjaksojen kestoa sekä kyetty parantamaan järjestelmän suorituskykyä verrattuna perinteisiin, käänteiskierto- ja kuumakaasusulatusmenetelmiin. Näissä tutkimuksissa PCM-lämpövarasto on lisätty lämpöpumpuun varastoimaan lämpöä lämmitysjakson aikana ja luovuttamaan sitä sulatustoiminnon tehostamiseen. Useimmissa lämpövarastokytkenöissä sisälämmönvaihtimen puhallin on kytkettävä sulatuksen ajaksi pois päältä, mistä seuraa lämmitysvaikutuksen keskeytyminen sulatuksen ajaksi. Tämä aiheuttaa sisälämpötilan heiluntaa. Mikäli sulatusjakson kestoa voidaan lyhentää, häiriintyy lämmitystoiminto aikaisempaa

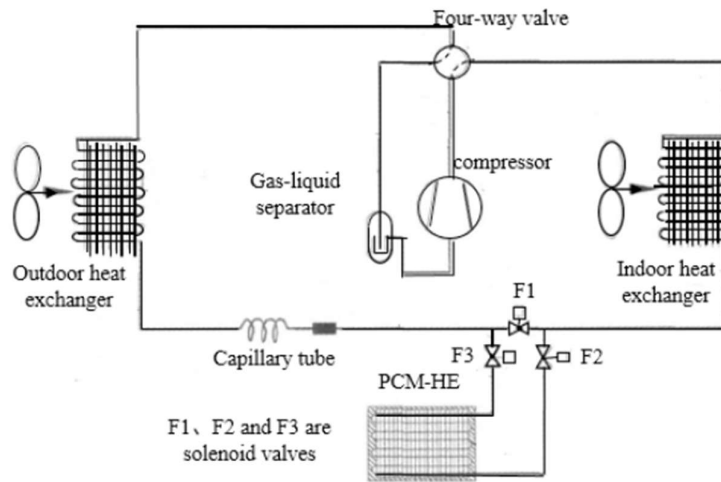
vähemmän. Seuraavassa keskeisimmät havainnot lämpövarastojen hyödyntämisestä lämpöpumppujen yhteydessä:

1. Lisääntynyt lämpöenergian varastointikapasiteetti:
Faasimuutosmateriaalit voivat varastoida huomattavan määrän energiaa vaiheenmuutosprosessin aikana. PCM-lämmönvaraajaa hyödyntämällä lämpöpumpun normaalikäytössä syntyvä ylimääräinen lämpö voidaan ottaa talteen ja varastoida myöhempää käyttöä varten sulatusjakson aikana.
2. Energiatehokas sulatus:
PCM-lämpövarasto vapauttaa varastoitunutta energiaa sulatusjakson aikana tarjoten lisälämmönlähteen huurteen ja jään poistamiseen ulkolämmönvaihtimesta. Tämä vähentää riippuvuutta lisäenergian käytöstä, mikä parantaa yleistä energiategokkuutta.
3. Mahdollisuus pidennettyihin sulatusjaksoihin:
Lämpövaraston kyky varastoida ja vapauttaa energiaa asteittain mahdollistaa pidennetyt sulatusjaksot, mikä varmistaa optimaalisen sulatuksen ilman, että lämpöpumpun ensiölämmitys- tai jäähdystysoimintoja tarvitsee toistuvasti keskeyttää.

3.5 Aikaisemmissa tutkimuksissa käytettyjen koelaitteistojen rakenteita

Yksinkertaisimmillaan lämpövarasto voidaan liittää suoraan kaupalliseen lämpöpumppujärjestelmään. Lämpövaraston toiminnallisuuteen vaikuttaa sen sijainti suhteessa sisälämmönvaihtimeen. Dongin ym. (2012) mukaan lämpövarasto voidaan sijoittaa sisäyksikön ja paisuntalaitteen väliseen putkilinjaan kuvan 7 mukaisesti. Tässä kytkennässä lämpövarasto on sisälämmönvaihtimen kanssa sarjassa. Lämpövarastoa ladataan ja puretaan sulkemalla venttiili F1 ja avaamalla venttiilit F2 ja F3. Sisälämmönvaihtimen jälkeen kylmäaine luovuttaa jäännöslämmön, jota se ei ole luovuttanut

huonetilaan, lämpövaraston lataamiseen. Kylmäaineen alijäähtyminen parantaa lämpöpumpun suorituskykyä.



Kuva 7. Ilmalämpöpumpun sarjasulatusjärjestelmä (Shen ym. 2019, 494.)

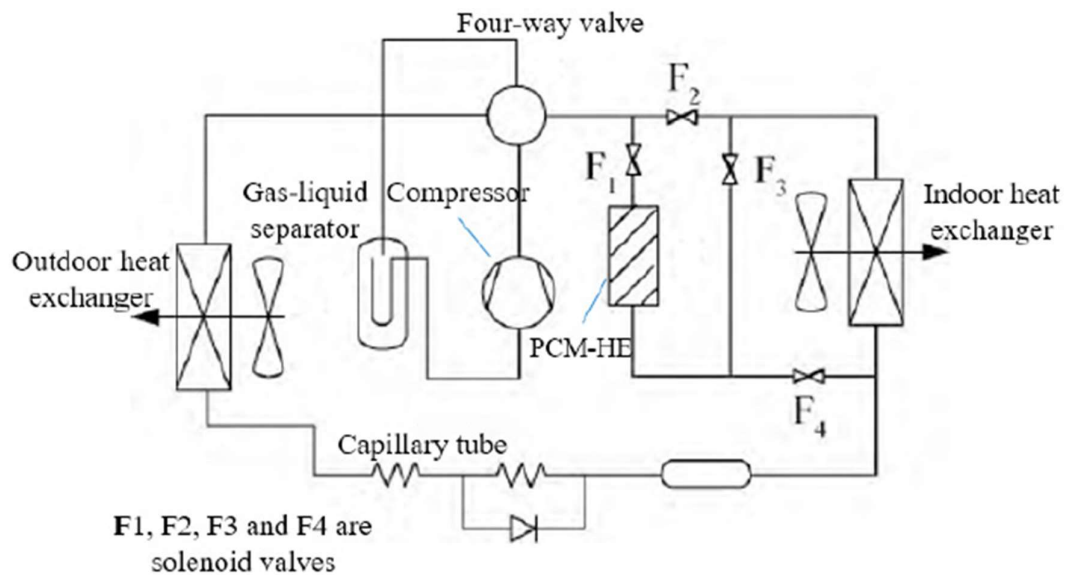
Dongin ym. (2015) mukaan lämpövarasto voidaan asentaa myös sisälämmönsiirtimen rinnalle tai putkistoon ennen sisäyksikköä, kuten kuvassa 8. Avaamalla ja sulkemalla venttiilejä F1-F4 sopivalla tavalla voidaan toteuttaa erilaisia lämmönvarastointitiloja:

1. Lämpövarasto sarjassa
2. Rinnakkaislämpövarasto

Tällä kytkennällä sulatusjakson aikana lämpöä voidaan luovuttaa kolmella eri tavalla:

1. Sulatuslämpö varastoidusta lämmöstä ja puristuksesta
2. Sulatuslämpö varastoidusta lämmöstä, puristuksesta ja osittain sisälämmönsiirtimestä
3. Sulatuslämpö sama kuin vaihtoehdossa 2., mutta kylmäaine virtaa rinnakkain lämpövarastossa ja sisäyksikössä

(Shen & ym. 2019, 495.)

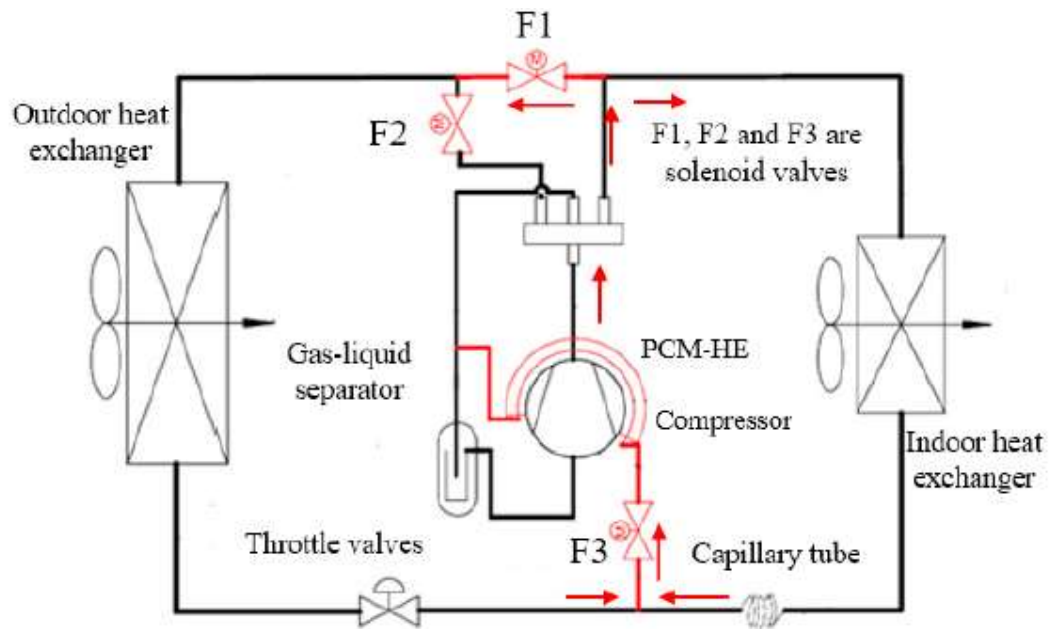


Kuva 8. Ilmalämpöpumpun sarja- ja rinnakkaissulatusjärjestelmä (Shen ym. 2019, 495.)

Zhangin ym. (2014) toteuttamassa koelaitteistossa huonetilan lämmitys voidaan pitää käynnissä myös sulatusjaksojen aikana. Kuvassa 9 esitetään kaavio laitteistosta, jossa sulatuslämpöä varastoidaan lämpöpumpun kompressorin hukkalämpöä. Tässä kokoonpanossa sisälämmönvaihtimen tuuletinta ei tarvitse sammuttaa eikä toimintatilaa vaihtaa sulatuksen aikana. Lämpövarasto ladataan kuumakaasun ohitusjärjestelmästä Lämmitystilan aikana solenoidiventtiilit F1 ja F3 sulkeutuvat ja F2 avautuu. Suurin osa kompressorista vapautuvasta lämmöstä varastoidaan. Sulatusjakson aikana venttiili F2 sulkeutuu ja venttiilit F1 ja F3 avautuvat. Tässä tilassa osa kylmäaineesta pääsee luovuttamaan lämpöä sisälämmönvaihtimeen huonetilan lämmitystä varten. Loppu kylmäaine käytetään ulkolämmönvaihtimen sulatukseen. Kylmäainevirrat yhdistyvät toisiinsa paisuntalaitteen jälkeen. Tämän jälkeen kylmäaine sitoo itseensä lämpövaraston energiaa höyrystyessään.

Edellä kuvatulla laitteistolla on myös heikkouksia. Ensimmäinen niistä on se, että vaikka huonetilan lämmitys ei tässä laitteistossa katkea kokonaan sulatuksen yhteydessä, sisäyksikön lämmitysteho laskee johtuen sisäyksiköön virtaavan kylmäaineen pienemmästä määrästä. Toinen heikkous on

lämpövarastoon sitoutuvan lämmön hyödyttömyys kesäaikana, jonka lisäksi kompressorin jäähdytys heikkenee.

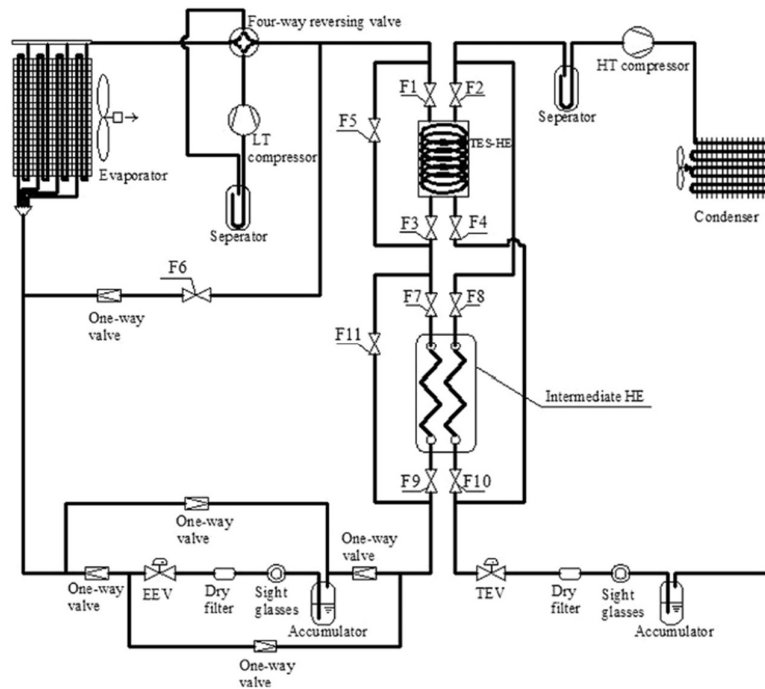


Kuva 9. Kompressorin hukkalämpöä hyödyntävä lämpövarasto ja jatkuva lämmitys. (Shen ym. 2019, 496.)

Qun ym. (2017) mukaan lämpövarastoa voidaan hyödyntää myös korkean lämpötilan kaskadilämpöpumpuissa. Näissä lämpöpumpuissa on kaksi erillistä kylmäainepiiriä ja kaksi kompressoria. Kylmissä olosuhteissa perinteinen kuumakaasun ohitussulatusmenetelmä ei välttämättä pysty poistamaan kaikkea huurretta höyrystimen pinnalta. Kuvassa 10 on esitetty kaavio kaskadijärjestelmästä, jossa on PCM-lämpövarasto. Järjestelmässä on useita eri toimintatiloja, joita ohjataan venttiilien avulla. Latausvaiheessa matalamman lämpötilan kompressorista poistuva kylmäaine virtaa lämpövaraston läpi luovuttaen siihen lämpöä ennen siirtymistään höyrystimeen / lauhduttimeen. Kun lämpövarasto on ladattu, järjestelmä siirtyy takaisin yhteiseen kaskadilämmitystilaan.

Järjestelmän sulatustoiminto voidaan jakaa jaksoittaiseen lämmityssulatus tilaan ja jatkuvaan lämmityssulatus tilaan. Kun järjestelmä toimii jaksottaisessa lämmityssulatus tilassa, korkean lämpötilan kompressorit pysähtyy ja matalan

lämpötilan vaiheen nelitieventtiili kääntää syklin päinvastaiseksi. Tässä tilassa PCM-lämpövarastoa käytetään lämmönlähteenä käänteiskierrtosulatuksessa. Koska lämpövarastossa on kaksi lämmönvaihdinta, lämpövarastoa voidaan käyttää samanaikaisesti lämmönlähteenä matalan lämpötilan höyrystimen käänteiskierrtosulatuksessa ja korkean lämpötilan lämmitysprosessille.



Kuva 10. PCM-lämpövarasto kaskadilämpöpumpussa (Shen ym. 2019, 496.)

4 Koelaitteiston suunnittelu

4.1 PCM-lämpövarastointijärjestelmien suunnittelunäkökohdat

Tehokkaan lämpövaraston suunnittelu edellyttää useiden tekijöiden huolellista harkintaa, mukaan lukien järjestelmän konfigurointi, lämmönsiirtomekanismit, integrointi lämpöpumppujärjestelmään ja järjestelmän yleinen optimointi. Tässä osiossa käsitellään näitä suunnittelunäkökohtia yksityiskohtaisesti.

Suunnittelun keskeisimmät lähtökohdat ovat lämpöpumppujärjestelmän rakenne sekä siinä hyödynnettävässä kylmäteknisessä kiertoprosessissa esiintyvät parametrit, joista tärkeimpiä ovat höyrystymis- ja lauhtumislämpötila. Lisäksi sulatuslämmön määrittämiseksi tarvitaan tietoa ulkoyksikön lämmönsiirtokennosta ja niistä olosuhteista, joissa lämpöpumppua käytetään. Lämpöpumpun sulatus toiminnon parametrien sekä sulatusta ohjaavien antureiden ja sulatuslogiikan ehtojen tunteminen on myös tärkeää.

4.1.1 Lämpövaraston faasimuutosmateriaalin valinta

Keskeisimpiä faasimuutosmateriaalin valintakriteereitä ovat faasimuutoslämpötila, latentti lämpökapasiteetti, lämmönjohtavuus, kustannustehokkuus ja pitkän aikavälin stabiilisuus. Koska kyseessä on opinnäytetyö, johon liittyvä kokeellinen tutkimus tulee suorittaa kohtuullisin kustannuksin, painotetaan materiaalivalinnassa kustannustehokkuutta, helppoa saatavuutta ja mahdollisuutta faasimuutoslämpötilan säädettävyyttä.

Yleisesti sulatussovelluksissa käytetään materiaaleja, joiden faasimuutoslämpötila on hieman yli veden jäätymispisteen (noin 0 °C). Esimerkkejä sopivista materiaaleista ovat suolahydraatit, parafiinit ja eutektiset seokset. Edellä mainituista seikoista ja kriteereistä johtuen valintani oli parafiinivaha, joka mahdollistaa mm. faasimuutoslämpötilan muuttamisen kotikonstein seostamalla vahaan parafiiniöljyä.

Parafiinivahat muodostuvat eri hiililukuisten hiilivetymolekyylien seoksesta. Vahoilla on alhaisemmat sulamispisteet ja huonompi latentti lämpö kuin puhtailla parafiineilla. Faasimuutosmateriaalina parafiinivaha on turvallista, luotettavaa, ennustettavaa, edullista ja ei-syövyttävää. Lisäksi ne ovat kemiallisesti inerttejä ja niiden tilavuus muuttuu vain vähän sulamisen aikana.

Parafiinivahojen huonoja puolia ovat niiden alttius vuodoille nestemäisessä olomuodossa, alhainen lämmönjohtavuus ja lämpöstabiilisuus. Näiden ei-toivottujen ominaisuuksien vaikutusta voidaan vähentää modifioimalla vahaa, kuten seostamalla sitä suoraan polymeeriin sekä mikro- tai makrokapseloinneilla. Lisäksi voidaan kiinnittää erityishuomiota materiaalin heikkouksiin lämpövaraston suunnittelussa ja muotoilussa.

Parafiinivahoilla on kohtuullinen sulamislämpö (noin 200 kJ/kg) ja niiden sulamislämpötila vaihtelee laajalla alueella. Puhtaiden parafiinien ollessa parafiiniseoksia huomattavasti kalliimpia, lämmön varastoinnissa on taloudellisesti järkevämpää käyttää parafiiniseoksia. Näissä seoksissa sulamislämpötila ja sulamislämpö määräytyvät niissä olevien alkalien osuuksien mukaan. (Pönkä 2012, 12.)

4.1.2 PCM-lämpövaraston integrointi lämpöpumppujärjestelmään

Koelaitteiston lämpöpumpuksi valikoitui vuonna 2003 valmistettu Panasonic CS-W9CKP / CU-W9CKP5. Kuvassa 11 on esitetty koelaitteiston lämpöpumppu. Liitteessä 1 on esitetty lämpöpumpun keskeisimmät tekniset tiedot.



Kuva 11. Koelaitteiston ilmalämpöpumppu (JS Energi)

Lämpövarasto tulee liittää lämpöpumppujärjestelmään tavalla, joka optimoi lämmönsiirron ja maksimoi energian varastoinnin. Integrointi voi edellyttää lämmönvaihtimen ja eristeiden lisäämistä. Tärkeää on myös varaston sijoittaminen oikeaan kohtaan kierto-prosessissa.

Lämpövaraston sijoittamisessa päätettiin käyttää sarjakytkentää. Tässä kytkennässä lämpövarasto asennetaan sisäyksikön lämmönsiirtimen ja paisuntalaitteen väliseen putkilinjaan kuvan 7 mukaisesti. Avaamalla ja sulkemalla sopivasti venttiilejä, voidaan lämpövarasto myös erottaa helposti kierto-prosessista. Lämpövaraston latausvaiheessa sisäyksiköstä poistuva kylmäaine virtaa lämpövarastoon vapauttaen lämpöä PCM:ään. Lisäksi kylmäaine alijäähtyy ennen paisuntaa, joka parantaa lämpöenergian sitoutumista höyrystimessä.

4.1.3 Koelaitteiston ohjausjärjestelmä

Koska lämpöpumpun ohjausjärjestelmän toiminnallisuutta ei ole tarkoitus vaihtaa eikä muuttaa, tulee erityisesti sulatustoimintoon vaikuttavien

parametrien merkitys olla tiedossa, jotta lämpövaraston integroinnilla tavoiteltavat hyödyt voidaan saavuttaa. Kaikkein keskeisintä on tietää ne ehdot, jotka vaikuttavat sulatustoiminnon kestoon ja esiintymistaajuuteen. Parasta olisi, jos sulatustoiminto voitaisiin aktivoida ainoastaan silloin, kun sulatukselle on erityisesti tarvetta. Ilmalämpöpumput on kehitetty erityisesti jäähdytyskäyttöä ajatellen, joten älykkäät sulatustoiminnot ovat harvinaisia koelaitteeksi valitun lämpöpumpun ikäryhmässä. Yleisesti ottaen ohjausjärjestelmän tulisi hallita myös lämpövaraajan latausta ja purkua, mutta tässä koeasetelmassa näiden toimintojen aktiivinen hallinta ei ole mahdollista. Tämän ominaisuuden lisääminen edellyttäisi ohjausjärjestelmän ohjelman muokkaamista, mihin ei ole saatavissa riittäviä lähtötietoja.

Koelaitteena käytettävän ilmalämpöpumpun ohjausjärjestelmä on sulatustoiminnon osalta erittäin yksinkertainen. Normaalin sulatustoiminnon aktivoitumiseksi jonkin seuraavista ehdoista tulee toteutua:

- Lämmitystoiminnon aloituksesta on kulunut 30 minuuttia
- Edellisestä sulatusjaksosta on kulunut 60 minuuttia
- Mikäli ulkolämmönvaihtimen lämpötila laskee alle $+ 3^{\circ}\text{C}$ vähintään 50 sekunnin ajaksi ja samanaikaisesti kompressori on käynnissä

Normaalin sulatustoiminnon lisäksi lämpöpumppu voi aloittaa ylikuormituksesta johtuvan sulatustoiminnon, mikäli jompikumpi seuraavista ehdoista toteutuu:

- Ulkoyksikön puhallin on pysäytetty ylikuormituksen vuoksi 60 minuutin ajan
- Ulkoyksikön puhallin on pysäytetty ylikuormituksen vuoksi 1 minuutin ajan kompressorin käynnistyttyä

Lämpöpumpun sulatusjakso kestää pisimmillään 12 minuuttia, mutta se voi päättyä aikaisemmin, mikäli molemmat oheisista ehdoista täyttyvät:

- Sulatusjakson alkamisesta on kulunut vähintään 60 sekuntia
- Ulkolämmönsiirtimen lämpötila on 4°C tai enemmän

Sulatusjakson päätyttyä kompressorin pysähtyminen 30 sekunnin ajaksi ja 4-tieventtiili pitäytyy jäähdytystoiminnon mukaisessa asennossa 10 sekuntia ennen lämmitystilaan siirtymistä, jotta paine ehtii tasaantumaan. (Panasonic CS-W9CKP CU-W9CKP5 Service Manual)

4.2 Lämpövaraston mitoittaminen koelaitteistoon

Lämpövaraston mitoittaminen koelaitteistolle sopivaksi on yksi keskeisimmistä suunnittelutoimenpiteistä. Vaikka lämpövaraston ylimääräisestä lämpökapasiteetista ei ole haittaa, tekee ylimääräinen tilavuus lämpövarastosta suurikokoisen ja sillä tavalla hankalasti sijoitettavan. Lisäksi lämpövaraston materiaalikustannukset kasvavat ja jälkimarkkinointi vaikeutuu. Alimitoittaminen puolestaan voi johtaa lämpövaraston epätoivottuun käyttöön. Mikäli lämpöenergiaa ei ole varastoitu riittävästi, voi varaston lämpötila laskea liiaksi, jolloin latausjakso sulatusten välissä voi osoittautua liian lyhyeksi ja täten laskee laitteiston suorituskykyä.

Azizin ja Castelló Péresin (2016) mukaan lämpövaraston mitoittamisessa mukaan tulee huomioida:

1. Sulatettavan huurteen määrä, jonka arvioinnissa voidaan käyttää lämmönsiirtimen ripojen ja kierukoiden välistä tilavuutta. Tässä mitoituksessa haetaan pahinta skenaariota, jolloin tarvittava sulatuslämpö on suurin
2. Lämpövaraston lämpötila vaihtelee välillä 17 °C - 25 °C, jos sulamislämpötila on 18 °C
3. Sulatettavan huurteen lämpötila nousee -5°C:sta 5°C:seen.

Koelaitteiston ulkolämmönsiirtimen geometria on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Ulkolämmönsiirtimen geometriatiedot

Kuvaus	Lukuarvo
Säleikön korkeus (h)	510 mm
Säleikön leveys (l_1)	840 mm
Säleikön syvyys (w)	22 mm
Säleen ulkohalkaisija (l_2)	0,15 mm
Säleiden lukumäärä (n_1)	571 kpl
Säleiden keskinäinen etäisyys	1,3 mm
Lämmönsiirtoputken säde (r)	4,8 mm
Lämmönsiirtoputkien pituus (l_3)	840 mm
Lämmönsiirtoputkien lukumäärä (n_2)	20 kpl

Ulkolämmönsiirtimessä normaalikäytön aikana mahdollisesti esiintyvän maksimaalinen huurremäärätilavuus laskettiin lämmönsiirtimen säleiden väliin jäävän tilavuuden avulla. Laskuissa hyödynnettiin taulukon 1 arvoja ja se laskettiin kaavalla

$$V_{huurre} = (h \times w \times l_1) - (h \times w \times l_2 \times (n - 1)) - (\pi \times r^2 \times l_3 \times n_2)$$

$$V_{huurre} = (51 \text{ cm} \times 84 \text{ cm} \times 2,2 \text{ cm}) - (51 \text{ cm} \times 2,2 \text{ cm} \times 0,015 \text{ cm} \times 570 \text{ kpl}) - (\pi \times 0,48 \text{ cm}^2 \times 84 \text{ cm} \times 20 \text{ kpl})$$

$$V_{huurre} = 9424,8 \text{ cm}^3 - 959,31 \text{ cm}^3 - 1216 \text{ cm}^3$$

$$V_{huurre} = \underline{7249,49 \text{ cm}^3}$$

Huurteen maksimitilavuus voi olla ~7,3 litraa. Kertyvän huurteen maksimimassa laskettiin käyttämällä enimmäishuurretiheyttä, joka on Azizin & Castelló Péresin (2016.) mukaan $0,4 \text{ kg/dm}^3$, jolloin muodostuvan huurteen massa on maksimissaan 2,9 kg. Sulatukseen tarvittava lämpöenergia laskettiin kaavalla

$$Q_{sulatus} = m_{huur} \times (\Delta T \times (C_{huurre} + C_{vesi}) + S_{vesi}),$$

jossa:

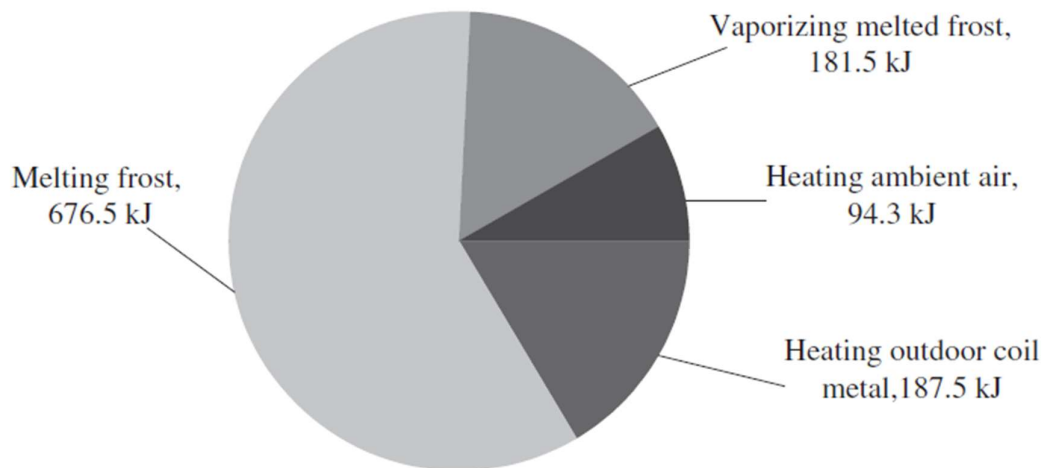
- $Q_{sulatus}$ on sulatukseen tarvittava lämpömäärä

- m_{huurre} on sulatettavan huurteen massa
- ΔT on lämpötilamuutos
- C_{huurre} on huurteen ominaislämpökapasiteetti
- C_{vesi} on veden ominaislämpökapasiteetti
- S on sulamislämpö

$$Q_{\text{sulatus}} = 2,9 \text{ kg} * (5^{\circ}\text{C} * (2,027 \text{ kJ/kgK} + 4,2176 \text{ kJ/kgK}) + 333.55 \text{ kJ/kg})$$

$$Q_{\text{sulatus}} = \underline{1058 \text{ kJ}}$$

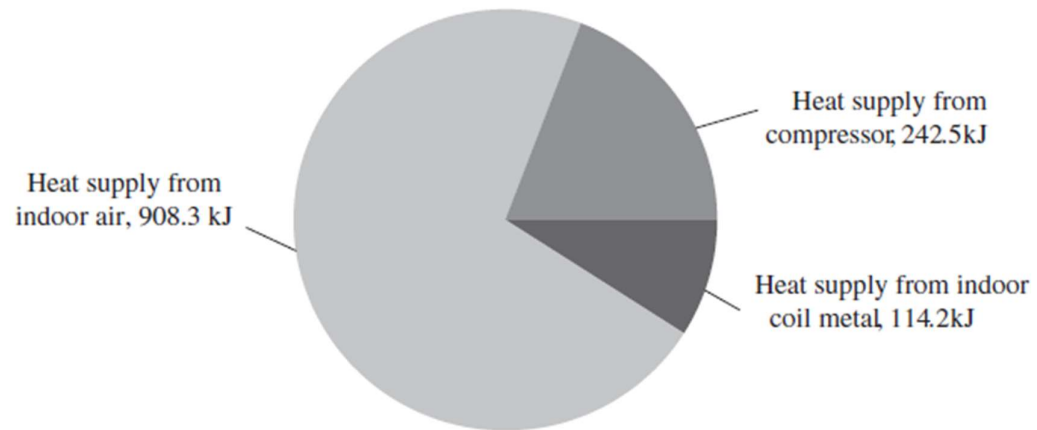
Dongin ym. (2011) mukaan ulkolämmönsiirtimeen viety sulatuslämmön kulutus jakautuu siten, että 59,4 % kuluu varsinaiseen jään sulattamiseen, 15,9 % sulatetun veden höyrystämiseen, 8,3 % ympäröivän ilman lämmittämiseen ja 16,5 % lämmönsiirtimeen massan lämmittämiseen. Sulatukseen käytettävän energian jakauma on esitetty kuvassa 12. Suunnittelemani koelaitteistossa laskennallisesti jään sulattamiseen tarvittava energia on 1058 kJ. Tämän lisäksi lämpöä tarvitaan noin 69 % lisää edellä kuvattuihin seikkoihin, joten tarvittava sulatusenergia kokonaisuudessaan noin 1786 kJ. (Dong ym. 2011, 380.)



Kuva 12. Sulatukseen käytettävän energian jakauma (Dong ym. 2011, 385.)

(Dongin ym. (2011) mukaan käänteistä kiertosulatusta käyttävissä ilmalämpöpumpuissa kaikki sulatuslämpö ei ole peräisin sisäilmasta. Sulatusjakson alkuvaiheessa sulatuslämpö on pääasiassa

sisälämmönsiirtimeen sitoutunutta lämpöä, mutta tämän jäähtyttyä, lämpöä otetaan erityisesti sisäilmasta. Lämmönlähteiden jakauma sulatuksessa on esitetty kuvassa 13.



Kuva 13. Sulatuslämmönlähteiden jakauma (Dong ym. 2011, 385.)

Sisäilmasta peräisin oleva lämpö toimii PCM-lämpövaraston suunnittelun mitoitus tietona. Em. tutkimuksen perusteella laskin, että laskennallisesta sulatukseen tarvittavasta kokonaisenergiasta 1786 kJ, ainoastaan 72 % olisi normaalitilanteessa peräisin sisäilmasta. Käyttämällä tätä prosenttia, sain lämpövaraston mitoitusenergiamääräksi 1290 kJ.

Saatavilla olleista parafiinivahoista matalimman sulamislämpötilan omaa kosmeettiseen käyttöön tarkoitettu saksalaisen Distrebutio -yrityksen myymä, 46 °C:ssa jähmettyvä vaha. Pönkän (2012) mukaan parafiini 44 -vahan sulamislämpö on 167 kJ/kg, joten päätin käyttää tätä sulamislämpöarvoa laskelmissani. Parafiinivahan ominaislämpökapasiteetti on 2,1 kJ/kgK, joten tuntevan lämmön varaus kymmenen asteen lämpötilamuutoksella on 21 kJ/kg. Kun nämä kaksi arvoa sijoitetaan yhtälöön

$$21x + 167x = 1290,$$

Saadaan tarvittavan parafiinivahan määräksi 6,83 kg.

Lämpövaraston lämmönsiirtokyky

Ilmalämpöpumpun ohjausjärjestelmän toimintalogiikan mukaan sulatusjakson pituus on aina vähintään 60 s ja korkeintaan 720 s. Lämpövaraston lisäämisen ensisijainen tarkoitus on lyhentää sulatusjaksojen kestoa pariin kolmeen minuuttiin myös hyvin jäätävissä olosuhteissa. Jotta sulatus voi tapahtua nopeasti, tulee lämmön siirtyä varastosta kylmäaineeseen mahdollisimman tehokkaasti. Matemaattisesti riittävä lämmönsiirtokyky voidaan laskea jakamalla siirrettävä lämpöenergia, joka tässä tapauksessa on aikaisemmin laskettu 1290 kJ, tavoitellulla lämmönsiirtoajalla 180 s, josta saadaan lämmönsiirtotehoksi 7167 W.

Lämpövaraston latausvaiheessa parafiinivahan ollessa nestemäisessä olomuodossa esiintyy varaston sisällä vapaata konvektiota, jonka aiheuttaa epätasaisesti lämmenneen vahan lämpötila- ja tiheyserot.

Konvektiivista lämmönsiirtoa ja sen laskemista varten on johdettu erilaisia korrelaatiokaavoja, jotka pyrkivät ottamaan tarkemmin huomioon konvektiiviseen lämmönsiirtoon vaikuttavat asiat. Korrelaatiokaavoja varten on määritetty erillisiä lukuja, joille on yhteistä se, että ne ovat dimensiottomia eli suure ei kerro onko tarkasteltava tilanne kaksi- tai kolmiulotteinen. Tällä helpotetaan korrelaatiokaavoilla laskentaa. Näitä suureita ovat Nusseltin, Reynoldsin, Rayleighin, Grashofin ja Prandtlin luku. Kaavoissa, jotka käyttävät näitä lukuja, otetaan tarkemmin huomioon eri osa-alueet, jotka vaikuttavat konvektiiviseen lämmönsiirtoon. Vapaan konvektion tapauksessa näistä ei käytetä Reynoldsin lukua, koska sen määrittämiseksi tulisi tietää etukäteen fluidin virtausnopeus. (Mansikkamäki 2016, 18.)

Nusseltin lukua voidaan hyödyntää siirtyvän lämpötehon laskennassa. Nusseltin luku kuvaa konvektiivisen lämmönsiirron suhdetta johtumiseen. Vapaassa ja pakotetussa konvektiossa Nusseltin luku yleensä määritellään erilaisten kokeellisten korrelaatioiden kautta Reynoldsin sekä niin kutsuttujen Rayleighin ja Prandtlin lukujen avulla. (Lampinen & Kotiaho 2015.)

$$Nu \begin{cases} F(Re, Pr), & \text{pakotettu} \\ F(Ra, Pr), & \text{vapaa} \end{cases} \quad (4)$$

Prandtlin ja Rayleighin luvut voidaan löytää hieman vastaavien dimensioanalyysien avulla kuin Reynoldsin lukukin ja ne määritellään kaavoilla

$$Pr = \frac{c_p \mu}{\lambda} \quad (5)$$

jossa:

- Pr on Prandtlin luku
- C_p on ominaislämpökapasiteetti
- μ on dynaaminen viskositeetti
- λ on lämmönjohtavuus

$$Ra = Gr \times Pr \quad (6)$$

jossa:

- Ra on Reynoldsin luku
- Gr on Grashofin luku
- Pr on Prandtlin luku

Prandtl-luku on kinemaattisen viskositeetin ja termisen diffusiivisuuden suhde, kun taas Rayleighin luku puolestaan kuvaa termiseen diffuusion ja konvektioon liittyvien aikaskaalojen suhdetta. (Hirvijoki 2022).

Grashofin luku kuvaa virtaavan aineen nostevoiman suhdetta siihen vaikuttaviin kitkavoimiin. Grashofin luvun laskennassa tarvitaan $(T_s - T_\infty)$, lämmönsiirtimen ripakorkeus (L) sekä parafiinivahan kinemaattinen viskositeetti (η). Ennen Grashofin luvun laskemista oli määritettävä parafiinivahan lämpölaajenemiskerroin (β), joka laskettiin kaavalla. (Lampinen & Kotiaho 2015; Szergényi 1974).

$$\beta = \frac{d_1^2 - d_2}{2(t_2 - t_1)d_1d_2}, \quad (7)$$

jossa:

- d_1 = nestemäisen parafiinivahan tiheys lämpötilassa 297 K
- d_2 = nestemäisen parafiinivahan tiheys lämpötilassa 287 K
- T_1 = fluidin alkulämpötila
- T_1 = lämmönsiirtimen lämpötila

$$\beta = \frac{(775 \text{ kg/m}^3)^2 - 775 \text{ kg/m}^3}{2(297-287)\text{K} \times 775 \times 775 \text{ kg/m}^3} = 0,0499 \text{ 1/K}$$

Grashofin luku laskettiin kaavalla.

$$Gr = \frac{\beta g L^3 (T_s - T_\infty)}{\eta^2}, \quad (8)$$

jossa:

- β on parafiinivahan lämpölaajenemiskerroin
- g on maan vetovoiman kiihtyvyyys
- L on lämmönsiirtimen ripakorkeus
- $(T_s - T_\infty)$ on lämpöä siirtävän pinnan ja fluidin välinen lämpötilaero
- η on parafiinivahan kinemaattinen viskositeetti

$$Gr = \frac{0,0499 \text{ 1/K} \times 9,81 \text{ m/s}^2 \times (0,0095 \text{ m})^3 \times (297-287)\text{K}}{(3,17 \times 10^{-5} \text{ m}^2\text{s})} = 4192,78$$

Prandtl-luku, joka mittaa diffuusioenergian siirron suhteellista tehokkuutta ja määrittää kinemaattisen viskositeetin ja termisen diffuusion suhteeksi.

Prandtl-luku laskettiin käyttämällä parafiinivahan ominaislämpökapasiteettia 2100 J/kg K, dynaamista viskositeettia 0,0269 kg/m s ja grafiitti-parafiinivahaseoksen lämmönjohtavuutta 1,19 W/m·K.

Rayleighin luku laskettiin Grashofin- ja Prandtlin lukujen avulla kertomalla ne keskenään. Rayleighin luvuksi saatiin 199033,54. Nusseltin luku ratkaistiin seuraavan kaavan avulla.

$$Nu = 0,68 + \frac{0,663 Ra^{1/4}}{[0,05 + (0,492 + Pr)^{9/16}]^{4/9}}, \quad (9)$$

jossa:

Ra on Rayleighin luku

Pr on Prandltin luku

$$Nu = 0,68 + \frac{0,663 \times (199033,54)^{1/4}}{[0,05 + (0,492 \div 47,47)^{9/16}]^{4/9}} = 35,04$$

Kiinteän pinnan ja siihen kosketuksissa olevan ja mahdollisesti virtaavan fluidin välistä lämpövuota mallinetaan yleisesti niin kutsutulla lämmönsiirtokerroimella α , jonka avulla pinnan läpi (fluidiin päin) kulkeva lämpövuoto tyypillisesti ilmoitetaan muodossa. Lämmönsiirtokerroin ratkaistiin kaavalla

$$\alpha = Nu \frac{\lambda}{L}, \quad (10)$$

jossa:

Nu = Nusseltin luku

λ = Grafiittijauhe-parafiinivahaseoksen lämmönjohtavuusluku

L = lämmönsiirtimen ripakorkeus

$$\alpha = 35,04 \times \frac{1,19 \frac{W}{mK}}{0,0095 m} = 4389,22 W/m^2 K$$

Yksittäisen lämmönsiirtorivan lämmönsiirtoteho laskettiin kaavalla

$$P = \alpha \times A \times (T_s - T_f), \quad (11)$$

jossa:

- P = lämmönsiirtoteho
- α = parafiinivahan lämmönsiirtokerroin
- A = lämmönsiirtorivan pinta-ala
- T_s = lämmönsiirtimen lämpötila
- T_f = fluidin lämpötila

$$P = 4389,22 W/m^2 m^2 K \times 757 \times 10^{-4} m^2 \times (27K - 17K) = 33,22 W$$

Koska tarvittava lämmönsiirtoteho 180 s sulatusajalle on 7167 W, tarvitaan laskennallisesti noin 215 ripaa. Hankkimassani lämmönsiirtospiiraalissa on 157

kierrosta metrillä, joten laskennallisesti riittävä lämmönsiirtokyky saavutetaan käyttämällä spiraalia 1,4 metriä.

4.3 Lämpövaraston rakentaminen

Lämpövaraston rakentaminen aloitettiin valmistamalla lämmönsiirtokierukka ilmastointilaitteikäyttöön tarkoitetusta kupariputkesta. Lämmönsiirtorivoiksi oli hankittu ruostumattomasta teräksestä valmistettua lämmönsiirtoon tarkoitettua spiraalia, jonka keskellä on reikä 16 mm putkea varten. Rivaston reikäkoko ohjasi valitsemaan lämmönsiirtokierukan materiaaliksi 5/8" kupariputken, jonka lämmönsiirtopinta-ala itsessään on $\sim 500 \text{ cm}^2/\text{m}$. Kierukka taivutettiin 114,3 mm teräsputken ympärille. Kupariputken muodonmuutoksen ehkäisemiseksi taivutuskohdassa, putken ympärillä oli alumiinisten sähköasennusputkien taivuttamiseen tarkoitettu ulkopuolinen taivutusjousi. Kuvassa 14 esitetään kierukan taivutusprosessi. Kierukan valmistuttua kupariputken päälle liu'utettiin lämmönsiirtospiraali. Spiraalin asentaminen oli erittäin aikaa vievä työvaihe, koska kupariputki oli taivutettaessa muuttanut hieman muotoaan. Lopuksi kierukkaan kiinnitettiin piippukulman avulla nousuputki, joka kulkee kierukan keskellä. Kierukan liitäntäputkiin asennettiin supistusnipat 5/8x3/8" supistusnipat, jotta putkikoko saatiin supistettua. Putkikoon muutos 3/8" \rightarrow 1/4" toteutettiin käyttämällä vähennysnippoja, joiden molempiin päihin tehtiin putkiin laippaliitokset. Laippaliitoksia lukuun ottamatta kaikki putkiliitokset tehtiin kovajuottamalla.



Kuva 14. Kierukan taivutus käynnissä

Lämpövaraston ulko- ja sisävaippa valmistettiin 200 mm ja 300 mm kierresaumakanavista. Sisävaipan päihin asennettiin päätytulpat, joista toiseen porattiin reiät kierukan liitântäputkia sekä lämpötila-antureita varten. Lämpövaraston pätyihin eristeeksi asennettiin paisutetusta polystyreenimuovista valmistettua eristelevyä 60 mm ja vaippojen väliin solumuovieristemattoa 50 mm. Yläpuoliseen eristeeseen porattiin reiät vastaaviin kohtiin kuin lämpövaraston kannessa.



Kuva 15. Valmis kierukka lämpövaraston sisällä

Lämpövaraston liittämiseksi nestelinjaan lisättiin kaksi T-haaraa ja näiden väliin GBC6S 1/4" 009L7020 palloventtiili, joka sulkemalla nestekierto on mahdollista ohjata kulkemaan lämpövaraston kautta. Lisäksi molempiin T-haarioihin asennettiin em. kaltaiset palloventtiilit, jotka sulkemalla lämpövarasto on mahdollista erottaa nestekierrosta. Palloventtiilit kiinnitettiin teräslevyyn, jotta kupariputkiliitoksiin ei kohdistu mekaanista rasitusta asennuksen ja muun käsittelyn aikana. Kupariputkien, T-haarojen ja venttiilien liitokset tehtiin kovajuottamalla. Lopuksi kaikki putkilinjat eristettiin solumuovieristeellä.



Kuva 16. Koelaitteiston palloventtiiliasetelma

Faasimuunnosmateriaalina käytettävän parafiinivahan sulamislämpötila on 46°C . Ennen vahaseoksen sulamislämpötilan säätöä mitattiin tyhjän lämpövaraston lämpötilaa lämmityskäytön aikana, joka lämpövaraston lämmentyessä oli koko ajan $\sim 32^{\circ}\text{C}$:tta. Parafiinivahan sulamislämpötila säädettiin kokeellisesti $\sim 26^{\circ}\text{C}$:seen lisäämällä seokseen 77,8 massaprosenttia parafiiniöljyä. Dongin ym. (2012) mukaan faasimuunnosmateriaalin ideaali sulamislämpötila on noin 10 astetta lauhtumislämpötilaa matalampi. Seos homogenoitiin lämmittämällä se liedellä noin 60°C :seen ja sekoittamalla huolellisesti. Sulamis- ja jähmettymislämpötilat määritettiin käyttämällä termopariantureilla varustettua loggaavaa lämpömittaria. Lopullinen vahaseoksen kokonaismäärä lämpövarastossa oli 5,8 kg. Valmiiseen seokseen lisättiin 1 kg grafiittijauhetta, joka on 17,2 massaprosenttia seoksesta. Valmis

grafiitti-parafiinivahaseos kaadettiin lämpövaraston sisälle siten, että sille jäi hieman laajenemistilavuutta. (Dong ym. 2012, 227.)



Kuva 17. Lämpövaraston grafiittijauhe-parafiinivahatäyttö

Valmis lämpövarasto lisäosineen kytkettiin osaksi kylmäainepiiriä.

Kylmälaitoksen putkistosta poistettiin alipainepumpulla sinne kertynyt kosteus ja samalla varmistettiin liitosten tiiveys. Absoluuttinen paine laitoksessa oli ~100 Pa, hyväksymisrajan ollessa <270 Pa. Kun laitoksen tiiveys oli varmistettu ja kosteus poistettu, avattiin lämpöpumpun ulkoyksikön rotalock -venttiilit, jolloin kylmäaine täytti koko laitoksen. Kierukan tilavuus liitännäputkineen on ~500 cm³. Kylmäainepiirin tilavuuden kasvaessa, oli kylmäainetta lisättävä järjestelmään. Kylmäainetta lisättiin jäähdytyskäytön aikana siten, että kaasulinjan paine nousi 9 bariin.



Kuva 18. Koelaitteiston kokoonpano ulkona

Tutkimusjakson aikana suoritettavia lämpötilamittauksia varten rakennettiin D1 mini pro -mikrokontrollerista ja ds18b20 -lämpötila-antureista mittausjärjestelmä, joka liitettiin langattomasti kiinteistön Home Assistant -järjestelmään.

Järjestelmään kytkettiin yhteensä kahdeksan anturia seuraavia mittauksia varten:

- Lämpövaraston alaosan lämpötila
- Lämpövaraston keskiosan lämpötila
- Lämpövaraston yläosan lämpötila
- Höyrystimen kennon lämpötila
- Kuumakaasun lämpötila
- Ulkolämpötila
- Sisäyksikön imuilman lämpötila
- Sisäyksikön puhallusilma lämpötila



Kuva 19. Koelaitteiston kokoonpano sisällä

5 Koelaitteiston koeajo

5.1 Tutkimuksen tavoite

Tutkimuksen tavoitteena on selvittää parafiinivahatäytteisen lämpövaraston vaikutusta koelaitteistona käytettävän ilmalämpöpumpun sulatusjaksojen pituuteen. Sulatusaikojen pituutta mitataan lämpövarasto laitokseen kytkettynä ja tuloksia verrataan sulatusaikoihin ilman lämpövarastoa ajettujen käyntijaksojen aikana. Tämän lisäksi mitataan lämpötilamuutoksia lämpövaraston sisällä ja pyritään täten arvioimaan mitoitettun faasimuunnosmateriaalin lämmönvarauskyvyn riittävyyttä sulatukseen sekä lämpövaraston lämmönsiirtokykyä sulatuksen vaatimaan lämpöenergiatarpeeseen nähden.

5.3 Tutkimuksen suorittaminen


Tutkimus suoritettiin marraskuun puolivälissä. Kahdeksan tunnin koeajojakson aikana ulkolämpötila vaihteli välillä $-0,1 \dots +0,2$ °C. Kuten edellä on todettu, höyrystimen huurtuminen on aikaisempien tutkimusten perusteella voimakkainta ulkolämpötilan ollessa $-5 \dots 5$ °C.

Tutkimuksen alkuvaiheessa havaittiin mitoituslaitteena olleessa Panasonic CS-W9CKP / CU-W9CKP5-lämpöpumpussa käyntihäiriö, joka ilmeni paineentuotto-ongelmana aina sulatusjaksojen jälkeen. Laite yritti käynnistyä lämmitystilaan, mutta kompressori piti ikävää ääntä eikä painetta laitokseen syntynyt. Lukuisten yritysten jälkeen laite alkoi satunnaisesti toimia ja toimikin normaalisti aina seuraavan sulatusjaksoon saakka. Tässä vaiheessa oli kuitenkin selvää, ettei kyseistä laitetta voisi luotettavasti käyttää tiedon keruussa.

Rikkinäinen ilmalämpöpumppu korvattiin hieman uudemmalla Panasonic CS-E9DKEWCU-E9DKE invertteri -ilmalämpöpumpulla, jonka mitoituslämmitysteho on 3,6 kW. Lämpövarasto liitettiin osaksi lämpöpumppulaitosta

Tutkimuksen aikana lämpöpumppua käytettiin lämmitystoiminnolla yhteensä kahdeksan tunnin ajan. Kokeen aikana ilmalämpöpumpun sulatusjaksoja esiintyi noin tunnin välein. Jokaisen sulatusjakson jälkeen palloventtiilien asentoa muutettiin siten, että peräkkäisten jaksojen aikana lämpövarasto oli ohitettuna yhden sulatusjakson ajan ja osana kiertoprosessia toisen sulatusjakson ajan. Ennen sulatusjaksoa lämpövarastoa ladattiin koko lämmitysjakson ajan.

Lämpötilatietoa kerättiin kaikista antureista 10 sekunnin välein. Lisäksi höyrystimen huurteisuuutta havainnoitiin visuaalisesti. Lämmitysjaksojen jäädessä melko lyhyiksi, ei otollisista huurtumisolosuhteista huolimatta kovin paksua huurrekerrosta ehtinyt muodostua. Kuvassa 20 esitetään mittausjärjestelmän tuottamaa logitietoa.



```

logs_esphome-web-781d06_run (3) - Muistio
Tiedosto Muokkaa Muotoile Näytä Ohje
[19:04:04][D][dallas.sensor:143]: 'LV_ala': Got Temperature=27.9°C
[19:04:04][D][sensor:093]: 'LV_ala': Sending state 27.93750 °C with 1 decimals of accuracy
[19:04:04][D][dallas.sensor:143]: 'LV_keski': Got Temperature=27.4°C
[19:04:04][D][sensor:093]: 'LV_keski': Sending state 27.43750 °C with 1 decimals of accuracy
[19:04:04][D][dallas.sensor:143]: 'sisayksikkö_in': Got Temperature=17.5°C
[19:04:04][D][sensor:093]: 'sisayksikkö_in': Sending state 17.50000 °C with 1 decimals of accuracy
[19:04:04][D][dallas.sensor:143]: 'kuumakaasu': Got Temperature=45.1°C
[19:04:04][D][sensor:093]: 'kuumakaasu': Sending state 45.06250 °C with 1 decimals of accuracy
[19:04:04][D][dallas.sensor:143]: 'ulkolampotila': Got Temperature=0.1°C
[19:04:04][D][sensor:093]: 'ulkolampotila': Sending state 0.06250 °C with 1 decimals of accuracy
[19:04:04][D][dallas.sensor:143]: 'LV_yla': Got Temperature=23.6°C
[19:04:04][D][sensor:093]: 'LV_yla': Sending state 23.56250 °C with 1 decimals of accuracy
[19:04:04][D][dallas.sensor:143]: 'hoyrystin': Got Temperature=5.1°C
[19:04:04][D][sensor:093]: 'hoyrystin': Sending state 5.06250 °C with 1 decimals of accuracy
[19:04:04][D][dallas.sensor:143]: 'sisayksikko_out': Got Temperature=27.8°C
[19:04:04][D][sensor:093]: 'sisayksikko_out': Sending state 27.75000 °C with 1 decimals of accuracy
[19:04:14][D][dallas.sensor:143]: 'LV_ala': Got Temperature=27.9°C
[19:04:14][D][sensor:093]: 'LV_ala': Sending state 27.87500 °C with 1 decimals of accuracy
[19:04:14][D][dallas.sensor:143]: 'LV_keski': Got Temperature=27.2°C
[19:04:14][D][sensor:093]: 'LV_keski': Sending state 27.18750 °C with 1 decimals of accuracy
[19:04:14][D][dallas.sensor:143]: 'sisayksikkö_in': Got Temperature=17.4°C
[19:04:14][D][sensor:093]: 'sisayksikkö_in': Sending state 17.43750 °C with 1 decimals of accuracy
[19:04:14][D][dallas.sensor:143]: 'kuumakaasu': Got Temperature=42.7°C
[19:04:14][D][sensor:093]: 'kuumakaasu': Sending state 42.68750 °C with 1 decimals of accuracy
[19:04:14][D][dallas.sensor:143]: 'ulkolampotila': Got Temperature=0.1°C
[19:04:14][D][sensor:093]: 'ulkolampotila': Sending state 0.06250 °C with 1 decimals of accuracy
[19:04:14][D][dallas.sensor:143]: 'LV_yla': Got Temperature=23.5°C
[19:04:14][D][sensor:093]: 'LV_yla': Sending state 23.50000 °C with 1 decimals of accuracy
[19:04:14][D][dallas.sensor:143]: 'hoyrystin': Got Temperature=5.6°C
[19:04:14][D][sensor:093]: 'hoyrystin': Sending state 5.62500 °C with 1 decimals of accuracy
[19:04:14][D][dallas.sensor:143]: 'sisayksikko_out': Got Temperature=27.6°C
[19:04:14][D][sensor:093]: 'sisayksikko_out': Sending state 27.62500 °C with 1 decimals of accuracy
[19:04:24][D][dallas.sensor:143]: 'LV_ala': Got Temperature=27.8°C

```

Kuva 20. Home Assistant logitietoa

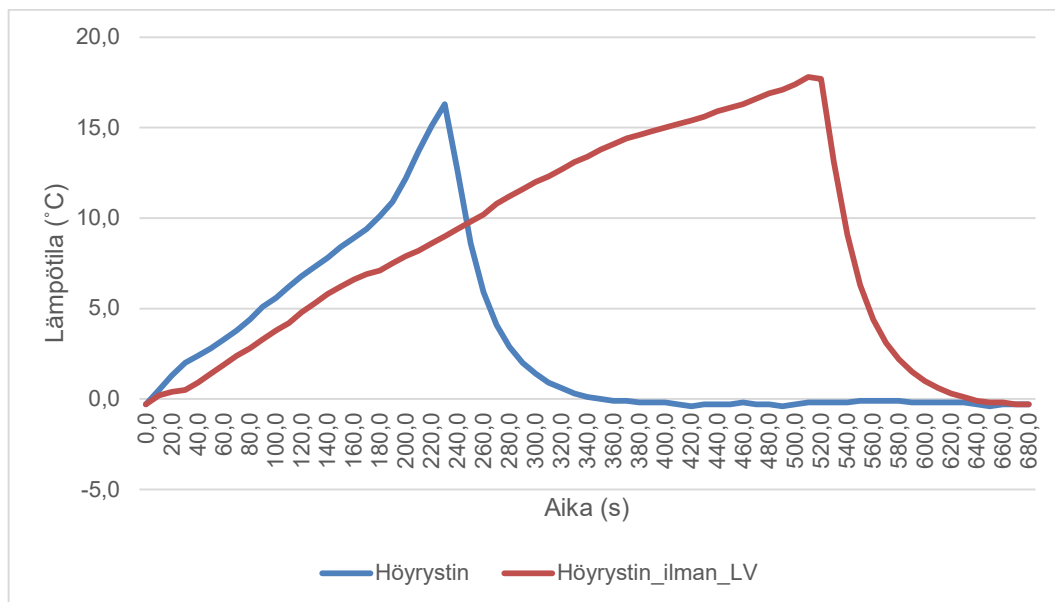
Kokeen jälkeen havaittiin, että lämpövaraston ylimmäinen lämpötila-anturi oli asennusvaiheessa puutteellisen kiinnityksen takia, liukunut kiinnitystankoa ylöspäin ja jäänyt osittain parafiinivahatäyteen yläpuolelle. Lisäksi kuvassa 21 on nähtävissä, että grafiittijauhe oli painavampana materiaalina alkanut painua kohti varaston pohjaa ja vahaseos oli yläosastaan miltei kokonaan erottunut grafiitista.



Kuva 21. Parafiinivahatäyttö koejakson jälkeen

6 Tulokset ja analyysi

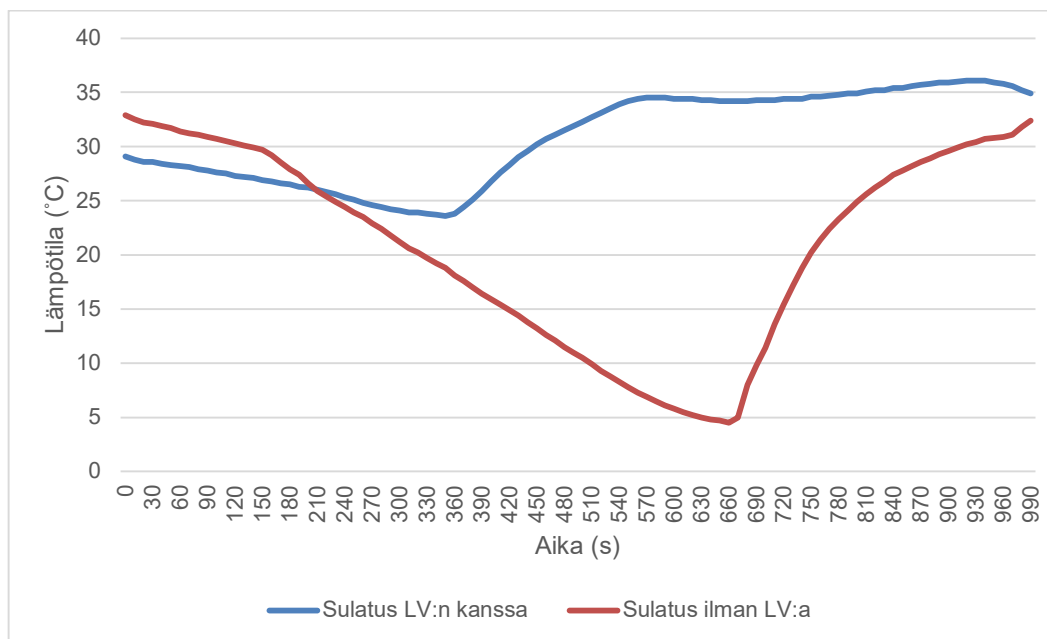
Tutkimuksesta kerätyn mittaustiedon perusteella on tehtävissä tutkimuksen hypoteesia tukevia havaintoja. Kokeen tulosten perusteella keskeisin päätelmä on se, että sulatusjaksojen kesto lyhentyi merkittävästi lämpövaraston ollessa mukana kierrossa. Mitoituslaskelmissa tavoitteena olleeseen 180 sekuntiin ei kuitenkaan päästy. Tuloksia analysoitaessa sulatusjakson kesto määriteltiin mittaustiedosta siten, että jakson katsotaan alkaneen siitä hetkestä, kun höyrystimen kennon lämpötila lähtee nousuun. Vastaavasti sulatusjakson katsotaan päättyneen, kun kennon lämpötila lähtee laskuun. Tämän määritelmän perusteella lämpövaraston tukiessa sulatusta, jakson pituus oli noin 55 % normaalisolatusta lyhyempi. Lämpövaraston avustamana jakson pituus oli noin 240 sekuntia ja ilman lämpövarastoa noin 540 sekuntia. Molemmissa asetelmissa kennon korkein lämpötila jakson lopussa oli $\sim 17\text{ }^{\circ}\text{C}$. Koska sulatusjaksojen keston on saavutettavissa näin merkittävä parannus, voidaan olettaa myös COP-luvun parantuvan lämpövaraston käytön myötä. Kuviossa 1 esitetään höyrystimen lämpötilamuutokset yhden sulatusjakson aikana.



Kuvio 1. Höyrystimen lämpötila sulatusjaksojen aikana

Kuviossa 2 on nähtävissä lämpötilamuutokset sisäyksikön sisällä.

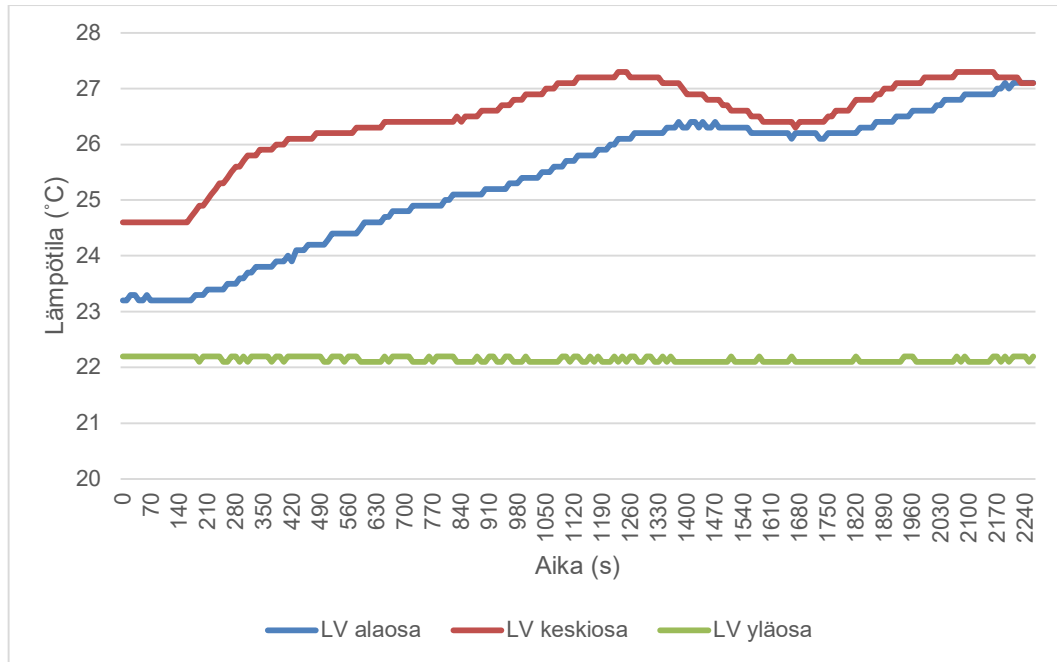
Lämpövaraston ollessa mukana sulatuksessa on lämpötilan lasku sisäyksikössä huomattavasti maltillisempaa. Tästä voidaan päätellä, että lämpöenergiaa ei juurikaan oteta sulatukseen sisäyksikön kennosta. Sulatusjakson päättyessä, maltillisesti jäähtynyt kenno lämpiää nopeasti tuottamaan lämmintä ilmaa huonetilaan.



Kuvio 2. Sisäyksikön lämpötila sulatusjaksojen aikana

Lämpövaraston lämpötilamuutoksia oli tarkoitus havainnoida kolmeen eri korkeuteen asennetuilla lämpötila-antureilla. Antureista ylimmäinen oli asennusvirheen seurauksena jäänyt lämpövaraston vahatäytön yläpuolelle, eikä siitä saatu mittaustieto ole tutkimustuloksia arvioitaessa käyttökelpoista. Kahden muun anturin tuottamasta tiedosta on nähtävissä, että lämpövaraston sisällä on lämpötilaeroja. Sulatusjakson aikana lämpötila laskee varaston alaosassa keskiosaa enemmän. Latausvaiheessa alaosan lämpötila pysyttelee koko ajan keskiosaa korkeammalla. Noin 1600 sekunnin kohdalla molemmissa lämpötiloissa tapahtuu notkahdus, jonka voisi ajatella johtuvan osittain

nestemäisessä olomuodossa olevan vahan liikkeistä varaston sisällä. Kuviossa 3 on esitetty lämpövaraston lämpötiloja lämmitysjakson aikana.



Kuvio 3. Lämpövaraston lämpötila lämmitysjakson aikana

7 Johtopäätökset

Tämän ja aikaisempien tutkimusten tulokset ovat rohkaisevia ja kannustavat lämpövarastojen hyödyntämiseen ilmalämpöpumppujen tukena kylmissä olosuhteissa. Tässä tutkimuksessa käytetty lämpöpumppu on vanha, ei erityisesti pohjoisen olosuhteisiin kehitetty malli, jonka yhteydessä lämpövarastolla saavutettava hyöty korostuu. Toteutunut lyhyt koeajoajakso ei mahdollistanut tiedon keruuta erilaisissa ulkolämpötiloissa ja kosteusolosuhteissa. Mikäli tutkimuksen suorittamiseen olisi ollut käytettävissä suurempi budjetti, olisi laitteiston laatuun voinut panostaa enemmän. Nyt monien materiaalien valinta perustui siihen, mitä oli helpoimmin saatavilla. Esimerkiksi tehdasvalmisteisen lämmönvaihtimen käyttö olisi mahdollistanut lämmönvaihdinvalmistajan osaamisen hyödyntämisen suunnittelussa.

7.1 Edut

Lämpövaraston avulla voidaan lämmitysjaksojen kokonaiskesto lisätä ja älykkäällä sulatuslogiikalla varustettujen laitteiden yhteydessä voidaan sulatusjaksojen määrä ja kesto optimoida mahdollisimman pieneksi.

Lämmön talteenoton ansiosta tapahtuva kylmäaineen alijäähtyminen tehostaa höyrystymistä ja parantaa siten COP-lukua. Yhdessä pidentyneiden lämmitysjaksojen kanssa voidaan olettaa lämpökertoimen parantuvan merkittävästi.

7.2 Rajoitukset

Tutkimuksessa käytetty grafiittiseosteisen parafiinivahan ainesosat alkoivat erkaantua toisistaan jo hyvin lyhyen käyttöjakson aikana, joka johti lämmönjohtokyvyn heterogenisoitumiseen PCM-materiaalissa. Mikäli faasimuunnosmateriaaliin seostetaan grafiitin kaltaista, ominaispainoltaan poikkeavaa materiaalia parantamaan parafiinivahan lämmönjohtavuutta, olisi

seos hyvä kapseloida pienempiin osiin, jolloin ainesosien erkaantuminen olisi vähäisempää.

Koska heikko lämmönjohtavuus on PCM-materiaaleille tyypillinen ominaisuus, tulee lämpövarastoja suunniteltaessa kiinnittää huomiota riittävän suureen lämmönsiirtopinta-alaan kylmäaineen ja faasimuunnosmateriaalin välillä. Tällä voidaan varmistaa se, että sulatusta varten varastoitu lämpöenergia siirtyy riittävän nopeasti höyrystimelle.

Tämän tutkimuksen yhteydessä rakennettu lämpövarasto on tuotantokäyttöä ajatellen fyysisesti liian suuri ja ulkoisesti epäedustava. PCM-materiaalin määrän optimointi on tärkeää, jotta voidaan valmistaa kompakti lämpövarasto, joka on sijoitettavissa mahdollisimman huomaamattomasti ulkoyksikön läheisyyteen. Optimaalista olisi, jos lämpövarasto voitaisiin sijoittaa ulkoyksikön sisälle. Eristeeksi tulee valita mahdollisimman tehokas materiaali, jotta varaston koko pysyy riittävän pienenä.

7.3 Tulevaisuuden tutkimussuunnat

Huurteen sulatustehokas ja jatkuva lämmitys on lämpöpumppujen tulevaisuuden kehitystrendi. Lämpövarasto on hyvä tapa parantaa lämpöpumpun sulatustehoa. Tavoitteena tulisi olla lämpövarastoihin liittyvien tutkimusten laajempi huomio ja teollisten sovellusten edistäminen laajemman adaptaation saavuttamiseksi. Lämpövarastojen jatkotutkimuksessa voitaisiin painottaa seuraavia tutkimussuuntia:

- 1) Vertailla ja analysoida lämpövarastojen vaikutusta erityyppisiin lämpöpumppuihin muutoin identtisessä koeasetelmassa
- 2) Erilaisten faasimuutosmateriaalin valintaa helpottavaa tutkimustietoa
- 3) Lämpövarastojen rakenteelliseen optimointiin liittyvää tutkimusta. Tavoitteena tulisi olla mahdollisimman tehokas lämmönsiirto, optimaalinen varastointikyky sekä kompakti lämpövaraston rakenne.

Yksi potentiaalinen tutkimuskohde voisi olla kompressorin ympärille asennettava lämpövarasto, jolla voitaisiin selvittää lämpövaraston hyödyllisyyttä ns. Nordic-pumpuissa, jotka käyttävät ensisijaisesti kuumakaasusulatusta lämmönsiirtimen huurteen poistoon.

8 Yhteenveto

Sulatukseen käytettävä energia laskee ilmalämpöpumpun lämpökerrointa ja sulatukseen kuluva aika on pois lämmöntuotannosta. Näiden kahden asian vaikutus kokonaislämmöntuotantoon on keskeinen. Mikäli sulatusta tehdään vain silloin ja vain niin kauan kuin se on tarpeellista, voidaan ilmalämpöpumpun lämpökerrointa parantaa merkittävästi. Edellä mainittujen seikkojen optimointi edellyttää sulatuslogiikan älykästä toimintaa.

Sulatusjakson kestoa sekä siihen käytettävän energian määrää voidaan vähentää varastoimalla lauhduttimelta ylijäävää hukkalämpöä. Tätä hukkalämpöä ei voi käyttää lämmitykseen, koska sen lämpötila ei ole siihen riittävä. Varastoitaessa ylijäämälämpöä, on perusteltua käyttää faasimuunnokseen perustuvaa lämpövarastoa, koska tällöin varaston fyysinen koko jää kohtuullisen pieneksi ja varastoitu lämpö on purettavissa nopeasti. Lisäksi varaston jälkeen höyrystimelle palavaa kylmäainetta alijäähtyy ja höyrystyy siksi tehokkaammin.

Tässä opinnäytetyössä kertynyt tieto vahvisti aikaisempia tutkimustuloksia faasimuunnosmateriaalien käyttökelpoisuudesta lämmön varastoinnissa, niin passiivisessa kuin aktiivisessa muodossa. Erittäin yllättävää oli ilmalämpöpumpun tehdyllä kohtuullisen pienellä modifikaatiolla saavutettu myönteinen vaikutus laitteen toimintaan. Vaikka pääasiassa löydökset olivat linjassa aikaisemmin tehtyjen tutkimusten kanssa, mutta grafiitin ja parafiinivahan nopeasta erkaantumisesta löytynyt mainintaa perehdyttäessä aihealueen teoriaan.

Opinnäytetyön yhteydessä rakennetulla koelaitteistolla voitiin todentaa, että lämpövarasto kytkettynä ilmalämpöpumpun, lyhentää sulatusjaksojen kestoa sekä vähentää sisältä otettavan sulatusenergian tarvetta. Tutkimuksen kokeellisen osan toteutuksessa tuli liian kiire muutamien odottamattomien vastoinkäymisten seurauksena, sillä takarajaksi määritetty marraskuun loppu saneli testijakson aikataulun. Tästä syystä koeajajakso jäi suunniteltua

lyhyemmäksi ja kaikkia suunniteltuja mittauksia, kuten kylmäaineen paineen ja sulamisvesien määrän dokumentoimiseen, ei saatu koelaitteistoon asennettua.

Lähteet

Amer, M. & Wang, C.-C. (2017). Review of defrosting methods. *Renewable and Sustainable Energy Review*, 73, 53–74.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.120> Viitattu 28.6.2023

Azizi, S. & Castelló Péres, L. (2016). Novel defrost techniques on air source heat pumps [Master of Science Thesis, KTH]. *Digitala Vetenskapliga Arkivet*.

<https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kth:diva-192491> Viitattu 2.7.2023

Dong, J., Deng, S., Jiang, Y., Jiang, X. & Yao, Y. (2011). An experimental study on defrosting heat supplies and energy consumptions during a reverse cycle defrost operation for an air source heat pump. *Applied Thermal Engineering*, 37,

380–387. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.11.052> Viitattu

20.9.2023

Dong J., Shiming, D. & Yang, Y. (2012). Improving reverse cycle defrosting performance of air source heat pumps using thermal storage-based refrigerant sub-cooling energy. *Building Services Engineering Research and Technology*,

33, 223–236. <https://doi.org/10.1177/0143624411406016> Viitattu 5.7.2023

Dong, J., Jiang, Y., Li, S., Yao, Y., Tian, Y. & Tian, H. (2015). Defrosting performances of a multi-split air source heat pump with phase change thermal storage. *International Journal of Refrigeration*, 55, 49–59.

<https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2015.03.018> Viitattu 21.11.2023

Hu, W., Jiang, Y., Qu, M., Ni, L., Yao, Y. & Deng, S. (2010). An experimental study on the operating performance of a novel reverse-cycle hot gas defrosting method for air source heat pumps. *Applied Thermal Engineering*, 31, 2–3

<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2010.09.024> Viitattu 21.11.2023

Hirvijoki, E. (2022). *Termodynamiikan ja lämmönsiirron perusteet*. Oppikirja Aalto yliopisto

https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/1763289/course/section/204202/oppikirja_a_6_9_2022.pdf Viitattu 4.9.2023

JS Energi. Kuvalähde <https://jseducation.se/product/panasonic-cs-w9ckp-cu-w9ckp5> Viitattu 21.11.2023

- Kaapola, E., Hirvelä, A., Jokela, M. & Kianta, J. (2020). Kylmätekniiikan perusteet. Opetushallitus.
- Karttunen, H., Koistinen, J., Saltikoff, E. & Manner, O. (2008). Ilmakehä, sää ja ilmasto. URSA.
- Lampinen, Markku. Kotiaho, Voitto. .2015. Johdatusta lämmönsiirto-oppiin. Aalto yliopisto.
https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/1598367/mod_resource/content/3/LAMPINEN_KOTIAHO_LAMMONSIIRTO.pdf Viitattu 21.9.2023
- LämpöYkkönen. (2023). Miten Suomesta tuli lämpöpumppujen suurvalta Euroopassa? –artikkeli. <https://lampoykkonen.fi/artikkelit/miten-suomesta-tuli-lampopumppujen-suurvalta-euroopassa/> Viitattu 5.12.2023
- Mansikkamäki, H. (2016) Elintarviketeollisuuden sileärunkoisen sähkömoottorin jäähdytys vapaalla konvektiolla. [Diplomityö 2016. Vaasan yliopisto]. Osuva. https://osuva.uwasa.fi/bitstream/handle/10024/3007/osuva_7032.pdf?sequence=1&isAllowed=y Viitattu 20.9.2023
- Pönkä, A. (2012). Faasimuutosmateriaalien käyttö energian varastoinnissa [diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto]. Trepo. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:tty-201212111355> Viitattu 1.7.2023
- Qu, M., Li, T., Den, S. & Fan, Y. & Li, Z. (2017). Improving defrosting performance of cascade air source heat pump using thermal energy storage based reverse cycle defrosting method. Applied Thermal Engineering, 121,728–736. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.04.146> Viitattu 21.8.2023
- Qu, M., Tang, Y., Zhang, T., Li, Z. & Chen, J. (2019). Experimental investigation on the multi-mode heat discharge process of a PCM heat exchanger during TES based reverse cycle defrosting using in cascade air source heat pumps. Applied Thermal Engineering, 151, 154–162. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.02.003> Viitattu 2.7.2023
- Sandberg, E. (2014). Sisäilmasto ja ilmastointijärjestelmät. Talotekniikka-Julkaisut Oy.
- Shen, J., Qian, Z., Xing, Z., Yu, Y. & Ge, M. (2019). A review of the defrosting methods of air source heat pumps using heat exchanger with phase change

material. *Energy Procedia*, 160, 491–498

<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.02.197> Viitattu 8.7.2023

Solves. (2023). Ilmalämpöpumput ja Suomen talvi – artikkeli.

<https://solves.fi/2023/02/15/ilmalampopumput-ja-suomen-talvi/> Viitattu 5.12.2023

Szergényi, I. (1974). A method for determining the coefficient of volume thermal expansion of petroleum paraffins.

<https://pp.bme.hu/ch/article/download/3199/2304> Viitattu 12.9.2023



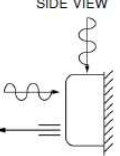
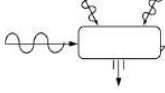
Zhu, J., Sun, Y., Wang, W., Ge, Y., Li, L. & Liu, J. (2015). A novel Temperature-Humidity-Time defrosting control method based on a frosting map for air-source heat pumps. *International Journal of Refrigeration*, 54, 45–54.

<https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2015.02.005> Viitattu 28.6.2023

Zhang, L., Dong, J., Jiang, Y. & Yao, Y. (2014). A novel defrosting method using heat energy dissipated by the compressor of an air source heat pump.

Applied Energy, 133, 101–111. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.07.039> Viitattu 21.8.2023

Panasonic CS-W9CKP / CU-W9CKPS tekniset tiedot

		Unit	CS-W9CKP	CU-W9CKPS
Cooling Capacity		kW (kcal/h)	2.90 (2,490)	
		BTU/h	9,890	
Heating Capacity		kW (kcal/h)	3.14 (2,700)	
		BTU/h	10,700	
Moisture Removal		l/h (Pint/h)	1.7 (3.6)	
Power Source		Phase	Single	
		V	230	
		Cycle	50	
Airflow Method		OUTLET  INTAKE 	SIDE VIEW 	TOP VIEW 
Air Volume	Indoor Air (Lo)	m ³ /min (cfm)	Cooling; 6.8 (240) Heating; 7.0 (250)	—
	Indoor Air (Me)	m ³ /min (cfm)	Cooling; 8.3 (290) Heating; 8.0 (280)	—
	Indoor Air (Hi)	m ³ /min (cfm)	Cooling; 9.9 (350) Heating; 10.2 (360)	Cooling; 34.5 (1,220)
	Indoor Air (SHi)	m ³ /min (cfm)	Cooling; 10.2 (360) Heating; 10.2 (360)	—

		Unit	CS-W9CKP	CU-W9CKP5	
Net Weight		lb (kg)	20 (9.0)	73 (33)	
Compressor	Type		—	Rotary (1 cylinder) rolling piston type	
	Motor Type		—	Induction (2-poles)	
	Rated Output	W	—	780	
Air Circulation	Type		Cross-flow Fan	Propeller Fan	
	Material		AS + Glass Fiber 20%	PP Resin	
	Motor Type		Induction (4-poles)	Induction (6-poles)	
	Input	W	49.2	63.0	
	Rated Output	W	15	29	
	Fan Speed	Low	rpm	Cooling; 780 Heating; 840	—
			rpm	Cooling; 960 Heating; 960	—
Medium		rpm	Cooling; 960 Heating; 960	—	
High		rpm	Cooling; 1,140 Heating; 1,230	820	
SuperHigh	rpm	Cooling; 1,230 Heating; 1,230	—		
Heat Exchanger	Description		Evaporator	Condenser	
	Tube material		Copper	Copper	
	Fin material		Aluminium (Pre Coat)	Aluminium (Blue Coat)	
	Fin Type		Slit Fin	Corrugate Fin	
	Row / Stage		(Plate fin configuration, forced draft)		
	FPI		2 x 15	1 x 20	
Size (W x H x L)	mm	610 x 315 x 25.4	841 x 508 x 22		
Refrigerant Control Device			—	Capillary Tube	
Refrigeration Oil		(cm ³)	—	FVC68D (330)	
Refrigerant (R-410A)		g (oz)	—	940 (33.2)	
Thermostat			Electronic Control	—	
Protection Device			—	Overload Protector	
Capillary Tube	Length	mm	—	Cooling; 970, Heating; 720	
	Flow Rate	l/min	—	Cooling; 5.0, Heating; 7.5	
	Inner Diameter	mm	—	Cooling; 1.2, Heating; 1.3	
Air Filter	Material		P.P.	—	
	Style		Honeycomb	—	
Capacity Control			Capillary Tube		
Compressor Capacitor		µF, VAC	—	30 µF, 370VAC	
Fan Motor Capacitor		µF, VAC	1.5 µF, 400VAC	2.0 µF, 450VAC	

Air Volume	Indoor Air (Lo)	m ³ /min (cfm)	Cooling; 6.8 (240) Heating; 7.0 (250)	—
	Indoor Air (Me)	m ³ /min (cfm)	Cooling; 8.3 (290) Heating; 8.0 (280)	—
	Indoor Air (Hi)	m ³ /min (cfm)	Cooling; 9.9 (350) Heating; 10.2 (360)	Cooling; 34.5 (1,220)
	Indoor Air (SHI)	m ³ /min (cfm)	Cooling; 10.2 (360) Heating; 10.2 (360)	—
Noise Level		dB (A)	Cooling; High 36, Low 26 Heating; High 39, Low 26	Cooling; High 48 Heating; High 49
		Power level (dB)	Cooling; High 49 Heating; High 52	Cooling; High 63 Heating; High 64
Electrical Data	Input	W	Cooling; 850 Heating; 780	
	Running Current	A	Cooling; 3.7 Heating; 3.5	
	EER	W/W (BTU/hW)	Cooling; 3.41 (11.6)	
	COP	W/W (BTU/hW)	Heating; 4.03 (13.7)	
	Starting Current	A	15.9	
Piping Connection Port (Flare piping)	inch inch		G ; Half Union 3/8" L ; Half Union 1/4"	G ; 3-way valve 3/8" L ; 2-way valve 1/4"
Pipe Size (Flare piping)	inch inch		G ; (gas side) 3/8" L ; (liquid side) 1/4"	G ; (gas side) 3/8" L ; (liquid side) 1/4"
Drain Hose	Inner diameter	mm	12	—
	Length	mm	650	—
Power Cord Length	m		1.9	—
Number of core-wire			3 (1.0 mm ²)	—
Dimensions	Height	inch (mm)	10 - 13/16 (275)	21 - 1/4 (540)
	Width	inch (mm)	31 - 15/32 (799)	30 - 23/32 (780)
	Depth	inch (mm)	8 - 9/32 (210)	11 - 3/8 (289)