



# Kylmävaraston lauhde-energian hyödyntäminen kasvipuutarhan lämmityksessä

Antti Jokela

Opinnäytetyö, AMK

Tammikuu 2024

Tekniikan ala

Insinööri (AMK), Energia- ja ympäristötekniikan koulutusohjelma

**Jokela, Antti**

## **Kylmävaraston lauhde-energian hyödyntäminen kasvihuutarhan lämmityksessä**

Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Tammikuu 2024, 38 sivua.

Energia- ja ympäristötekniikan tutkinto-ohjelma. Opinnäytetyö AMK.

Julkaisun kieli: suomi

Julkaisulupa avoimessa verkossa: kyllä

### **Tiivistelmä**

Korkeat energian hinnat ovat johtaneet aiempaa paremman energiatehokkuuden tavoitteluun. Kylmävarasto puskee jäähdytyksestä syntyvän lauhde-energian taivaan tuuliin, kun hukkalämmölle ei löydy väli-töntä käyttötarvetta. Samaan aikaan toisaalla kasvihuonetta lämmitetään lämmityskattiloilla optimaalisten kasvuolosuhteiden ylläpitämiseksi.

Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää mahdollisuuksia parantaa molempien kohteiden energiatehokkuutta hyödyntämällä kylmävaraston tuottamaa lauhde-energiaa kasvihuoneen lämmityksessä. Kylmävaraston tuottamaa lauhdetehoa ja kasvihuoneen lämmitystehon tarvetta vertailtiin keskenään. Energiamäärien vertailun lisäksi pohdittiin lauhde-energian hyödyntämiseen käytettävien teknologisten ratkaisujen toteutettavuutta.

Tuloksista saatiin selville, että kyseisen kylmävaraston tuottaman lauhde-energian määrä riittäisi tutkittavana kohteena olleen kasvihuoneen lämmittämiseen. Opinnäytetyön tuloksia voidaan hyödyntää vastaanlaisten lauhde-lämpöä tuottavien ja lämmitysenergiaa tarvitsevien rakennusten suunnittelussa.

### **Avainsanat (asiasanat)**

lauhde-energia, hukkalämpö, kasvihuone, kylmävarastointi, lämmitys, jäähdytys

### **Muut tiedot (salassa pidettävät liitteet)**

Ei salassa pidettäviä liitteitä.

**Jokela, Antti**

**Utilization of cold-storage condensate energy for indoor garden heating**

Jyväskylä: JAMK University of Applied Sciences, September 2020, 38 pages.

Degree Programme in Energy and Environmental Technology. Bachelor's thesis.

Permission for open access publication: Yes

Language of publication: Finnish

**Abstract**

High energy prices have led to a pursuit of improved energy efficiency. The cold storage facility releases the waste heat generated during cooling into the environment when there is no immediate need for waste heat utilization. Simultaneously, elsewhere, a greenhouse is heated with boilers to maintain optimal growth conditions.

The aim of the thesis was to explore opportunities to enhance the energy efficiency of both facilities by utilizing the waste heat produced by the cold storage in greenhouse heating. The produced condensation power of the cold storage and the heating power requirement of the greenhouse were compared. In addition to comparing energy quantities, the feasibility of technological solutions for utilizing waste heat was considered.

The results revealed that the amount of waste heat produced by the cold storage in question would be sufficient for heating the greenhouse under investigation. The findings of the thesis can be applied in the design of similar buildings that generate waste heat and require heating energy, respectively.

**Keywords/tags (subjects)**

waste heat, greenhouse, cold storage, heating, refrigeration

**Miscellaneous (Confidential information)**

No confidential appendices.

## Sisältö

<b>1</b>	<b>Johdanto .....</b>	<b>6</b>
1.1	Opinnäytetyön tausta ja aiheen valinta .....	6
1.2	Opinnäytetyön tavoitteet ja toteutus .....	6
<b>2</b>	<b>Kylmätekniikka .....</b>	<b>7</b>
2.1	Kylmälaitosprosessi ja komponentit .....	8
2.1.1	Kompressori .....	9
2.1.2	Lauhdutin .....	10
2.1.3	Paisuntaventtiili .....	10
2.1.4	Höyrystin .....	10
2.2	Kylmäaineet.....	11
2.3	Kylmäaineiden jaottelu .....	12
2.4	Kylmäaineiden ominaisuudet.....	12
2.4.1	Termodynaamiset ominaisuudet.....	12
2.4.2	Kemialliset ja fysiologiset ominaisuudet .....	13
2.4.3	Log p, h -tilapiirros .....	14
2.5	Kylmäkoneöljyt.....	16
2.6	Lämpöpumppu .....	17
2.7	Lämpöpumpun lämpökerroin .....	18
2.7.1	Lauhdelämpöpumppu.....	18
2.8	Lämit $\dot{Q}$ COP .....	19
2.9	Lauhdutus.....	20
2.9.1	Lauhdelämmön hyödyntäminen.....	20
2.9.2	Lauhdutusmenetelmät .....	20
<b>3</b>	<b>Kasvihuone .....</b>	<b>21</b>
3.1	Kasvihuoneviljely.....	21
3.2	Kasvihuoneviljelyn energiankulutus.....	22
<b>4</b>	<b>Kylmävarasto.....</b>	<b>22</b>
4.1	Kylmävaraston energiankulutus.....	22
4.2	Jäähdytyksen hukkalämpö .....	23
4.3	Teollisuuden ylijäämälämmön potentiaali.....	23
<b>5</b>	<b>Laskennat .....</b>	<b>24</b>
5.1	Kasvihuoneen lämmitysenergiantarve.....	24
5.1.1	Lämpöhäviöt .....	25

5.1.2	Lämpökuormat .....	26
5.1.3	Lämpöhäviöiden ja -kuormien tehotase.....	27
5.2	Kylmävaraston lauhde-energian tuotto .....	29
5.3	Vertailu .....	30
<b>6</b>	<b>Toteutettavuus ja saavutettavat hyödyt.....</b>	<b>32</b>
<b>7</b>	<b>Yhteenveto ja pohdinta .....</b>	<b>34</b>
	<b>Lähteet .....</b>	<b>36</b>

## Kuviot

Kuvio 1.	Kylmäkiertoprosessi (Hakala & Kaappola 2013, muokattu) .....	8
Kuvio 2.	Puolihermeettinen mäntäkompressori. (Kaappola ym. 2011, 51) .....	9
Kuvio 3.	Kylmäaineen tilapiirros (Kaappola, Hirvelä, Jokela & Kianta 2011, 17, muokattu) .....	15
Kuvio 4.	Teoreettinen kylmäprosessi log p, h -tilapiirroksessa. (Hakala & Kaappola 2013, 12.)	16
Kuvio 5.	Suora ja välillinen lauhdutus. (Kaappola ym. 2011, 77).....	21
Kuvio 6.	Kasvihuoneen lämpöhäviöt.....	25
Kuvio 7.	Kasvihuoneen lämpökuormat .....	26
Kuvio 8.	Kasvihuoneen lämpöhäviöiden ja -kuormien tehotase .....	28
Kuvio 9.	Kylmävaraston jäädytyksen lauhdeteho.....	29
Kuvio 10.	Kylmävaraston jäädytyksen tuottama lauhdeteho ja kasvihuoneen lämmitystehon tarve. .....	31
Kuvio 11.	Kaskadilämpöpumpun pääkomponentit.....	32

## Taulukot

Taulukko 1.	Kylmäaineiden jaottelu. (Kaappola ym. 2011.) .....	14
-------------	--	----

# 1 Johdanto

## 1.1 Opinnäytetyön tausta ja aiheen valinta

Energian hinnat ovat viimeisen vuoden aikana nousseet erityisen korkealle. Korkeat energianhinnat muodostavat yhä suuremman haasteen. Kohonneet hinnat näkyvät yrityksissä erilaisina energiansäästötoimenpiteinä. Kasvihuoneviljelyn ja kylmävarastoinnin energiankulutus on merkittävää, ja perinteiset energianlähteet ovat usein sekä kalliita että ympäristölle haitallisia. Tutkimalla mahdollisuuksia hyödyntää kylmävaraston jäädytyksestä syntyvää lauhde-energiaa ja sen siirtämistä kasvihuoneen lämmitykseen pyrimme tarjoamaan innovatiivisen lähestymistavan, joka voi tuoda konkreettista hyötyä sekä liiketoiminnallisesti että ympäristön kannalta. Opinnäytetyön tulokset voisivat tarjota arvokasta tietoa energiatehokkaiden käytäntöjen edistämiseksi vastuullisemman ja kestävämmän tulevaisuuden puolesta.

Tässä opinnäytetyössä keskityimme tutkimaan mahdollisuuksia hyödyntää kylmävaraston lauhde-energiaa kasvihuoneen lämmityksessä. Opinnäytetyön toimeksiantajana oli Osakeyhtiö lamit.fi. Tutkittavina kohteina opinnäytetyössä olivat kasvihuone ja kylmävarasto. Ihanteellisten olosuhteiden luominen ja ylläpitäminen kasvihuoneessa sekä kylmävarastossa vaativat runsaasti energiaa. Jäädytyksestä ja lämmityksestä tinkiminen ei kyseisissä kohteissa välttämättä ole kaikkina aikoina mahdollista. Siksi kaiken mahdollisen ns. hukkaenergian hyödyntäminen olisi näissä kohteissa erityisen tärkeää. Ylimääräisen lämpöenergian hyötykäyttö myös osaltaan edistäisi ilmastomuutoksen hidastamista. Vallitseva maailmantilanne ja energian korkea hinta olivat teemoina opinnäytetyön taustalla vahvasti läsnä.

## 1.2 Opinnäytetyön tavoitteet ja toteutus

Opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia uusia teknologisia ratkaisuja ja toimintatapoja kylmävaraston jäädyttämisestä syntyvän lauhde-energian hyödyntämiseen kasvihuoneen lämmityksessä. Tämä oli tarkoitus toteuttaa vertaamalla kasvihuoneen lämmitystarvetta sekä lämmitykseen hyödynnettävissä olevan lauhde-energian määrää eri ajankohtina. Työssä selvitettiin, kuinka suuri kasvihuone voidaan lämmittää tietyn kokoisen kylmävaraston jäädytyksestä syntyvällä lauhde-energialla. Tutkimuksen tuloksena luotiin taulukko, josta voidaan lukea lauhde-energian määrä sekä kasvihuoneen lämmityksentarve sekä niiden suhde toisiinsa. Tavoitteena oli tutkittavien kohteiden

energiatehokkuuksien parantaminen ja hukkaan menevän energian minimoiminen. Kasvihuoneen jäähdytystehon tarve ja jäähdytysmenetelmät rajattiin tämän opinnäytetyön ulkopuolelle. Tärkeimmät tutkimuskysymykset, joihin opinnäytetyössä haettiin vastauksia:

- Miten kylmävaraston jäähdytyksestä hyödynnettävän lauhdelämmön määrä ja kasvihuoneen lämmityksentarve kohtaavat pitkällä aikavälillä?
- Millaiset ovat uudella teknologialla saavutettavat hyödyt verrattuna perinteisiin ratkaisuihin?
- Minkälainen on uuden menetelmän teknistaloudellinen toteutettavuus?
- Mikä on kylmäaineiden merkitys prosessissa ja miten se on kehittynyt?
- Miksi Lamitin  $\text{SCOP}^{\text{®}}$ -menetelmää ei käytetä yleisemmin?

Opinnäytetyö oli tyypiltään yritysprojektityyppinen kehittämistyö. Työ oli luonteeltaan enimmäkseen määrällistä tutkimusta, mutta siinä käytettiin sekä laadullisen että määrällisen tutkimuksen menetelmiä. Kyseessä oli empiirinen tutkimus, eli tutkimus perustui todellisesta tutkimuskohteesta kerättyihin konkreettisiin havaintoihin ja mittauksiin (Kothari 2004, 4). Määrällisen eli kvantitatiivisen tutkimuksen piirteinä opinnäytetyön toteutus sisälsi paljon laskennallisia ja tilastollisia menetelmiä.

Opinnäytetyötä työstettiin työstämään yhteistyössä kahden muun samaan aiheeseen liittyviä opinnäytetöitä tekevien opiskelijoiden kanssa. Opinnäytetöissä hyödynnettiin toistemme keräämiä tietoja ja tuloksia. Opinnäytetöiden edistymistä seurattiin säännöllisillä etätapaamisilla. Tutkimuksen aineisto koostui valmiiksi olemassa olevasta aineistosta sekä uudesta, opinnäytetyön aikana kerätystä tiedosta. Opinnäytetyön teoriaosuuden aineistona käytettiin kirjallisia lähteitä, kuten tietokirjallisuutta, artikkeleita tai aiempia opinnäytetöitä. Aineiston käsittelyyn käytettiin tilastollisia menetelmiä, kuten Excel-taulukkolaskentaa. Aineiston analyysimenetelmänä käytettiin mm. korrelointia eli verrataan kahden jatkuvan muuttujan suhdetta toisiinsa.

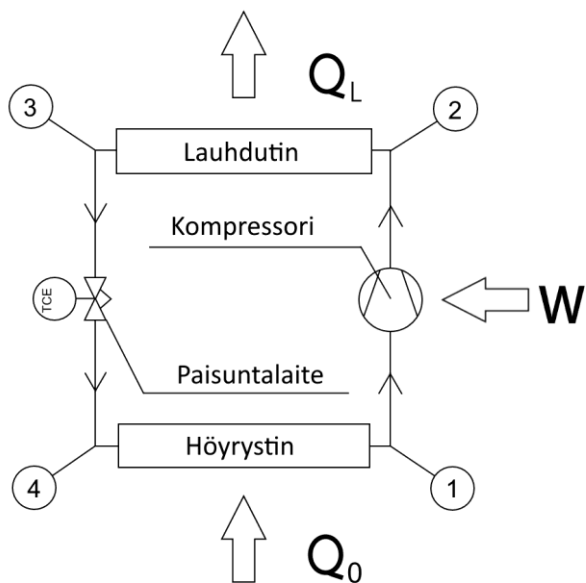
## 2 Kylmäteknikka

Kylmäteknikalla tarkoitetaan teknisiä ratkaisuja ja laitteita, joilla pyritään jäähdyttämään tila tai järjestelmä ympäristöään kylmempään lämpötilaan. Jäähdytys toteutetaan siirtämällä lämpöä mekaanisesti jäähdytettävästä tilasta pois esimerkiksi kompressoreilla varustettujen lämpöpumppujen avulla. Lämmön siirtäminen mekaanisesti vaatii yleensä runsaasti ulkopuolista energiaa kuten

sähköä. Kylmätekniiikan tyypillisiä soveltamiskohteita ovat muun muassa kylmävarastot ja jäähallit. (Aittomäki 2012)

## 2.1 Kylmälaitosprosessi ja komponentit

Kylmäjärjestelmiä on erilaisia, mutta kaikille kylmäkoneille ja lämpöpumpuille yhteisiä pääkomponentteja ovat kompressori, höyrystin, paisuntaventtiili ja lauhdutin. Kylmäkoneistot usein sisältävät muitakin komponentteja, kuten säätimiä, venttiilejä ja suodattimia, joilla pyritään ohjaamaan esimerkiksi kylmäaineen virtausta tai puhdistamaan kylmäaineeseen liuenneita epäpuhtauksia.



Kuvio 1. Kylmäkiertoprosessi (Hakala & Kaappola 2013, muokattu)

Kylmäaineen olomuodon muutokset kylmäprosessin eri vaiheissa on esitetty numeroituina kuviossa 1. Kylmäaine on vaiheessa 1 matalapaineista höyryä. Kompressorissa matalapaineinen kylmäainehöyry puristetaan korkeampaan paineeseen, jolloin kylmäaine myös tulistuu. Kohdasta 2 korkeapaineinen tulistettu höyry kulkee lauhduttimen läpi, jolloin kylmäaine lauhtuu nesteeksi lämpötilan laskiessa vakioaineessa. Kohdassa 3 kylmäaine on korkeapaineisena nesteenä. Paisuntalaitteen läpi kulkeutuessaan vaiheessa 3–4 kylmäaineen paine laskee, jolloin osa nesteestä höyrystyy. Kohdassa 4 kylmäaine on matalapaineisena neste-höyryseoksena. (Hakala & Kaappola 2013, 12.)

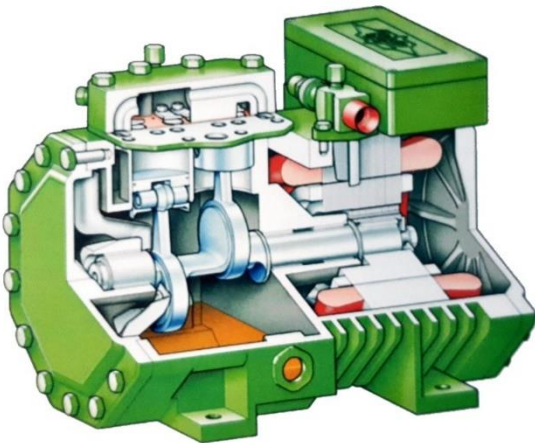


Kylmäkoneiden ja lämpöpumppujen suunnittelua ja rakennetta määritetään kylmlaitosstandardissa SFS-EN 378-2. Standardin EN 378-2 (2016) mukaan kylmlaitoksen komponentit tulee suunnitella, valmistaa ja asentaa tietyt turvallisuus- ja ympäristönsuojelunäkökulmat huomioiden. Standardissa määritellään vaatimukset myös kylmlaitosten testaukselle, käyttöönotolle ja dokumentoinnille. (SFS-EN 378-2 2016.)

### 2.1.1 Kompressorit

Kompressorin tehtävänä on ylläpitää laitoksen kylmäainekiertoa puristamalla matalapaineista kylmäainehöyryä korkeampaan paineeseen. Kylmäaine saadaan paine-eron seurauksena virtaamaan höyrystimeltä kompressorille. Kompressorin toisena tehtävänä on kylmäaineen lämpötilan nostaminen. Kokoon puristettaessa kylmäaineen lämpötila nousee. Kompressorityyppejä ovat mm. mäntä-, ruuvi-, scroll- ja rotaatiokompressorit (Hakala & Kaappola 2013, 71).

Kompressorit voidaan jakaa ulkoisen rakenteensa mukaan hermeettisiin, puolihhermeettisiin ja avokompressoreihin. Hermeettisessä kompressorissa sähkömoottoria ja kompressoria ympäröi tiivis kuori. Kuori on hitsattu umpeen, minkä seurauksena rikkoutunutta hermeettistä kompressoria on vaikea korjata. Hermeettisiä kompressoreja suositetaan muun muassa kodin kylmlaitteissa, ilmastoinnin jäähdytyskoneissa ja lämpöpumpuissa. Puolihhermeettisten kompressorien kuori on avattava, mikä helpottaa kompressorin huoltoa. Kuviossa 2 esitettynä puolihhermeettinen mäntäkompressorit. Avokompressorit saavat käyttövoimansa kuoren läpi työntyvän akselin välityksellä. (Kaappola, Hirvelä, Jokela & Kianta 2011, 50–51.)



Kuvio 2. Puolihhermeettinen mäntäkompressorit. (Kaappola ym. 2011, 51)

Kompressorin valintaan vaikuttavat mm. kylmlaitostyyppi, käyttökohde, käytettävä kylmäaine sekä höyrystymis- ja lauhtumislämpötilat. Kompressoreiden lukumäärällä voidaan vaikuttaa kompressointitehoon sekä kylmäjärjestelmän käyttövarmuuteen. (Hakala & Kaappola 2013, 73.)

### **2.1.2 Lauhdutin**

Kompressorilta korkeapaineinen ja korkealämpöinen kylmäainekaasu etenee lauhduttimelle. Lauhdutin on lämmönvaihdin, jossa korkeapaineinen ja korkealämpötilainen kylmäaine jäähdytetään ja muutetaan takaisin nestemäiseksi tilaksi. Kylmäaineen olomuodonmuutoksessa vapautuu paljon lämpöä. Lauhduttimen vastaanottama lämpöenergia siirretään jäähdytettävästä tilasta pois ja vapautetaan ympäristöön. (Kaappola ym. 2011, 54.)

Lauhduttimen jäähdytys voidaan toteuttaa ilman tai jäähdyttävän nesteen avulla. Ilmajäähdytteiset järjestelmät ovat edullisempia, mutta suuret puhaltimet vievät paljon tilaa ja ovat usein äänekkäitä. Nestejäähdytteiset lauhduttimet voivat olla tyypiltään moniputki- tai levylämmönsiirrinlauhduttimia. Nestejäähdytteiset lauhduttimet mahdollistavat lauhdelaämmön monipuolisen hyödyntämisen. (Mts. 54.)

### **2.1.3 Paisuntaventtiili**

Paisuntaventtiili on kapea venttiili, joka sijaitsee lauhduttimen ja höyrystimen välissä kylmäjärjestelmän piirissä. Paisuntaventtiilin läpi kulkeutuessaan kylmäaineen paine laskee äkillisesti, jolloin myös sen lämpötila laskee. Paisuntaventtiilin tehtävänä on valmistella kylmäaine höyrystysvaihetta varten. Paisuntaventtiilit voivat olla tyypiltään termostaattisia tai elektronisia. Termostaattinen paisuntaventtiili säätelee höyrystimelle virtaavan kylmäaineen määrää. Paisuntaventtiiliä ohjaa kompressorin imupuolella sijaitseva tuntoelin. Paineen ja lämpötilan noustessa tuntoelimestä paisuntaventtiili avautuu ja höyrystimelle virtaa enemmän nestettä. (Mts. 56.)

### **2.1.4 Höyrystin**

Höyrystin on toinen lämmönvaihdin, jossa kylmäaine ottaa lämpöä ympäröivästä tilasta, esimerkiksi ilmasta tai vedestä. Kylmäaineen lämpötila nousee, jolloin se höyrystyy ja muuttuu kaasuksi.

Höyrystynyt kylmäaine syötetään takaisin kompressoriin. Kaasu palaa kompressoriin, missä se puristetaan jälleen korkeapaineiseksi ja korkealämpöiseksi kaasuksi aloittaen kylmäainesyklin uudelleen.

Ilmaa jäähdyttävät höyrystimet voivat olla luonnollisen ilmankierron höyrystimiä tai puhallinhöyrystimiä. Kylmävarastoissa käytetään usein luonnollisen ilmankierron höyrystimiä. Niissä ilma kulkeutuu höyrystimen läpi painovoiman vaikutuksesta. Höyrystimen läpi kulkiessaan ilman lämpötila laskee. Jäähtynyt ilma on ympäröivää ilmaa tiheämpää, jolloin se vajoaa ja saa aikaan ilman kiertämisen jäähdytettävässä tilassa. (Kaappola ym. 2011, 58.)

## 2.2 Kylmäaineet

Kylmäaineiden tärkeimpiin ominaisuuksiin kuuluu alhainen höyrystymislämpötila. Ilmalämpöpumpuissa ja muissa kylmlaitteissa on perinteisesti käytetty kylmäaineina erilaisia halogeenihiilivetyjä. Klooria ja fluoria sisältävillä CFC-yhdisteillä on ilmakehän otsonikerrosta tuhoava vaikutus. Nykyisin otsonikerrosta vahingoittavien aineiden käyttöä on rajoitettu. Otsonikerroksen oheneminen eli otsonikato lisää ilmakehän läpi maahan pääsevän UV-B säteilyn määrää. Voimistunut UV-säteily voi aiheuttaa merkittäviä terveyshaittoja maapallon eliöille. (Mts. 108)

HCFC-yhdisteet ovat osittain halogenoituja hiilivetyjä, joita on myös käytetty aiemmin kylmäaineina. HCFC-yhdisteet ovat CFC-yhdisteiden tapaan haitallisia otsonikerrokselle ja niiden käyttö päättyy YK:n ympäristöohjelman UNEP:n mukaan vuonna 2029. CFC-yhdisteiden käyttö on ollut EU-maissa kiellettyä vuodesta 2001. (Mts. 109)

CFC-yhdisteistä luopumisen jälkeen kylmlaitteissa on käytetty HFC-yhdisteitä. HFC-aineet eivät sisällä klooria eivätkä siten vaurioita otsonikerrosta, mutta ovat hyvin voimakkaita kasvihuonekaasuja. HFC-yhdisteiden karkaaminen ilmakehään edistää ilmaston lämpenemistä (Laitinen 2013, 60). Myös HFC-yhdisteiden käyttöä EU-maissa on vuodesta 2015 alkaen rajoitettu F-kaasuasetuksella. Sen tavoitteena on vähentää fluorihiihivetyjen käyttöä portaittain vuoteen 2030 asti (Euroopan unionin F-kaasuasetus 2020).

Ilmastolle haitallisten halogeenihiilivetyjen jälkeen kylmälaitteissa on alettu suosia ns. luonnollisia kylmäaineita. Luonnollisia kylmäaineita ovat mm. ammoniakki, hiilidioksidi sekä halogenoimattomat hiilivedyt. (Aittomäki 2012, 116)

## 2.3 Kylmäaineiden jaottelu

Kylmäaineet voidaan jaotella niiden höyrystymis- ja lauhtumiskäyttäytymisen sekä kemiallisen koostumuksen mukaan. Kylmäaineet voidaan jakaa yksikomponenttisiin kylmäaineisiin ja kylmäaineseoksiin. Yksikomponenttiset kylmäaineet koostuvat vain yhdestä aineesta ja niiden höyrystyminen ja lauhtuminen tapahtuvat vakioämpötilassa. Atseotrooppiset kylmäaineet ovat kahden tai useamman kylmäaineen seoksia ja niiden höyrystyminen ja lauhtuminen tapahtuvat niin ikään vakioämpötilassa. Tseotrooppiset kylmäaineet ovat puolestaan kylmäaineseoksia, joiden lämpötila muuttuu höyrystymisen ja lauhtumisen aikana. Tätä lämpötilan muutosta kutsutaan lämpötilaliukumaksi. Lämpötilaliukuma on seurausta tseotrooppisen kylmäaineen komponenttien erisuuruisista höyrystymislämpötiloista. (Kaappola ym. 2011, 32.)

Yksikomponenttiset kylmäaineet voidaan ryhmitellä kemiallisen koostumuksensa mukaan sen perusteella, mistä hiilivedystä ne on johdettu. Näitä ryhmiä ovat: metaaniryhmä, etaaniryhmä, propaniryhmä sekä eteeniryhmä. Näiden lisäksi kylmäaineet voidaan jakaa sekalaisiin orgaanisiin yhdisteisiin, orgaanisiin rengasyhdisteisiin ja epäorgaanisiin yhdisteisiin. (Mts. 33.)

Luonnonmukaiset kylmäaineet ovat kylmäaineita, jotka eivät sisällä lainkaan halogeenimolekyyliä. Nimityksellä ”luonnonmukaiset kylmäaineet” viitataan siihen, että kyseisiä aineita esiintyy sellaisenaan luonnossa, eivätkä ne ole otsonikerrokselle haitallisia. Luonnonmukaiset kylmäaineet voidaan jaotella HC-kylmäaineisiin, eli puhtaisiin hiilivetyihin, sekä puhtaisiin epäorgaanisiin yhdisteisiin. (Mts. 34.)

## 2.4 Kylmäaineiden ominaisuudet

### 2.4.1 Termodynaamiset ominaisuudet

Kylmäaineita käytetään kylmälaitoksissa lämmönsiirron väliaineena. Hyödyllisiä kylmäaineiden termodynaamisia ominaisuuksia ovat mm. alhainen kiehumispiste, korkea höyrystymislämpö, pieni

viskositeetti, suuri tilavuustuotto sekä hyvät lämmönsiirto-ominaisuudet (Fellows 2022, 551). Alhainen kiehumispiste mahdollistaa kylmäaineen höyrystämisen hyvinkin matalissa lämpötiloissa. Korkea höyrystymislämpö lisää höyrystyneen kylmäaineen sitoman lämpöenergian määrää. Tämän seurauksena kylmäainetta tarvitaan järjestelmässä vähemmän, mikä pienentää kylmäainekustannuksia. Laitokseen riittää pienempi kompressorin ja voidaan käyttää pienempää putkikokoa. (Kaappola ym. 2011, 31.)

Höyryn suuri tilavuustuotto vaikuttaa kylmäjärjestelmän kompressorissa tarvittavaan paineeseen. Järjestelmässä voidaan käyttää pienempää kompressorin, kun kylmäaineen tilavuustuotto on suuri. Pieni viskositeetti vähentää painehäviöitä venttiileissä ja putkistoissa. Riittävän suuri höyrystymispaine ehkäisee ilman tai kosteuden vuotamista järjestelmän sisään. Liian suuri paine kuitenkin lisää laitteiston lujuusvaatimuksia. Hyvien lämmönsiirto-ominaisuuksien ansiosta lämmönsiirtimiltä vaaditaan pienempi pinta-ala. (Mts. 31.)

#### **2.4.2 Kemiaalliset ja fysiologiset ominaisuudet**

Merkittäviä kylmäaineen kemiallisia ja fysiologisia ominaisuuksia ovat mm. stabiilius, palamattomuus, myrkyttömyys sekä liukenevuus öljyyn. Kylmäaineiden tulee myös olla edullisia ja ympäristöystävällisiä. Kylmäaineiden yhteydessä ympäristöystävällisyydellä tarkoitetaan yleensä niiden haitattomuutta ilmakehän otsonikerrokselle ja vähäistä vaikutusta kasvihuoneilmaston voimistumiseen. (Kaappola ym. 2011, 31–32.)

ODP-luku (eng. Ozone Depletion Potential) kertoo kylmäaineen suhteellisen otsonihaitallisuuden. Vertailulukuna käytetään kylmäainetta R11, jonka ODP-luku on 1. GWP-luvulla (eng. Global Warming Potential) ilmaistaan kylmäaineen kasvihuonehaitallisuutta. Vertailuarvona käytetään hiilidioksidia, jonka GWP-luku on 1. GWP-luku ilmoitetaan yleensä 100 vuoden ajalle. Korkeat ODP- ja GWP-luvut kertovat kylmäaineen haitallisuudesta ilmakehälle, mikäli se pääsee vuotamaan ympäristöön. (Kaappola ym. 2011, 32.)

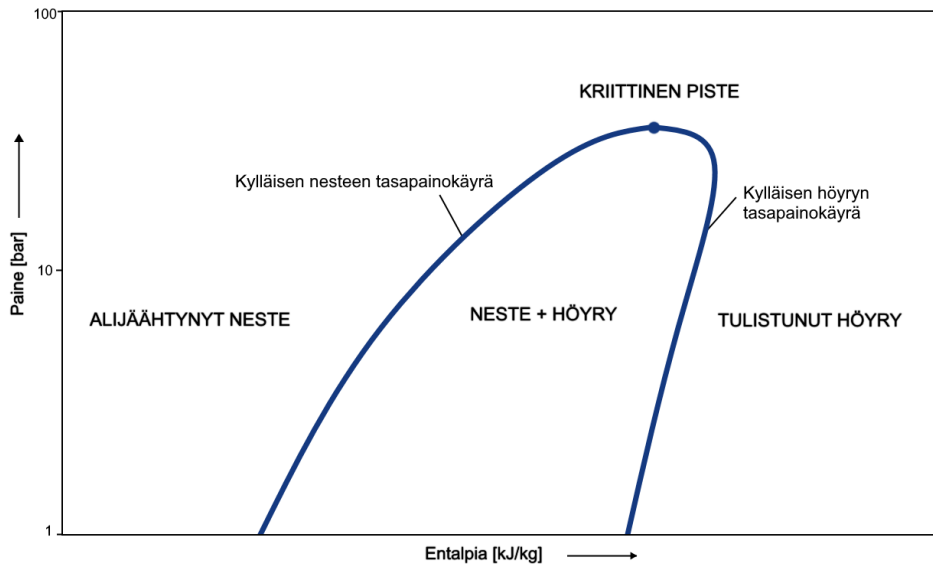
Kylmäaine	Kemiallinen koostumus	GWP	Turvaryhmä
<b>HFC-kylmäaineet</b>			
<i>Yksikomponenttiset</i>			
R32	CH <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	677	A2L
R125	CF <sub>3</sub> CHF <sub>2</sub>	3170	A1
R134a	CF <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> F	1300	A1
R143a	CF <sub>3</sub> CH <sub>3</sub>	4800	A2L
R152a	CHF <sub>2</sub> CH <sub>3</sub>	138	A2
<i>Atseotrooppiset</i>			
R507	R125 / R143a 50 % / 50 %	3990	A1
<i>Tseotrooppiset</i>			
R404A	R125 / R143a / R34a 44 % / 52 % / 4 %	3940	A1
R407C	R32 / R125 / R134a 23 % / 25 % / 52 %	1620	A1
R410A	R32 / R125 50 % / 50 %	1920	A1
<b>HFO-kylmäaineet</b>			
R1234yf	CF <sub>3</sub> CF=CH <sub>2</sub>	< 1	A2L
R1234ze(E)	CF <sub>3</sub> CH=CHF	< 1	A2L
<b>HFC-HFO-kylmäaineet</b>			
<i>Atseotrooppiset</i>			
R513A	R1234yf / R134a 56 % / 44 %	573	A1
<i>Tseotrooppiset</i>			
R448A	R32 / R125 / R1234yf / R1234ze(E) / R134a 26 % / 26 % / 20 % / 7 % / 21 %	1273	A1
R449A	R32 / R125 / R1234yf / R134a 24,3 % / 24,7 % / 25,3 % / 25,7 %	1282	A1
R454B	R32 / R1234yf 68,9 % / 31,1 %	467	A2L
<b>HC-kylmäaineet</b>			
R290 Propani	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0	A3
R1270 Propeeni	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	0	A3
<b>Sekalaiset orgaaniset kylmäaineet</b>			
R600a Isobutaani	CH(CH <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>	0	A3
<b>Epäorgaaniset kylmäaineet</b>			
R717 Ammoniakki	NH <sub>3</sub>	0	B2L
R744 Hiilidioksidi	CO <sub>2</sub>	1	A1

Taulukko 1. Kylmäaineiden jaottelu. (Kaappola ym. 2011.)

### 2.4.3 Log p, h -tilapiirros

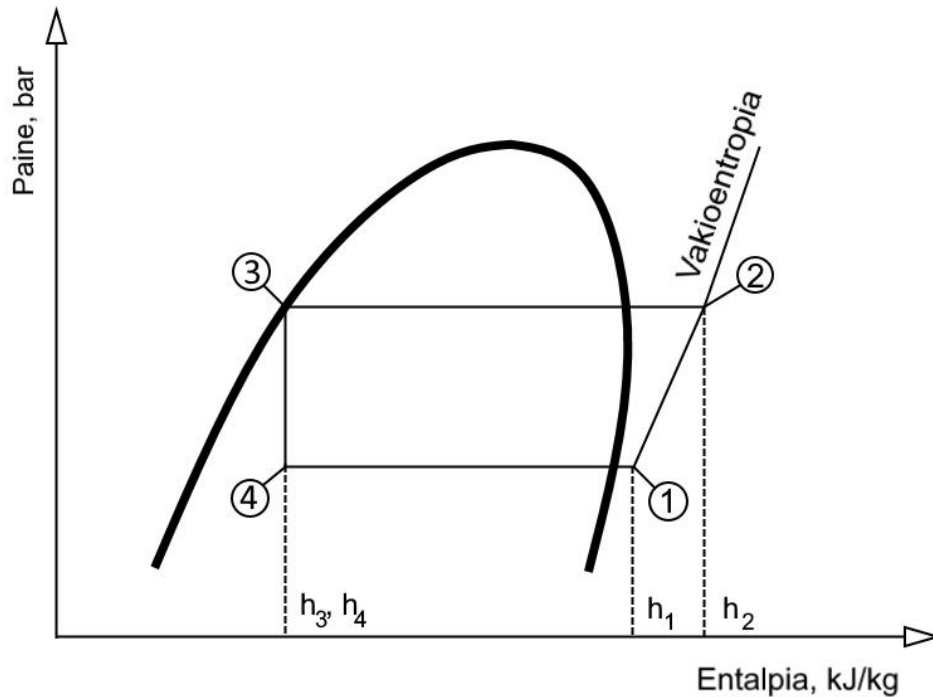
Kylmäaineen logaritminen paine-entalpia-tilapiirros antaa kuvan kylmäaineen olomuodon muutok-  
sista kylmäkierrrossa. Piirroksessa esitetty kylmäaineen entalpien ja absoluuttisen paineen arvot.  
Jokaisen kylmäaineen tilapiirroksiset poikkeavat toisistaan, sillä kaikilla kylmäaineilla on eri ominai-  
suudet. Yksinkertaistettu log p, h -tilapiirros on esitetty kuviossa 3. Kuviossa 3 esitetyt kylläisen  
nesteen ja kylläisen höyryn tasapainokäyrät rajaavat kylmäaineen eri olomuotoihin. Kylläisen nes-

teen tasapainokäyrän vasemmalla puolella kylmäaine on alijäähtyneenä nesteenä ja kylläisen höyryn tasapainokäyrän oikealla puolella kylmäaine on tulistunutta höyryä. Tasapainokäyrien välissä olevalla alueella kylmäaine on kylläisenä neste-höyry-seoksena. Kuvaajan huipulla sijaitsevan kriittisen pisteen yläpuolella kylmäainehöyry ei nesteydy. (Hakala & Kaappola 2013, 11.)



Kuvio 3. Kylmäaineen tilapiirros (Kaappola, Hirvelä, Jokela & Kianta 2011, 17, muokattu)

Kylläisen nesteen ja kylläisen höyryn tasapainokäyrien lisäksi log p, h -tilapiirroksessa voidaan esittää muita käyriä, kuten vakiolämpötilan, vakiopaineen, vakiotiheyden sekä vakioentropian käyrät, joiden avulla kylmäteknistä prosessia voidaan ymmärtää tarkemmin. (Kaappola ym. 2011, 17.)



Kuvio 4. Teoreettinen kylmäprosessi log p, h -tilapiirroksessa. (Hakala & Kaappola 2013, 12.)

Kuviossa 4 on esitetty teoreettinen kylmäprosessi yksinkertaistettuna log p, h -tilapiirroksessa. Teoreettisella kylmäprosessilla tarkoitetaan prosessia, jossa ei ole otettu huomioon lämpö- tai painehäviöitä. Todellisuudessa painehäviöitä tapahtuu kompressorissa ja höyrystimessä. Lämpöhäviöitä tapahtuu putkiston ja ympäristön välillä vaiheessa 4–1. (Mts. 12.)

## 2.5 Kylmäkoneöljyt

Öljyä tarvitaan kylmäkoneissa kompressorin voiteluun. Kompressorin sisältää paljon liikkuvia osia ja tarvitsee voiteluainetta toimiakseen mahdollisimman kitkattomasti. Huonosti voideltuna kompressorin kuumenee ja menee helposti rikki. Öljyllä voidaan vähentää myös kompressorin aiheuttamaa melua sekä kompressorin sisäisiä kylmäainevuotoja. (Kaappola ym. 2011, 32.)

Osa voiteluöljystä ajautuu kylmäaineen mukana kylmälaitoksen putkikiertoon. Hyvin pienellä määrällä öljyä voi olla positiivinen vaikutus kylmäaineen lämmönsiirto-ominaisuuksiin. Öljyn päätyminen kylmäainekiertoon ei silti yleensä ole toivottua, sillä haittavaikutukset lisääntyvät nopeasti öljypitoisuuden kasvaessa. Kylmälaitos suunnitellaan siten, että öljyä pääsisi karkaamaan



putkikiertoon mahdollisimman vähän ja, että karannut öljy pääsee kiertämään putkiston läpi takaisin kompressorille. (Hakala & Kaappola 2013, 29.)

Eri öljyalaadut soveltuvat parhaiten tietynlaisten kylmäaineiden kanssa käytettäväksi. Kaappolan, Hirvelän, Jokelan ja Kiannan (2011) mukaan, öljyn liukeneminen kylmäaineeseen edesauttaa öljyn palauttamista kompressorille. HCFC-laitoksiin soveltuvat käytettäväksi mineraaliöljyt, synteettiset ja puolisynteettiset öljyt. Mineraaliöljyt sopivat erityisesti matalien lämpötilojen HCFC-laitoksiin. Mineraaliöljyjen voiteluominaisuudet heikkenevät korkeissa lämpötiloissa öljyn viskositeetin kasvessa. Alkyylibentseenipohjaiset synteettiset öljyt soveltuvat vaativampiin HCFC-laitoksiin. Puolisynteettiset öljyt ovat mineraaliöljyjen ja synteettisten öljyjen sekoituksia. (Kaappola ym. 2011, 44.)

Edellä mainitut öljytyypit eivät sovellu HFC-kylmälaitoksiin, sillä ne eivät lainkaan sekoitu HFC-kylmäaineiden kanssa. HFC-kylmäaineiden kanssa käytetään polyoliesteriöljyjä. Ne sekoittuvat HFC-kylmäaineisiin osittain, joten niiden palauttaminen kylmäainekierrosta takaisin kompressorille onnistuu. (Mts. 44.)

## 2.6 Lämpöpumppu

Lämpöpumpun toiminta perustuu laitteessa kiertävän kylmäaineen olomuodon muutokseen. Höyrystyessään kylmäaine sitoo itseensä lämpöä ja tiivistyessään nesteeksi puolestaan vapauttaa lämpöä. Kylmäaine höyrystetään lämpöpumppuun johdetun ulkoilmaan sitoutuneen lämmön avulla höyrystimessä. (Laitinen 2013)

Lämpöpumput ovat monipuolinen lämmitysmuoto, ja ne voivat käyttää lämmönlähteinään ulkoilmaa, maaperää, vettä tai rakennusten poistoilman hukkalämpö. Lämmön käyttökohteena voi olla neste tai ilma. Lämpöpumppuja voidaan käyttää lämmityksen sijasta myös jäähdytykseen, jolloin järjestelmän toiminta on lämmitysprosessiin nähden päinvastainen. (Perälä & Perälä 2013, 27)

COP-arvo (Coefficient Of Performance) on niin sanottu lämpöpumpun lämpökerroin eli energiatehokkuuskerroin. Käytännössä se kertoo, paljonko sähköenergiaa lämpöpumppu vaatii tuotettua lämpöyksikköä kohden. COP-arvon ollessa esimerkiksi 2, tuottaa lämpöpumppu yhtä kilowattituntia sähköä kohden kaksi kilowattituntia lämpöenergiaa. (Mts. 55.)

## 2.7 Lämpöpumpun lämpökerroin

Ilmalämpöpumpun lämpökerroin riippuu merkittävästi olosuhteista ja lämmityksentarpeesta. Hyötysuhde on heikoimmillaan talvisin, kun ulkoilmasta saatavan lämpöenergian määrä on pieni ja sisätilojen lämmityksen tarve on suurin. Jäähdytyskäytössä lämpöpumpun COP-arvosta käytetään lämpökertoimen sijaan nimitystä kylmäkerroin. (Mts. 55)

Tarkemman kuvan lämpöpumpun tehokkuudesta antaa SCOP-arvo (Seasonal Coefficient Of Performance), joka kertoo lämpöpumpun lämpökertoimen vuositasolla mitattaessa. SCOP-arvokin riippuu kuitenkin siitä, minkälaisessa ilmastossa se on mitattu. Täysin toisenlaisissa käyttöolosuhteissa lämpöpumpun ilmoitettu SCOP-arvo ei välttämättä pädekään. (Suutari N.d.)

Tyypillinen lämpöpumpun vuosilämpökerroin Pohjois-Euroopassa on noin 3,5–5. Siinä missä ilma-  
lämpöpumpun lämpökerroin vaihtelee paljonkin ulkoilman lämpötilan mukaan, maalämpöpumpun lämpökerroin pysyy vakaampana ympäri vuoden, sillä maaperän lämpötila vaihtelee vuoden aikana huomattavasti vähemmän. Käytännössä lämpöpumpun lämpökerroin on parhaimmillaan, kun lämpötilaero lämmönlähteen ja lämmitettävän kohteen välillä on pieni. Lämpöpumpun lämpökerrointa on mahdollista parantaa oikeanlaisella suunnittelulla (Perälä & Perälä 2013). Esimerkiksi oikeanlaisen kylmäaineen valinnalla voidaan vaikuttaa lämpöpumpun hyötysuhteeseen.

### 2.7.1 Lauhdelämpöpumppu

Lauhdelämpöpumput käyttävät lämmönlähteenään jäähdytysprosessista syntynyttä lauhdelämpöä. Lauhdelämpöpumppujen energiatehokas käyttö edellyttää jatkuvaa ja riittävän suurta lauhdelämmön lähdettä. Samaan aikaan lämmitettävän kohteen ympärivuotisen lämmöntarpeen tulee olla riittävän suuri. Lämmön talteenotto tulee suunnitella siten, ettei se vaaranna kylmälaitoksen toimintavarmuutta. (Hakala & Kaappola 2013, 218.)

Lauhdelämpöpumppujärjestelmiä on alettu hyödyntämään esimerkiksi jäähalleissa. Lauhdelämpöä sisätilojen lämmityksessä hyödyntäviä jäähalleja on rakennettu ainakin Mäntsälään, Äänekoskelle sekä Helsingin Pirkkolaan. Uusien energiatehokkaiden jäähallien rakennuskustannukset ovat olleet merkittäviä.

## 2.8 Lamit \$COP

\$COP® on Lamitin rekisteröimä tuotemerkki, ja se viittaa järjestelmän taloudelliseen tuottokertoimeen vuoden aikana verrattuna aiempaan tilanteeseen. Tämä konsepti kattaa Lamit-järjestelmän, jossa on optimoitu energiankäyttö, -tuotto ja energian hankinta silloin, kun se on taloudellisesti edullisinta. \$COP® voidaan soveltaa erikokoisiin kohteisiin, kuten pienemmät taloyhtiöt, teollisuus ja kaupat. Lisäksi ratkaisu voidaan integroida energialaitokseen ja kaupunkitasolla hallittavaksi kokonaisuudeksi. (Lamit \$COP® N.d.)

\$COP®-ratkaisuun liittyy olennaisesti LamitBOX®, täydentävänä osana LamiTES®-faasimuutosvaraaja sekä Lamitin pilvijärjestelmä, jossa suoritetaan varsinaista laskentaa ja optimointia. LamitBOX® toimii järjestelmässä mittaus- ja ohjauskeskuksena. Järjestelmä optimoi lämmitys- ja säätöprosessit huipputehon rajoituksilla, langattomilla antureilla sekä energiavarastoinnilla. LamiTES®-faasimuutosvaraaja lisää järjestelmälle energianvarastointikapasiteettia, jotta voidaan hyödyntää täysimääräisesti edullisempia energian hetkiä. LamitBOX yhdistää nämä tiedot pilvipalveluunsa, jossa lasketaan optimaaliset ajankohdat energian käytölle. (Lamit \$COP® N.d.)

\$COP-järjestelmä lukee tietoja Nordpoolista sähkön hetkellisestä hinnasta ja vastaavasti paikallisen kaukolämmön hinnasta. Lisäksi järjestelmään voidaan syöttää tietoja, kuten vuorojärjestykset tai lomakalenterit. Järjestelmä voi myös mitata kosteutta, hiilidioksidipitoisuuksia tai paikallaolotietoa ilmastoinnin optimaalisen ohjauksen varmistamiseksi. Sääennusteen tietoja käytetään laskennassa, jonka avulla voidaan varata oikea määrä edullista energiaa. Järjestelmä valitsee aina edullisimman energianlähteen hinnan perusteella ja optimoi sen tarpeen. (Lamit \$COP® N.d.)

Keskimääräisessä maalämpöpumpulla varustetussa taloyhtiössä \$COP paransi maalämmön vuosihyötysuhdetta verrattuna alkuperäiseen SCOP-arvoon 3.7, saavuttaen \$COP 5.1. Suuremmissa kohteissa hyödyt voivat olla vielä suuremmat. \$COP-järjestelmät ovat teknisesti edistyksellisiä, mikä heijastuu myös niiden toteuttamisesta myönnettäviin, suurimman mahdollisen tukiprosentin valtioneuvoston tukien kautta. (Lamit \$COP® N.d.)

## 2.9 Lauhdutus

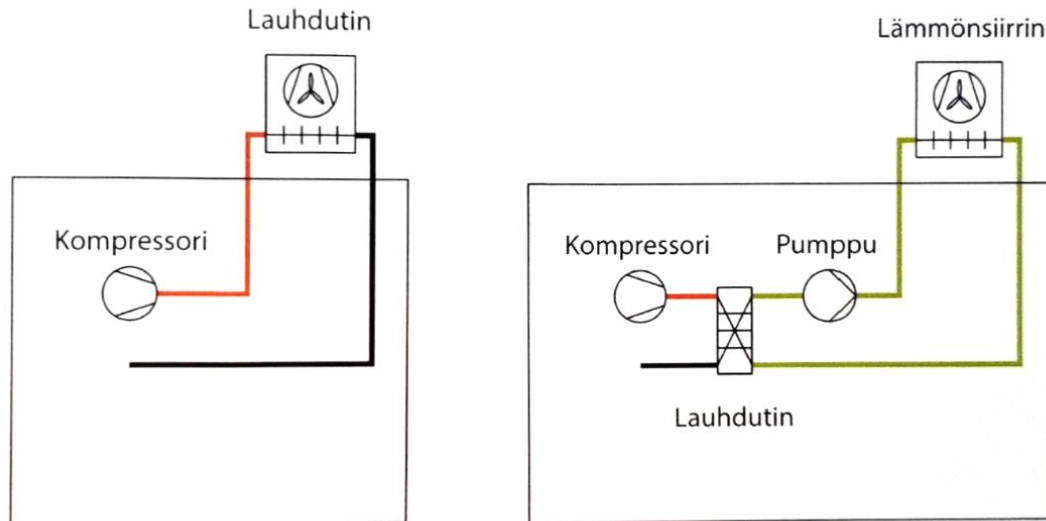
### 2.9.1 Lauhdelämmön hyödyntäminen

Lauhdelämmön hyödyntämisellä tarkoitetaan viilennettävän tilan jäähdytysprosessista syntyvän hukkalämmön hyötykäyttöä esimerkiksi toisen tilan tai lämpimän käyttöveden lämmityksessä. Ympäristöystävällisen lauhde-energian hyödyntäminen on ilmastonmuutoksen sekä kohonneiden energianhintojen myötä tullut entistä tärkeämmäksi. Kylmlaitteistojen hukkalämpöä on tehokkaimmin hyödynnetty elintarvikemyymälöissä, joissa kylmätilojen jäähdytyksen tarve sekä myymälän lämmityksen tarve kohtaavat vuoden ympäri kohtuullisen hyvin (Hakala & Kaapola 2013 s. 224).

Kylmätekniikassa lauhtumisella tarkoitetaan kaasumaisen kylmäaineen jäähdyttämistä nestemäiseen olomuotoon. Lauhtuessaan kylmäaine vapauttaa lämpöenergiaa. Lauhdelämmön hyödyntämisen ongelmana on sen matala lämpötila (Mts. 217). Lauhdelämmön talteenottoa voidaan tehostaa lämpöpumppujen avulla. Lämpöpumppuinvestoinnin kannattavuus riippuu riittävän suuresta ja tasaisesta hukkalämmönlähteestä sekä samanaikaisesta lämmityksen tarpeesta (Kaupan kylmlaitteiden ja -järjestelmien lauhdelämmön talteenotto 2012). Lauhdelämmön hyödynnettävyyteen vaikuttaa myös käytetyn kylmäaineen ominaisuudet (Aittomäki s. 208).

### 2.9.2 Lauhdutusmenetelmät

Lauhdutusmenetelmiä ovat suora ja välillinen lauhdutus. Suorassa lauhdutuksessa lauhtumislämpö siirretään suoraan ilmaan tai muuhun lämmitettävään aineeseen. Välillisessä järjestelmässä lauhdelämpö siirretään nestepiiriin. Nestepiirissä kiertää väliainetta, josta lämpö siirretään lämmönvaihtimen kautta lämmitettävään aineeseen. (Kaappola ym. 2011, 77.)



Kuvio 5. Suora ja välillinen lauhdutus. (Kaappola ym. 2011, 77)

Pienemmissä yksiköissä suositaan suoraa lauhdutusta ja suuremmissa välillistä lauhdutusjärjestelmää. Välillisen lauhdutuksen etuina ovat pienempi kylmäainetäyttö sekä lauhdutuslämmön helpompi ja tarkempi jakaminen eri käyttötarkoituksiin (Hakala & Kaappola 2013, 224).

### 3 Kasvihuone

#### 3.1 Kasvihuoneviljely

Kasvihuonekasvatuksen etuna perinteiseen peltokasvatukseen verrattuna on mahdollisuus kontrolloida kasvuolosuhteita. Kasvihuoneissa voidaan ympäri vuoden kasvattaa hyötykasveja, jotka eivät menestyisi Suomen luonnossa. Lämpötilaa voidaan säädellä lämmittämällä tai jäähdyttämällä sisäilmaa ja ilmanvaihtoa tehostaa erilaisilla tuulettimilla. Pimeinä vuodenaikoina kasvien tarvitsemaa valoa pyritään lisäämään keinotekoisella valaistuksella. Myös ilmankosteutta sekä hiilidioksidipitoisuutta on mahdollista säätää kasvihuoneissa kasveille sopiviksi. Kasvuolosuhteiden optimoinnilla pyritään olennaisesti tuottamaan mahdollisimman runsas sato. (Veikkolainen 2021, 6.)

Kasvihuoneyrityksissä on tyypillisesti käytössä useita eri lämmitysjärjestelmiä- ja menetelmiä. Tuotantokasvit voivat olla hyvinkin herkkiä lämpötilojen muutoksille, joten mahdollisuus vaihtaa nopeasti lämmitysmenetelmästä toiseen on sopivien kasvuolosuhteiden ylläpitämiseksi tärkeää. Kasvihuoneissa lämmitystä tarvitaan usein myös kasteluvien lämmitykseen. Kasteluvien lämmitys

toteutetaan usein aurinkokeräimillä (Hiltunen, Ahvenharju, Hagström & Vanhanen 2005, 10). Vedenkulutuksen määrä kasvihuoneissa riippuu lämpötilasta, valaistuksesta ja kasvien kasvuvaiheesta.

Jäähdytyksen tarve kasvihuoneissa on lisääntynyt ilmastonmuutoksen myötä (Mts. 3). Liian korkea lämpötila kasvihuoneissa lisää kasteluedenkulutusta ja johtaa epätasaiseen kasvuun. Jäähdytys voidaan toteuttaa kasvihuonetta tuulettamalla, jossa haittana on hiilidioksidin karkaaminen ulkoilmaan. Hiilidioksidipitoisuuden aleneminen vähentää kasvien yhteyttämiskykyä ja heikentää sadon muodostumista. (Kaukoranta & Näkkilä 2010, 2.)

### **3.2 Kasvihuoneviljelyn energiankulutus**

Vuonna 2022 Suomessa toimi yhteensä 784 kasvihuonetuotannon yritystä. Kasvihuoneviljelyn yhteispinta-ala oli 362 hehtaaria. Luonnonvarakeskus Luken toteuttaman selvityksen mukaan kasvihuoneyritysten kokonaisenergiankulutus vuonna 2021 oli 1706 GWh. Sähkönkulutuksen osuus kokonaisenergiankulutuksesta oli 619 GWh. Sähkönkulutus kasvihuoneyrityksissä on viime vuosina ollut kasvussa samalla kun kevyen polttoöljyn käyttöä on pyritty vähentämään. (Jaakkonen 2022.)

Vuonna 2022 kohonneet sähköhinnat vaikuttivat kasvihuonevihannesten tuotantoon. Erityisesti vihannesten talvikasvatus lisäsi tuotantokustannuksia merkittävästi, ja monet yritykset luopuivat talvituotannosta kokonaan. Jaakkonen (2023) toteaa, että energiansäästötoimenpiteiden myötä luonnonvalon hyödyntäminen kasvihuoneiden valaistuksessa tulee entistä tärkeämmäksi.

## **4 Kylmävarasto**

### **4.1 Kylmävaraston energiankulutus**

Kylmävaraston energiankulutus riippuu suuresti sen koosta, käyttötarkoituksesta ja sijainnista. Jäähdytystehontarve vaihtelevat merkittävästi sen mukaan, mitä tuotteita varastoidaan. Eri tuotteet edellyttävät erilaisia lämpötiloja, ja näiden vaatimusten täyttäminen vaikuttaa suoraan jäähdytystehon tarpeeseen. Pakastetuotteiden varastointi edellyttää erittäin alhaisia lämpötiloja, yleensä noin -18 °C tai jopa kylmempiä. (Rentola 2014.)

Kylmävarastojen käyttötarkoitus voi myös vaikuttaa energiankulutukseen. Esimerkiksi kylmävarasto, jossa säilytetään jatkuvasti sisään- ja ulosvirtaavia tuotteita, saattaa vaatia enemmän jäähdytystehoa kuin varasto, jossa säilytetään samoja tuotteita pidempiä aikoja. Lämpökuormia kylmävarastolle aiheutuu jäähdytettävät tuotteet, tilassa työskentelevät ihmiset sekä varastossa työskentelevien ihmisten tarvitsema valaistus. Lämpökuormat lisäävät jäähdytystehon tarvetta.

## 4.2 Jäähdytyksen hukkalämpö

Kylmävaraston jäähdytyksen aiheuttama hukkalämpö on arvokas sivutuote, joka voidaan hyödyntää lämmityksessä. Kylmävarastoissa hukkalämpöä syntyy, kun kylmävaraston jäähdytysjärjestelmä poistaa lämpöä varastotiloista ja siirtää sen ulkoiseen ympäristöön. Usein ylimääräistä lämpöenergiaa ei käytetä hyödyksi, vaan se vapautetaan poistoilman mukana ympäristöön. (Moilanen 2020.)

Yksi tehokkaimmista tavoista hyödyntää kylmävaraston hukkalämpöä on käyttää sitä samassa kiinteistössä olevien tilojen, kuten toimistojen, pukuhuoneiden tai huoltotilojen, lämmitykseen. Hukkalämpö voidaan siirtää suoraan näihin tiloihin, mikä vähentää tarvetta erillisille lämmitysjärjestelmille ja energian välivarastoinnille. Kylmävaraston hukkalämpöä voidaan hyödyntää myös esimerkiksi lämpimän käyttöveden lämmityksessä. (Tynjälä 2022.)

## 4.3 Teollisuuden ylijäämälämmön potentiaali

Teollisuuden ylijäämälämmöllä on valtava potentiaali kestävän energianlähteenä, ja sen hyödyntäminen voi merkittävästi edistää energiatehokkuutta ja vähentää ympäristövaikutuksia. Kun teollisuusprosesseissa syntyy lämpöä, joka poistuu tuotantolaitoksesta esimerkiksi poistoilman, savukaasujen tai jäähdytyksen lauhdelämmön mukana, puhutaan ylijäämälämmöstä. Tämä hukkalämpö voisi toimia arvokkaana resurssina erilaisissa sovelluksissa, kuten lämmön tuottamisessa kaupunkialueilla, teollisuuden omassa prosessilämmityksessä tai jopa sähköntuotannossa.

Motivan toteuttaman esiselvityksen mukaan teollisuuden ylijäämälämmön potentiaaliksi Suomessa arvioitiin noin 16 TWh vuodessa. Ylijäämälämpö voidaan muuttaa sähköenergiaksi, jos sille ei löydy välitöntä käyttöä tai sen hyödyntäminen ei ole kannattavaa. Matalalämpöistä hukkaläm-

pöä käyttövoimanaan hyödyntävien sähkögeneraattoreiden sähköntuotannon hyötysuhde on kuitenkin heikko, joten ylijäämälämpö olisi kannattavinta hyödyntää tuotantolaitoksen omissa prosesseissa tai muissa saman tuotantoalueen kohteissa. (Esiselvitys: Ylijäämälämmön potentiaali teollisuudessa 2019.)

Teollisuuden ylijäämälämmön hyödyntäminen kasvihuoneiden lämmityksessä tarjoaisi monia etuja. Se vähentäisi kasvihuonekaasupäästöjä, kun lämmitys perustuu kierrätettyyn ja muuten hukkaan menevään lämpöön. Samalla se voisi alentaa kasvihuoneiden energiakustannuksia, mikä olisi tärkeää maatalouden kannattavuuden näkökulmasta.

## 5 Laskennat

Tutkittavina kohteina olleet kylmävarasto ja kasvihuone sijaitsivat eri paikkakunnilla. Tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää kasvihuoneen lämmitysenergiantarve ja kylmävaraston tuottaman lauhde-energian samanaikainen määrä. Erityisesti pyrittiin tutkimaan mahdollisuuksia hyödyntää kylmävaraston lauhde-energiaa kasvihuoneen lämmityksessä. Opinnäytetyötä työstettiin yhteistyössä kahden muun opiskelijan kanssa. Yksi opiskelija oli vastuussa Excel-laskentamallin kehittämisestä kasvihuoneen lämmitysenergiantarpeen laskemiseksi. Toinen opiskelija tarjosi lähtötiedot kylmävaraston lauhde-energian laskentaa varten.

Tässä luvussa esitellään laskennan tuloksia kasvihuoneen lämmitysenergiantarpeen ja kylmävaraston lauhde-energian määrien osalta sekä laskennassa käytettyjä lähtöarvoja ja oletuksia. Laskennalla saatuja tuloksia verrataan keskenään.

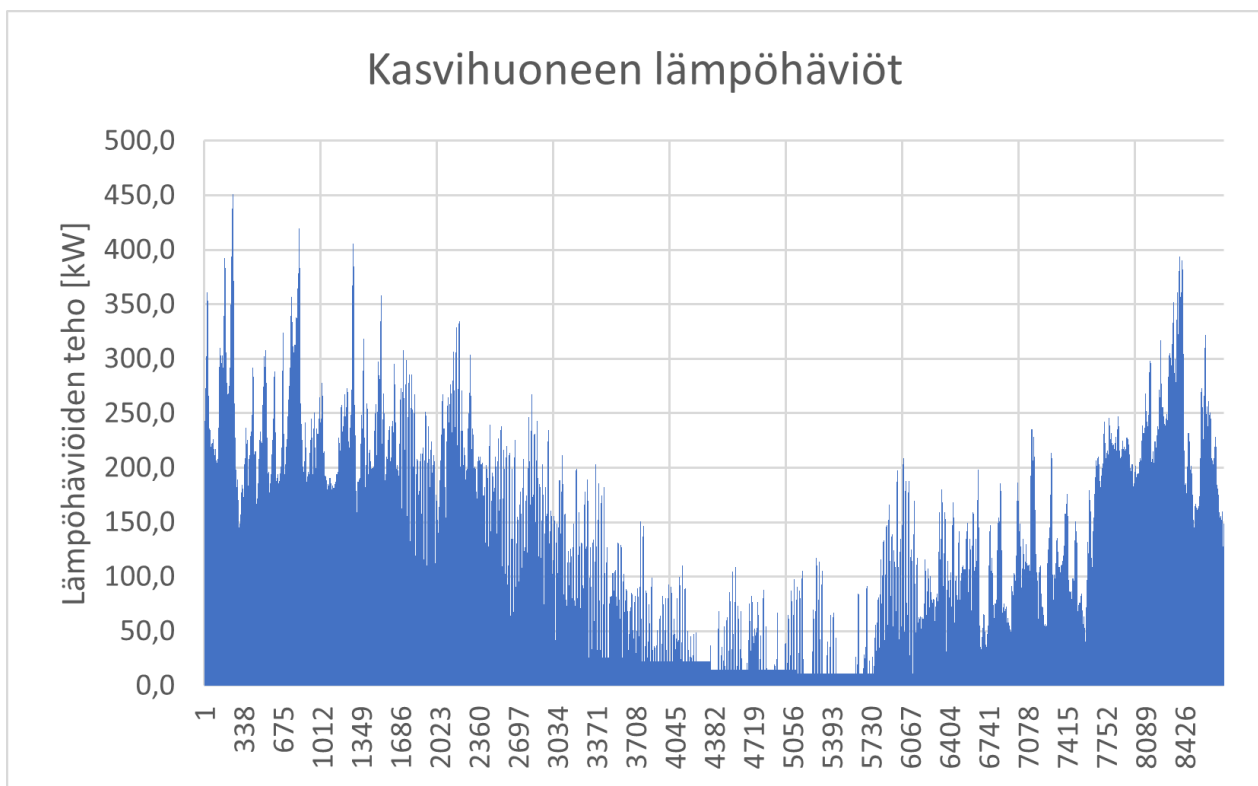
### 5.1 Kasvihuoneen lämmitysenergiantarve

Kasvihuoneen lämmitysenergian laskentamalli toteutettiin käyttäen Excel-taulukkolaskentaa, jonka avulla voitiin jäsenellä ja analysoida kasvihuoneen lämmitysenergiantarvetta eri olosuhteissa. Laskennassa otettiin huomioon useita keskeisiä tekijöitä, kuten kasvihuoneen mitat, ulkoilman ja maaperän lämpötilat, eristystaso, rakennemateriaalien lämmönsiirto-ominaisuudet sekä sisätilan lämpötilavaatimukset. Kasvihuoneen teknisten tietojen sekä ympäristön lämpötilatietojen avulla voitiin laskea lämpöhäviöt kasvihuoneen eri osista, kuten seinistä, katosta ja lattiasta. Lämmitysenergiantarvetta voidaan arvioida eri skenaarioissa lähtötietoja vaihtamalla.



### 5.1.1 Lämpöhäviöt

Kasvihuoneen lämpöhäviöiden laskenta perustui kasvihuoneen mittoihin, materiaaleihin ja niiden lämmönsiirto-ominaisuuksiin sekä ulkoilman ja maaperän lämpötiloihin. Eri materiaalien lämmönläpäisykertoimet (U-arvot) perustuivat kirjallisuudesta saatuihin viitearvoihin. Lämpöhäviöt laskettiin eri rakenneosille niiden pinta-alan, U-arvon sekä lämpötilaerojen avulla. Lämpöhäviöt katon ja seinien läpi otettiin huomioon, kun ulkoilman lämpötila oli kasvihuoneen optimaalista sisälämpötilaa matalampi. Laskennassa on käytetty kasvihuoneen ihanteellisen sisälämpötilan alarajana +15 °C.



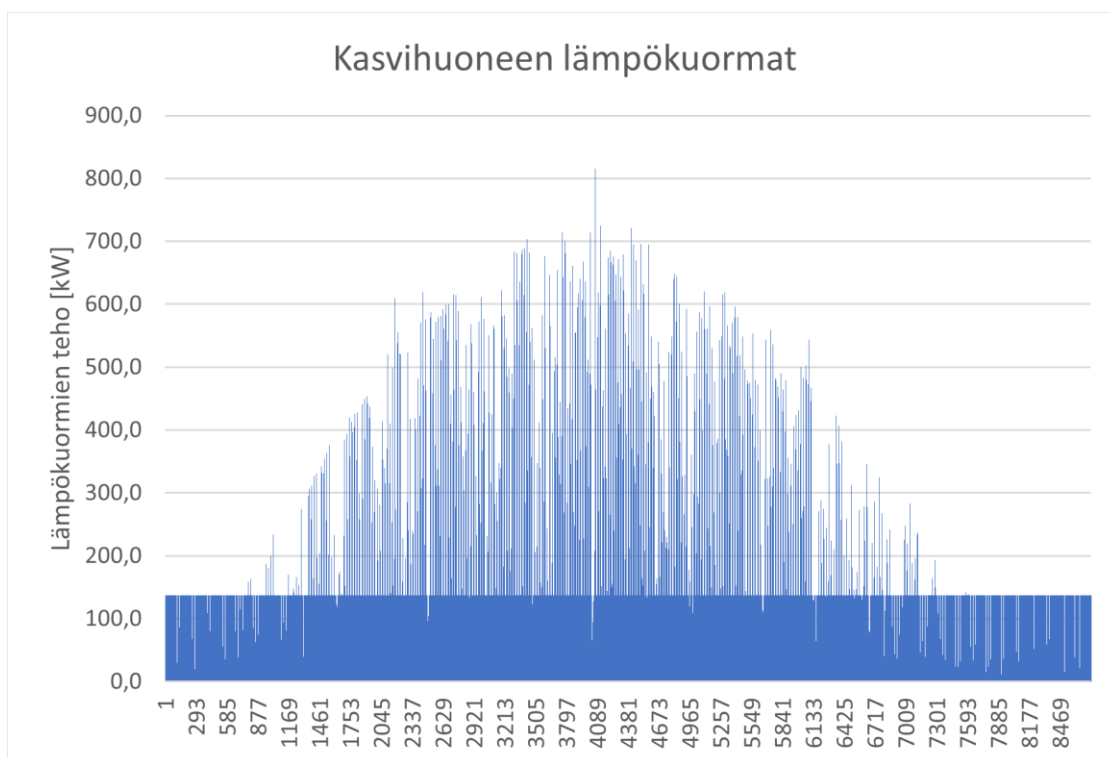
Kuvio 6. Kasvihuoneen lämpöhäviöt.

Kuviossa 6 on esitetty laskentamallilla toteutetut laskelmat lämpöhäviöistä kasvihuoneen rakenteiden läpi vuoden aikana. Lämpöhäviöt ovat suurimmillaan talvella ja alkukevästä, kun ulkoilman ja maaperän lämpötilat ovat kylmimmillään. Pienimmillään lämpöhäviöt ovat kesällä, kun vuorokauden keskilämpötilat ovat lähimpänä kasvihuoneen sisälämpötilaa. Lämpöhäviöiden kokonaisenergian määräksi laskettiin 1153 MWh vuodessa. Kasvihuoneen lämpöhäviöiden laskennoissa ei ole otettu huomioon vuotoilmaa tai kylmäsiltoja.

### 5.1.2 Lämpökuormat

Valaistus ja auringon säteily ovat keskeisiä lämpökuorman lähteitä kasvihuoneessa. Valaistuksen vaikutus riippuu käytetystä valaistusteknologiasta ja käyttöasteesta. Valaistuksen käyttämä sähköenergia muuttuu lopulta lämmöksi, joka säteilee ympäristöön. Valaistuksen lämmöntuotto on usein vähäistä verrattuna muihin lämpölähteisiin, mutta se voi silti vaikuttaa lämmitysenergian tarpeeseen. Auringon säteily on merkittävin luonnollinen lämpökuorman lähde. Auringonsäteily lämmittää kasvihuonetta suoraan ja välillisesti. Auringon säteilyn ja valaistuksen aiheuttamat lämpökuormat voivat vähentää kasvihuoneen lämmitysenergian tarvetta, erityisesti päiväsaikaan. Kasvihuoneviljelyssä tärkeää on tasapainottaa näiden luonnollisten lämmönlähteiden vaikutusta ylläpitäen samalla optimaaliset olosuhteet kasveille.

Lämpökuormia laskettaessa valaistuksen tehotiheyden arvona käytettiin  $130 \text{ W/m}^2$  ja käyttöasteeksi arvioitiin 70 %. Oletuksena oli myös, että valaistuksen kuluttama sähköenergia muuttuu kokonaisuudessaan lämmöksi. Auringon säteilyn aiheuttamia lämpökuormia laskettaessa lähtötietoina käytettiin keskimääräisen kokonaissäteilyn tilastoja Jokioisten havaintoasemalta vuodelta 2022.

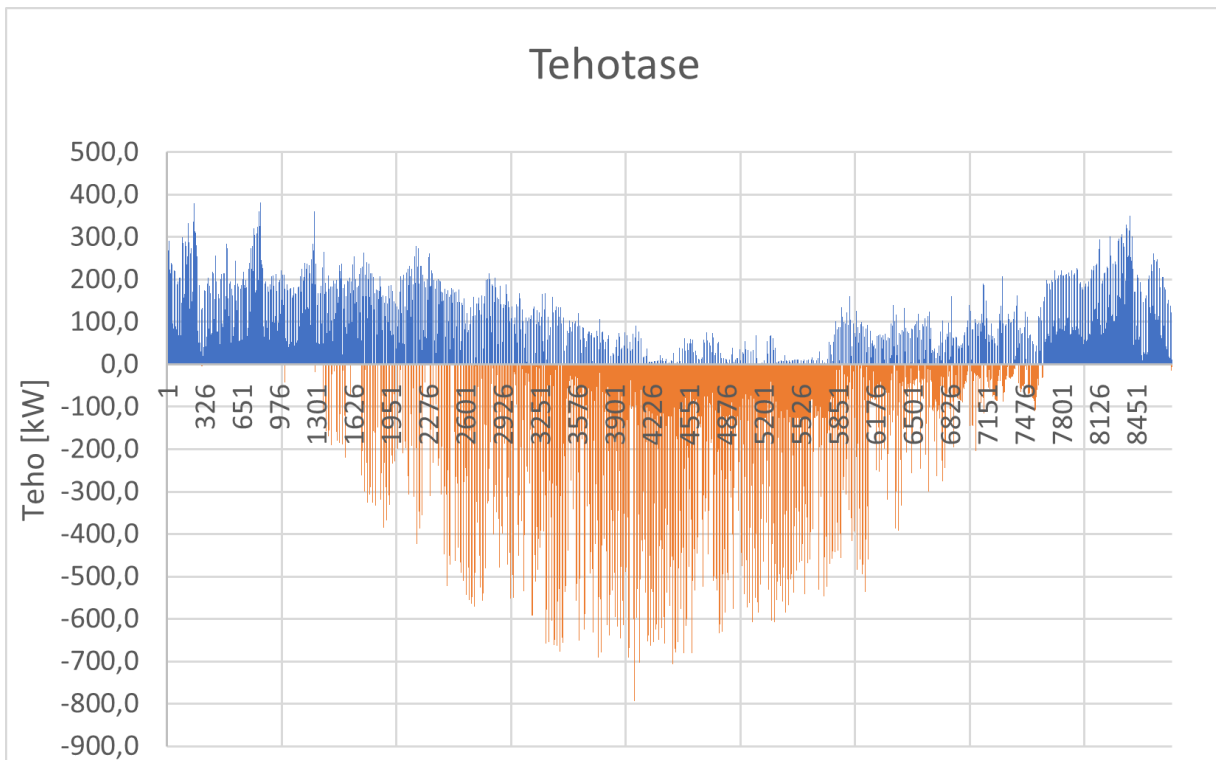


Kuvio 7. Kasvihuoneen lämpökuormat

Valaistuksen ja säteilyn lämpökuormien kokonaisenergiämääräksi saatiin 1424 MWh vuodessa. Kuviossa 7 on esitetty valaistuksen ja säteilyn aiheuttamat lämpökuormat yhteenlaskettuna. Kuviosta on selkeästi havaittavissa säteilyn huomattavasti valaistusta suurempi vaikutus kokonaislämpökuormaan. Säteilyn lämpökuorma vaihtelee merkittävästi niin vuoden kuin vuorokaudenkin aikana. Kesäisin auringon säteilyn lämpökuorma on suurimmillaan, kun päivän pituus on pitkä, ja aurinko on korkealla taivaalla, mikä lisää suoran säteilyn määrää kasvihuoneessa. Talvella auringon säteilyn lämpökuorma on heikompi tai lähes olematon. Valaistus tuottaa päällä ollessaan tasaisen määrän lämpöä ympäri vuoden. Valaistus tuottaa päällä ollessaan vakiomäärän lämpöä, joten valaistuksen osuus lämpökuormista hahmottuu kuvaajassa tasapaksuna viivana. Päivisin auringon paistaessa valaistuksen osuus kokonaislämpökuormasta on vähäisin. Optimaalisen lämmityksen ja valaistuksen ajoittamiseksi on tärkeää tunnistaa näiden lämpökuormien ajallinen vaihtelu. Valaistukseen, lämmitykseen ja jäähdytykseen voitaisiin käyttää älykkäitä ohjausjärjestelmiä, jotka huomioivat vuoden- ja vuorokaudenajan vaihtelut kasvihuoneen lämpötilan säätelyssä.

### **5.1.3 Lämpöhäviöiden ja -kuormien tehotase**

Vaikka lämpökuormien kokonaisenergiämäärä voi olla vuoden aikana lämpöhäviöiden kokonaisenergiämäärää suurempi, niiden ajoittuminen ei välttämättä kohtaa optimaalisesti. Lämpökuormat voivat vaihdella päivittäin ja vuodenajan mukaan, kun taas lämpöhäviöt voivat olla jatkuvia ja tasaisempia. Lämpökuormien ja -häviöiden tasapainottaminen lisälämmityksen avulla voi olla tarpeen, jotta varmistettaisiin vakaat ja optimaaliset olosuhteet kasvien hyvinvoinnille. Lisälämmityksen tarve kasvihuoneessa korostuu erityisesti talvisin, jolloin lämpöhäviöt ovat suurimmillaan ja lämpökuormat pienimmillään.



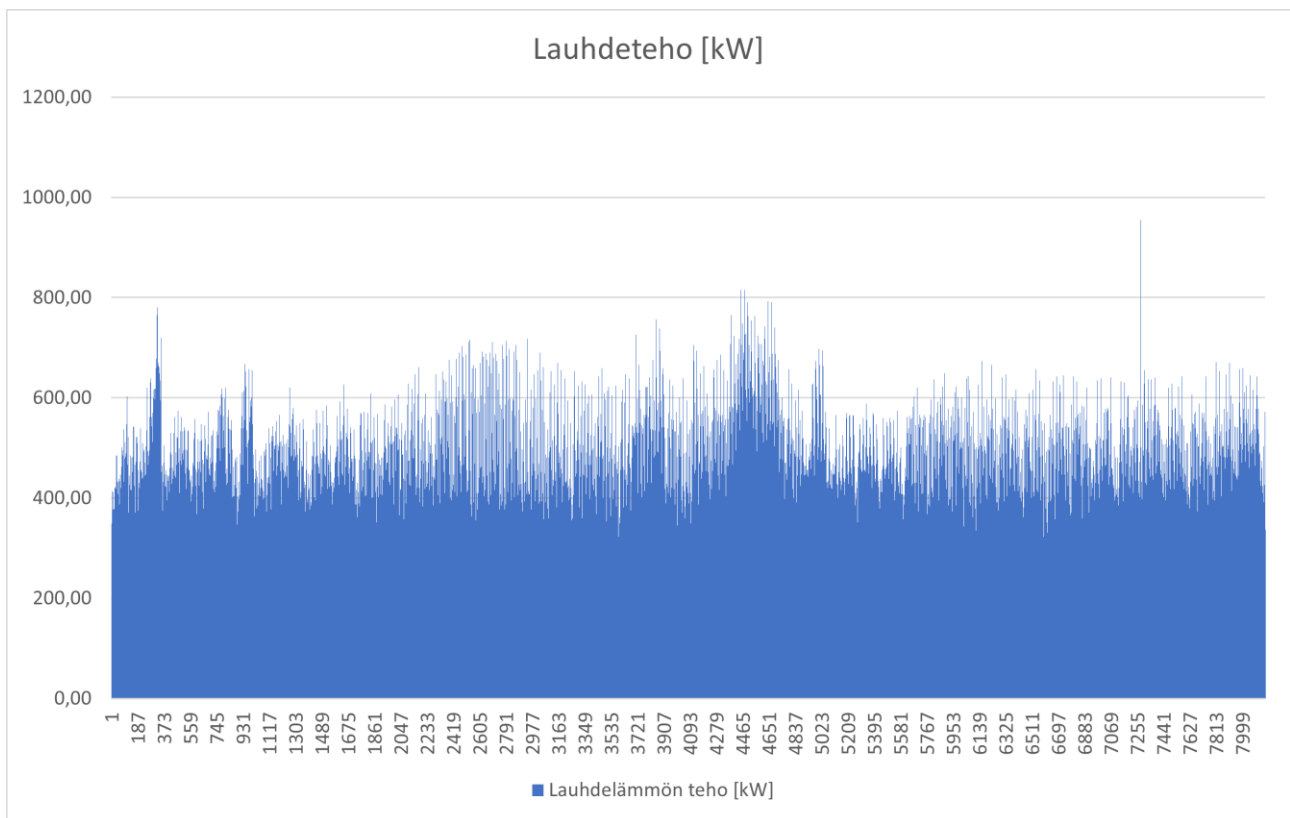
Kuvio 8. Kasvihuoneen lämpöhäviöiden ja -kuormien tehotase

Kuviossa on esitetty lämpöhäviöiden ja lämpökuormien tehotase, eli hetkellisten lämpöhäviöiden ja samanaikaisten lämpökuormien erotus. Kuvaajan on tarkoitus visualisoida, miten kasvihuoneen lämmityksen ja jäähdytyksen tarpeiden tasapaino vaihtelee ajan myötä. Kuvaajassa nollassa edustaa tilannetta, jossa lämpöhäviöt ja lämpökuormat ovat tasapainossa.

Sininen väri nollassa yläpuolella edustaa tilannetta, jossa lämpöhäviöt ovat suuremmat kuin lämpökuormat. Käytännössä tämä tarkoittaa, että kasvihuone menettää enemmän lämpöä kuin mitä se saa lämpökuormista. Lämmitys on tällöin tarpeen ylläpitämään kasvihuoneen sisätilojen lämpötilaa optimaalisena. Oranssi väri ilmaisee tilannetta, jossa lämpökuormat ovat suuremmat kuin lämpöhäviöt. Kasvihuoneessa syntyy enemmän lämpöä kuin menetetään, mikä voi aiheuttaa liiallista lämpenemistä. Jäähdytystoimenpiteet saattavat tällöin olla tarpeen, jotta sisälämpötila pysyy kasveille sopivana.

## 5.2 Kylmävaraston lauhde-energian tuotto

Kylmävaraston tuottaman lauhdetehon laskeminen perustui kohteen sähkönkulutustietoihin tammi- ja marraskuun väliltä vuonna 2021. Kylmävaraston jäähdytyksen osuudesta koko kiinteistön sähkönkulutuksesta ei ollut tarkkaa tietoa. Laskennassa käytettiin oletusta, että jäähdytyksen osuus koko sähkönkulutuksesta oli 65 %. Kylmävaraston jäähdytyskoneiston kylmäkertoimeksi oletettiin 2,2. Laskennan tuloksena saatiin lauhdeteho tuntitasolla, joka kuvaa kylmävaraston jäähdytysprosessista syntyvän hukkalämmön määrää vuoden eri ajankohtina.



Kuvio 9. Kylmävaraston jäähdytyksen lauhdeteho.

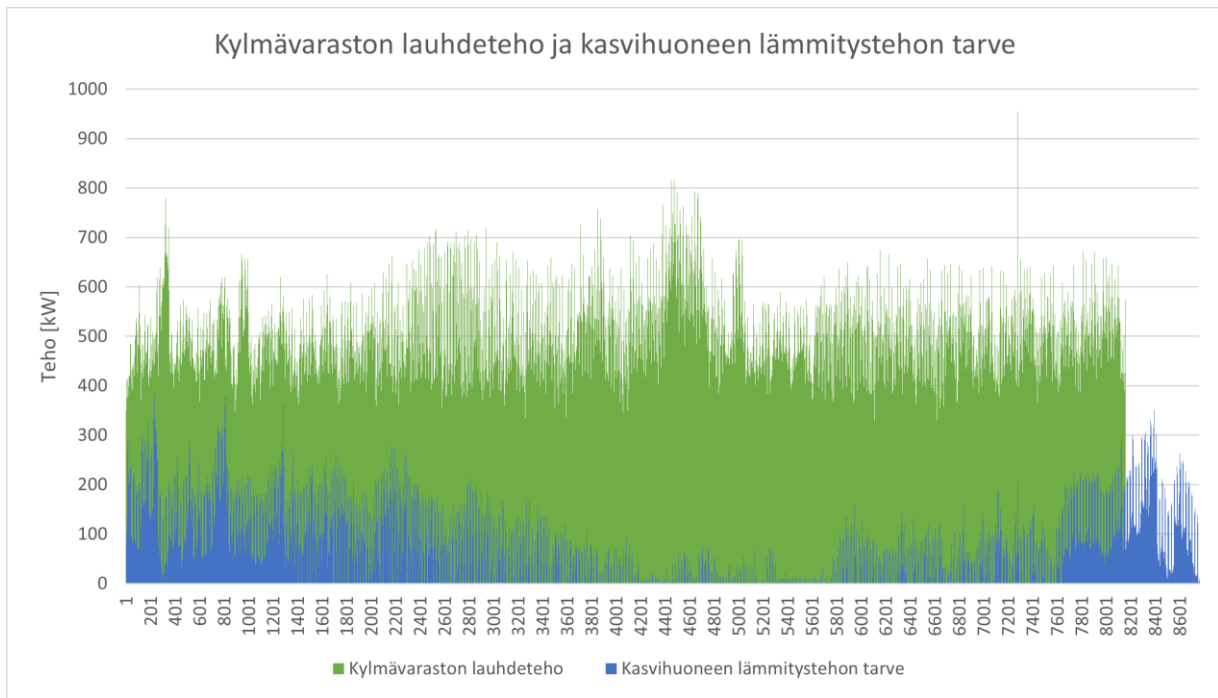
Kylmävaraston laskennallinen lauhde-energian tuotto on 3900 MWh vuodessa. Tämä antaa lauhdetehon keskiarvoksi 445 kW vuoden ympäri. Kylmävaraston tuottaman lauhde-energian suuri määrä avaa mahdollisuuksia hyödyntää hukkalämpöä tehokkaasti. Kylmävaraston jäähdytyksessä syntyvä lauhde-energia voitaisiin hyödyntää kasvihuoneen lämmitykseen, mikä edistäisi energiatehokkuutta ja kestävää energiankäyttöä maataloustuotannossa. Vertailu näiden kahden tilan välillä

tarjoaa näkökulmaa siitä, miten erilaiset maatalouden tilat voivat hyötyä hukkalämmön kierrätyksestä. Laskelmien perusteella kylmävaraston tuottama lauhde-energia voisi teoriassa kattaa kasvihuoneen koko vuoden lämmitysenergiatarpeen.

On ymmärrettävä, että laskennassa käytetyt oletukset perustuvat arvioihin ja yleisiin teknisiin tietoihin. Oletukset, kuten jäähdytyksen osuus sähkönkulutuksesta ja jäähdytyskoneiston kylmäkerroin, voivat vaihdella todellisuudesta, mikä saattaa olennaisesti vaikuttaa laskennan tarkkuuteen. Oletuksiin perustuvien laskentatulosten tulisi toimia suuntaa antavina arvioina, ja niitä tulisi suhtautua kriittisesti. Olisi suositeltavaa verrata laskennan tuloksia käytännön havaintoihin ja mittauksiin, jotta saataisiin tarkempi käsitys laskennan luotettavuudesta. Oletuksiin liittyvät epävarmuudet on hyvä tunnistaa ja ottaa huomioon päätöksenteossa ja suunnittelussa.

### **5.3 Vertailu**

Vertailtaessa kasvihuoneen lämmitysenergiatarpeen ja kylmävaraston tuottaman lauhde-energian laskelmissa saatuja tuloksia, voidaan havaita merkittäviä eroja lämmitysenergiatarpeessa ja lauhdetehon määrässä. Kasvihuoneen kuukausittainen lämmitysenergiatarve vaihtelee ulkoilman lämpötilan mukaan saavuttaen huippunsa kylminä kuukausina, kun taas kylmävaraston lauhde-teho sen sijaan pysyy suhteellisen tasaisena ympäri vuoden. Kylmävaraston lauhde-energian määrä perustui kohteesta saatuihin sähkönkulutustietoihin vuodelta 2021. Sähkönkulutustietoja ei kuitenkaan ollut saatavilla koko vuoden ajalta, vaan siitä puuttui joulukuun tiedot. Voitaneen kuitenkin olettaa, että lauhdeteho jatkui puuttuvan ajanjakson aikana melko tasaisena.



Kuvio 10. Kylmävaraston jäädytyksen tuottama lauhdeteho ja kasvihuoneen lämmitystehon tarve.

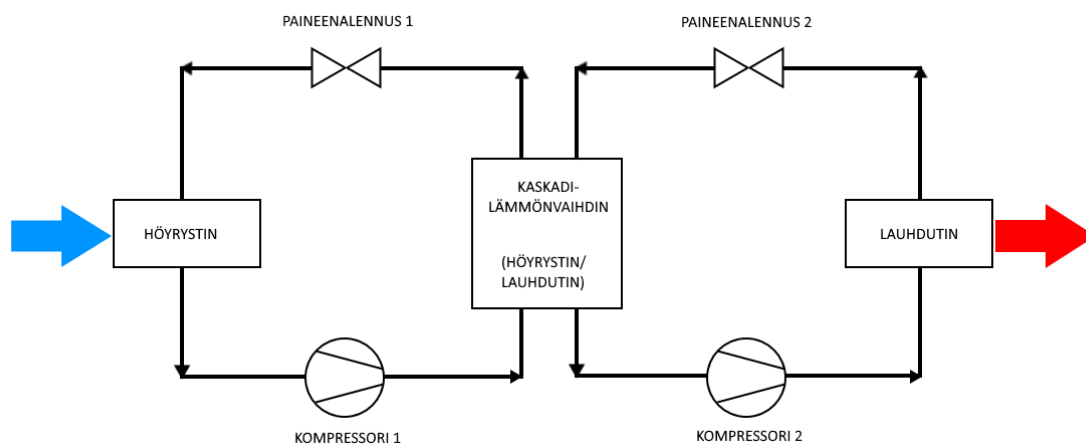
Kuviosta 10 voidaan havaita, että kylmävaraston tuottama lauhdeteho on ympäri vuoden huomattavasti kasvihuoneen lämmitystehon tarvetta suurempi. Kylmävaraston tuottama lauhdeteho kasvaa aavistuksen verran kesällä, kun lämmin sää lisää jäädytystehon tarvetta kylmävarastossa. Kylmävaraston lauhdeteho ja kasvihuoneen lämmitystehon tarve ovat lähimpänä toisiaan alkuvuodesta, jolloin kasvihuoneen lämmitystehon tarve on kylmien olosuhteiden vuoksi suurimmillaan. Kylmävaraston hukkalämmön hyödyntämistä kasvihuoneen lämmityksessä voitaisiin harkita erityisesti kylmimpinä kuukausina, jolloin kasvihuoneen lämmityksen tarve on suurimmillaan. Kylmävaraston lauhdeteho pystyisi kattamaan kasvihuoneen lämmitystehon tarpeen myös kylmimpinä aikoina.

Täytyy kuitenkin muistaa, että laskelmissa käytetyt oletukset voivat vaikuttaa tuloksiin. Jatkotutkimuksissa voitaisiin tarkastella eri oletusten vaikutuksia laskelmien tuloksiin ja hienosäätää niitä, kun tarkempaa tietoa on saatavilla. Myös käytännön kokeiden ja mittauksien tekeminen voi tarjota oleellisia tietoja laskelmiin liittyvän epävarmuuden vähentämiseksi. Näin pyrittäisiin kohti entistä luotettavampaa ja tarkempaa energiankäytön optimointia sekä energiatehokkuuden edistämistä niin kylmävarastoinnissa kuin myös maataloustuotannossa.

## 6 Toteutettavuus ja saavutettavat hyödyt

Kylmävaraston ja kasvihuoneen sijaitessa eri paikkakunnilla hukkalämmön hyödyntäminen kasvihuoneen lämmityksessä ei ole kovin kannattavaa. Kylmävaraston ja kasvihuone tulisi rakennuttaa vierekkäin, jotta lämpöenergian siirto olisi mahdollisimman tehokasta ja käytännöllistä. Tämä vaatii huolellista suunnittelua rakennusalan ammattilaisten kanssa, jotta tilat soveltuvat toiminnallisesti yhteen. Kun rakennukset sijaitsevat rinnakkain, voidaan selvittää lämmitettävän kasvihuoneen optimaalinen koko suhteessa kylmävaraston lauhdetehoon. Olisi myös hyvä varmistaa, että kasvihuoneen koko ja lämmityksen tarve ovat tasapainossa kylmävaraston tarjoaman lauhde-energian kanssa. Suunnittelussa on otettava huomioon kasvihuoneen eristysominaisuudet, kasvien lämmitystarve ja muut mahdolliset lämmöntarpeet, kuten kasteluveden lämmitys.

Toisena edellytyksenä lauhde-energian tehokkaalle hyödyntämiselle on kylmävarastolle ja kasvihuoneelle yhteisen jäähdytys- ja lämmitysteknologian valinta. Lämpöpumpputeknologia olisi siinä mielessä ihanteellinen, että sitä voidaan käyttää sekä jäähdytykseen että lämmitykseen. Kylmävaraston jäähdytys ja kasvihuoneen lämmitys voitaisiin mahdollisesti toteuttaa samalla ostoenergialla. Kaskadilämpöpumppu voisi toimia tehokkaana lämmitys- ja jäähdytysratkaisuna kylmävaraston ja kasvihuoneen välillä. Tämä järjestelmä koostuu kahdesta erillisestä yksivaiheisesta lämpöpumpusta, joista kummassakin vaiheessa voidaan käyttää eri kylmäaineita. Kaskadin ensimmäinen vaihe tuottaa jäähdytystehon, ja toinen vaihe hyödyntää ensimmäisen vaiheen lämmönluovutuksen energiaa lämmönlähteenään.



Kuvio 11. Kaskadilämpöpumpun pääkomponentit



Kaskadilämpöpumpussa on kaskadilämmönsiirrin, joka toimii ensimmäisen vaiheen lauhtuttimena ja toisen vaiheen höyrystimenä. Tämä rakenne mahdollistaa lämpöenergian tehokkaan siirron kylmävarastosta kasvihuoneeseen. Molemmissa kylmäainepiireissä voidaan käyttää eri kylmäaineita, jotka voidaan valita ominaisuuksiltaan mahdollisimman sopiviksi kumpaankin piiriin. Ensimmäinen lämpöpumppu toimii paremmalla hyötysuhteella, kun lauhtumispaine on matalampi kuin toisella lämpöpumpulla. Kaskadilämpöpumpun avulla voitaisiin siis tehokkaasti hyödyntää kylmävaraston lauhte-energiaa kasvihuoneen lämmityksessä. Järjestelmä tarjoaa mahdollisuuden tasapainottaa lämpötiloja ja optimoida energiankulutusta näiden kahden tilan välillä. Saatavilla olevan lauhte-energian määrän ollessa huomattavasti lämmitysenergian tarvetta suurempi, on syytä pohtia myös mahdollisia lämmöntalteenottomenetelmiä.

Toteuttamalla kylmävaraston jäädytys ja kasvihuoneen lämmitys samalla kaksivaiheisella lämpöpumppujärjestelmällä voidaan saavuttaa useita mahdollisia hyötyjä. Yksi merkittävimmistä eduista on kylmävaraston ja kasvihuoneen kokonaisenergiatehokkuuden parantuminen ja lämmityskustannuksissa säästäminen. Kylmävaraston synnyttämä lauhdelämpö ei mene hukkaan ja perinteisten lämmitysmenetelmien tarve kasvihuoneessa pienenee, mikä voi johtaa energiakustannusten ja kasvihuonepäästöjen vähenemiseen. Kylmävaraston hukkaenergia olisi energianlähteenä edullinen ja päästötön.

Älykkäällä ohjausjärjestelmällä varustetulla lämpöpumppuratkaisulla voidaan myös mahdollisesti saavuttaa ja ylläpitää optimaalisia olosuhteita kasvihuoneessa aiempaa menetelmää paremmin. Älykkäillä ohjausjärjestelmillä kaskadilämpöpumpun kompressoreita pystyttäisiin ohjaamaan itsenäisesti. Erikseen ohjattavat kompressorit mahdollistavat molempien tilojen optimaalisen jäädytys ja lämmitystehon ylläpitämisen reaaliaikaisesti. Kaskadilämpöpumppujärjestelmän etuna on järjestelmän skaalautuvuus. Kompressoreiden tehot sekä kiertoprosessissa käytettävät kylmäaineet voidaan valita ja mitoittaa molemmille tiloille sopiviksi. Molemmissa tiloissa voitaisiin ylläpitää optimaalisia olosuhteita toisistaan riippumatta.

Kasvihuoneen lämmitystehon tarve ja kylmävaraston jäädytyksen tarve eivät aina kohtaa ihan-teellisesti, jolloin lauhdelämpöä voidaan ajaa varastoon. Lämmin  $\$COP$ -järjestelmä lukee tietoa sen hetkisestä sähkön hinnasta ja lämpöä voidaan ajaa varastoon silloin kun sähkö on halvinta. Järjestelmään voidaan myös syöttää sääennusteita, joiden avulla pystytään ennakoimaan kasvihuoneen

tarvitsemaa lämmitystehoa. Kasvihuoneen olosuhteiden optimoinnilla voidaan parantaa kasvien hyvinvointia ja sitä kautta mahdollisesti parantaa sadon tuottavuutta ja lopputuotteen laatua, mikä puolestaan edesauttaa kasvihuoneviljelyn kannattavuutta.

## 7 Yhteenveto ja pohdinta

Tutkimuksen tuloksista voidaan todeta, että kylmävaraston jäähdytyksestä syntyy hyödynnettävissä olevaa lämpöä runsaasti ja suhteellisen tasaisella teholla. Tulosten perusteella kyseisen kasvihuoneen lämmityksen tarve voitaisiin täyttää käytännössä kokonaan kylmävaraston lauhdelämmöllä, eli lauhde-energiaa hyödyntämällä voitaisiin mahdollisesti saavuttaa merkittäviä säästöjä energiakustannuksissa. On huomioitavaa, että tämän tutkimuksen aihe rajattiin käsittelemään ainoastaan kasvihuoneen lämmitysratkaisuja ja lämmitystehon tarvetta, eikä siinä käsitelty lainkaan kasvihuoneen jäähdytyksen tarvetta ja mahdollisia jäähdytysratkaisuja. Jäähdyttäminen voi olla varsinkin kesä-aikaan merkittäväkin ongelma kasvihuoneissa.

Yhtenä tutkimuskysymyksenä oli kylmävaraston tuottaman lauhde-energian ja kasvihuoneen lämmitystehon tarpeen selvittäminen ja niiden tase vuoden eri ajankohtina. Haasteena oli kylmävaraston tuottaman lauhde-energian laskeminen. Tutkittavasta kohteesta oli saatavilla melko rajoitusti lähtötietoja, joiden perusteella lauhde-energian määrä laskettiin. Laskennassa käytettiin oletuksia ja arvioita täyttämään puutteellisia lähtötietoja. Nämä oletukset ja arviot voivat olennaisesti vaikuttaa laskentatuloksiin. Tulokset voivat kuitenkin toimia suuntaa antavina ja lähtötietoja voidaan tarkentaa sitä mukaa, kun tarkempia tietoja on saatavilla.

Uudella teknologialla saavutettavia hyötyjä koskevaan tutkimuskysymykseen saatiin mielestäni vastauksia. Esimerkiksi uudella menetelmällä saavutettua tarkkaa taloudellista hyötyä on kuitenkin vaikea arvioida, sillä laskenta perustui osittain parhaisiin arvioihin ja oletuksiin, eikä tarkkoja tietoja lähtötilanteen lämmitys- tai jäähdytyskustannuksista kummastakaan kohteesta ollut saatavilla.

Yksi tutkimuskysymyksistä koski Lamit oy:n \$COP®-tuotemerkkiä ja sitä, miksi kyseistä menetelmää ei käytetä yleisemmin. Tähän kysymykseen ei tutkimuksen aikana saatu suoraa vastausta. Kyseisen menetelmän suosioon voi vaikuttaa useampi tekijä, kuten markkinoilla vallitseva kilpailu sekä tuotteen näkyvyys markkinoilla.

Tutkimuksen työstäminen kahden muun opiskelijan rinnalla tuotti osaltaan haasteita. Oman opinäytetyöni edistyminen riippui osaltaan toisten opiskelijoiden keräämistä havainnoista ja laskentatuloksista. Kasvihuoneen energiantarpeen laskentamalli edistyi pikkuhiljaa koko projektin ajan. Säännöllisillä etätapaamisilla ja tiedonvaihdolla pystyimme kuitenkin pysymään ajan tasalla toistemme edistymisestä omissa tutkimuksissamme. Haasteita Excel-tilukkolaskennassa aiheutti huomattavan suuri datapisteiden määrä. Niistä koitui ajoittain erinäisiä tietoteknisiä ongelmia, kuten ohjelmiston kaatuilua ja jumittamista.

Työn tuloksia ei sinällään voida hyödyntää tutkituissa kohteissa, mutta niitä voidaan hyödyntää uusia vastaavanlaisia tiloja rakennettaessa. Jatkotoimenpiteinä olisi ehkä syytä paneutua myös kasvihuoneen jäähdytysratkaisuihin, sillä tulosten perusteella jäähdytys vaikuttaa olevan ainakin kyseisessä kasvihuoneessa vähintäänkin yhtä suuri haaste kuin lämmitys. Myös kaskadilämpöpumppuun kyseisissä kohteissa parhaiten soveltuvien kylmäaineiden tarkempi selvittäminen voisi olla aiheellista. Yhtenä aiheena jatkotutkimuksille voisi olla uuden menetelmän toteuttamisesta aiheutuvat investointikustannukset ja toisaalta uudella menetelmällä saavutettava taloudellinen hyöty pitkällä tähtäimellä.

## Lähteet

Aittomäki, A. 2012. Kylmätekniikka. 4. p. Suomen kylmäyhdistys ry.

EU-asetus 517/2014. F-kaasuasetus. Euroopan Unionin virallinen lehti 20.5.2014. Viitattu 30.8.2023. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014R0517&from=RO>

Esiselvitys: Ylijäämälämmön potentiaali teollisuudessa. 2019. Motiva Oy. Viitattu 18.9.2023. [https://www.motiva.fi/files/16214/Esiselvitys - Ylijaamalammon potentiaali teollisuudessa.pdf](https://www.motiva.fi/files/16214/Esiselvitys_-_Ylijaamalammon_potentiaali_teollisuudessa.pdf).

Euroopan unionin F-kaasuasetus. 2020. Artikkelit Scanofficen verkkosivuilla. Viitattu 31.8.2023. <https://scanoffice.fi/ajankohtaista/euroopan-unionin-f-kaasuasetus/>

F-kaasu ja otsonikerrosta heikentävien aineiden valvonta ja lainsäädäntö. Julkaistu 1.9.2022. Viim. muutos 9.5.2023. Viitattu 30.8.2023. <https://www.ymparisto.fi/fi/luvat-ja-veloitteet/f-kaasut-ja-otsonikerrosta-heikentavat-aineet/valvonta-ja-lainsaadanto>

Fellows, P. J. 2022. Food Processing Technology - Principles and Practice. 5. painos. E-kirja. Elsevier. 551. <https://app-knovel-com.ezproxy.jamk.fi:2443/kn/resources/kpFPTPE38/toc?cid=toc>

Hakala, P. & Kaappola, E. 2013. Kylmälaitoksen suunnittelu. 3., 6. p. Opetushallitus.

Hiltunen, J. Ahvenharju, S. Hagström, M. Vanhanen, J. 2005. Kasvihuoneviljelijän energia- ja ilmasto-opas. Gaiga Group Oy. [http://www.motiva.fi/files/8003/Kasvihuoneviljelijän energia- ja ilmasto-opas CO2-paastot hallintaan ja kannattavuutta liiketoimintaan.pdf](http://www.motiva.fi/files/8003/Kasvihuoneviljelijan_energia-_ja_il-masto-opas_CO2-paastot_hallintaan_ja_kannattavuutta_liiketoimintaan.pdf)

Holopainen, J. 2021. Lämpöpumput 2020-luvun ympäristöteko. Blogikirjoitus EcoReal Oy:n verkkosivuilla. Julkaistu 8.2.2021. <https://www.ecoreal.fi/blog/lampopumput-2020-luvun-ymparistoteko/>

Jaakkonen, A-K. 2022. Kasvihuonetuotannossa sähkön käyttö kasvaa ja öljyn käyttö vähenee. Uutinen Luonnonvarakeskuksen verkkosivuilla. Julkaistu 15.3.2022. Viitattu 24.10.2023.

Jaakkonen, A-K. 2023. Poikkeuksellinen vuosi kasvihuonevihannesten tuotannossa . Uutinen Luonnonvarakeskuksen verkkosivuilla. Julkaistu 16.2.2023. Viitattu 24.10.2023.

<https://www.luke.fi/fi/uutiset/poikkeuksellinen-vuosi-kasvihuonevihannesten-tuotannossa>

Kaappola, E., Hirvelä, A., Jokela, M. & Kianta, J. 2011. Kylmätekniikan perusteet. 4. painos. Helsinki: Opetushallitus.

Kaukoranta, T. Näkkilä, T. 2010. Kasvihuoneen jäähdytysenergia. Suomen Maataloustieteellisen Seuran tiedote nro. 26. Viitattu 6.9.2023. <https://janet.finna.fi>, Journal.fi.

Kaupan kylmälaitteiden ja -järjestelmien lauhdelämmön talteenotto. 2012. Motiva Oy. Viitattu 1.9.2023. [https://www.motiva.fi/files/7973/Kaupan kylmälaitteiden ja -järjestelmien lauhdelämmön talteenotto Laskentaohje.pdf](https://www.motiva.fi/files/7973/Kaupan_kylmalaitteiden_ja_jarjestelmien_lauhdelammon_talteenotto_Laskentaohje.pdf)

Kothari, C. R. 2004. Research Methodology: Methods and Techniques. 2. p. E-kirja. <https://janet.finna.fi>, Ebook Central.

Laitinen, J. 2013. Pieni suuri energiakirja. Into kustannus.

Lindell, M. 2016. KM testaa: Kylmään ilmaan viritetyt ilmalämpöpumput. Artikkelit Käytännön maamies -lehden verkkosivuilla. Viitattu 31.8.2023. <https://kaytannonmaamies.fi/km-testaa-kylmaan-ilmaan-viritetyt-ilmalampopumput/>

Moilanen, S. 2020. Hukkalämmön hyödyntäminen. Avointen oppimateriaalien kirjasto. Julkaistu 22.10.2020. Muokattu 25.10.2020. Viitattu 6.11.2023. [https://urn.fi/urn:nbn:fi:oerfi-202209\\_00023404\\_5](https://urn.fi/urn:nbn:fi:oerfi-202209_00023404_5)

Puutarhatilastot 2021: Kasvihuoneyritysten energiankulutus. 2022. Tilastojulkistus Luonnonvarakeskuksen verkkosivuilla. Viitattu 22.10.2023. <https://www.luke.fi/fi/tilastot/puutarhatilastot/puutarhatilastot-2021-kasvihuoneyritysten-energiankulutus>

Perälä, O. & Perälä, R. 2013. Lämpöpumput. 3. p. Alfamer/Karisto Oy.

Rentola, T. 2014. Pakastevaraston lauhdelämmön talteenotto ja lämpöpumpun valinta. Opinnäyte-työ. Jyväskylän ammattikorkeakoulu, energiatekniikan koulutusohjelma. Viitattu 3.11.2023. <http://www.urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2014052710426>.

SFS-EN 378-2:2016. Kylmäkoneistot ja lämpöpumput. Turvallisuus- ja ympäristövaatimukset. Osa 2: Suunnittelu, rakenne, testaus, merkintä ja dokumentointi. Julk. 24.1.2017. Viitattu 12.10.2023. <https://janet.finna.fi>, SFS Online.

Suutari, T. N.d. COP vs. SCOP – Hyötysuhteiden erot. Artikkelin Nilan Suomi Oy:n verkkosivuilla. Viitattu 11.9.2023. <https://www.nilan.fi/energiansaasto/cop-vs-scop-hyotysuhteiden-erot/>.

Tuotannon hukkalämpö hyödyksi. N.d. Motiva Oy. Viitattu 1.9.2023. [https://www.motiva.fi/files/8501/Tuotannon\\_hukkalampo\\_hyodyksi.pdf](https://www.motiva.fi/files/8501/Tuotannon_hukkalampo_hyodyksi.pdf).

Tynjälä, T. 2022. Hukkalämmön tehokkaampi hyödyntäminen on osa teollisuuden lämpösektorin uudistumista ja tulevaisuuden energiarjestelmää. Artikkelin Nevel Oy:n verkkosivuilla. Julkaistu 13.1.2022. Viitattu 3.10.2023. <https://nevel.com/fi/story/hukkalammon-hyodyntaminen-osa-teollisuuden-lamposektorin-uudistumista-ja-energiarjestelmaa/>.

Veikkolainen, R. 2021. Kasvihuoneenlämmitystekniikoiden tarkastelu. Kandidaatintyö. Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto. Viitattu 29.10.2023. <https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/163176/Kasvihuoneen%20%C3%A4mmitystekniikoiden%20tarkastelu.pdf?sequence=1>.