



Vaasan yliopisto  
UNIVERSITY OF VAASA

Jaakko Rantamäki

**Teknolgiateollisuuden energiatehokkuuden  
parantaminen hukkalämmön  
talteenottojärjestelmän avulla**

Case: ABB Oy, IEC LV Motors – MM-rakennus

Tekniikan ja innovaatiojohtamisen yksikkö  
Diplomityö  
Energiatekniikka

Vaasa 2024

---

**VAASAN YLIOPISTO****Tekniikan ja innovaatiojohtamisen yksikkö**

<b>Tekijä:</b>	Jaakko Rantamäki
<b>Tutkielman nimi:</b>	Teknolögiäteollisuuden energiätehokkuuden parantaminen hukkalämmön talteenottojärjestelmän avulla : Case: ABB Oy, IEC LV Motors – MM-rakennus
<b>Tutkinto:</b>	Energiatekniikan DI
<b>Oppiaine:</b>	Energiatekniikka
<b>Työn valvoja:</b>	Anne Mäkiranta
<b>Työn ohjaajat:</b>	Birgitta Martinkauppi ja Pertti Alamartimo
<b>Valmistumisvuosi:</b>	2024
<b>Sivumäärä:</b>	107

---

**TIIVISTELMÄ:**

Tämä diplomityö on tehty ABB Oy, IEC LV Motorsille. Työn tarkoituksena on selvittää, millainen merkitys hukkalämmön talteenotolla on case-yrityksen MM-rakennuksen energiätehokkuuteen. Lisäksi työssä tutkitaan kaukolämpöverkon paluueden lämpötilan optimoinnin mahdollisuutta suhteessa ulkolämpötilan funktioon sekä järjestelmän kannattavuutta muuttuvilla sähkön- ja kaukolämmön hinnoilla. Hukkalämmön talteenottojärjestelmä on osa ABB Oy:n tavoitetta vastata ilmastonmuutokseen Carbon Neutral Operations (CNO) eli hiilineutraalin toimintahankkeen voimin. Työn kohteena olevan talteenottojärjestelmän suunnittelijana toimi Granlund Oy ja rakennusautomaatiosta vastasi Schneider Electric Finland Oy.

Energiätehokkuuden parantaminen on yksi keskeinen tavoite energiapolitiikassa. Vaikka edistystä onkin saavutettu, teollisuuden energiankulutusta ja päästöjä on vielä mahdollista vähentää. Hukkalämmön talteenotto tarjoaa lupaavan keinon tehostaa energiätehokkuutta ja alentaa tuotantokustannuksia teollisuudessa, vähentäen samalla ympäristövaikutuksia. Euroopan komission energiätehokkuusvaatimukset kannustavat innovaatioihin teollisuudessa, mikä edistää tasapuolista kilpailukykyä ja talouskasvua. Tämä työ toteutettiin hyödyntämällä toimintatutkimusmenetelmää ja energiätehokkuuden tutkimisessa pääpaino oli hukkalämmön energiätehokkaassa hyödyntämisessä rakennuksen ja teollisuuden prosessien lämmitys- ja viilentämistarpeiden optimaaliseen täyttämiseen. ABB Oy, IEC LV Motors hyödynsi kaksisuuntaista kaukolämpömallia hukkalämmön talteenottojärjestelmässään. Talteen otettu hukkalämpö pumpattiin ABB:n aluelämpöverkkoon ja sieltä MM-rakennuksen toimistotiloihin, tuotantotiloihin, teollisuusunien ja erilaisten prosessien viilennys- sekä lämmitysenergia tarpeiden täyttämiseksi.

Työn tuloksien perusteella voitiin todeta talteenottojärjestelmän tuovan merkittävän edun energiätehokkuuden parantamisessa. Ideaalisessa tilanteessa talteenottojärjestelmän lämmityspiiri kasvatti MM-rakennuksen energiätehokkuutta keskiarvallisesti 625 MWh/kk, joka kattoi 43 % lämmitysenergian tarpeesta kuukausittain syyskuu-maaliskuu välillä. Järjestelmän jäähdytyspiiri kasvatti energiätehokkuutta keskiarvallisesti 424,88 MWh/kk, mikä oli yli 15-kertainen jäähdytysenergia tarpeeseen nähden. Kaukolämpöverkon paluueden lämpötilan optimointi saavutti keskiarvallisesti optiolla 1 noin 245,57 MWh/kk ja optiolla 2 noin 361 MWh/kk paremmat lämpöenergian hyödyt, kuin ilman optimointia. Optio 1 viittasi kaukolämpöverkon menoveden lämpötilaan 75 °C ja optio 2 menoveden lämpötilaan 80 °C. Kannattavuuslaskelmien perusteella järjestelmää oli kannattavaa hyödyntää, kun sähkön hinta vaihteli syyskuu-maaliskuu aikavälillä 5–130 €/MWh, jolloin sähköllä tuotetun lämmön todellinen hinta osui välille 18,64–65,05 €/MWh.

---

**AVAINSANAT:** Hukkalämpö, energiätehokkuuden parantaminen, energiankulutuksen normitus, lämpöpumpputeknologia, kaukolämpö teollisuudessa, kaksisuuntainen kaukolämpöverkko, kaukolämmön paluueden optimointi, älykäs rakennusautomaatio, kannattavuus

---

**UNIVERSITY OF VAASA**
**School of technology and innovation management unit**

<b>Author:</b>	Jaakko Rantamäki	
<b>Title of the Thesis:</b>	Improving the energy efficiency of the technology industry using a waste heat recovery system : Case: ABB Oy, IEC LV Motors – MM-building	
<b>Degree:</b>	Master of Science in Energy Technology	
<b>Programme:</b>	Energy Technology	
<b>Supervisor:</b>	Anne Mäkiranta	
<b>Instructors:</b>	Birgitta Martinkauppi and Pertti Alamartimo	
<b>Year:</b>	2024	<b>Number of pages:</b> 107

---

**ABSTRACT:**

This master's thesis is made for ABB Oy, IEC LV Motors. The purpose of the thesis is to investigate the significance of waste heat recovery on the energy efficiency of the case company's MM-building. Additionally, the thesis examines the possibility of optimizing the return water temperature of the district heating network in relation to the outdoor temperature function and the profitability of the system with varying electricity and district heating prices. The waste heat recovery system is part of ABB's goal to address climate change through the Carbon Neutral Operations (CNO) initiative. Granlund Oy was the designer of the recovery system under study, and Schneider Electric Finland Oy was responsible for building automation.

Improving energy efficiency is a key goal in energy policy. Although progress has been made, it is still possible to reduce industrial energy consumption and emissions. Waste heat recovery offers a promising way to enhance energy efficiency and reduce production costs in industry while also mitigating environmental impacts. The European Commission's energy efficiency requirements encourage innovation in industry, promoting fair competitiveness and economic growth. This work was carried out using action research methodology, with a focus on the efficient utilization of waste heat to meet the heating and cooling needs of buildings and industrial processes optimally. ABB Oy, IEC LV Motors utilized a bidirectional district heating model in their waste heat recovery system. The recovered waste heat was pumped into ABB's district heating network and then distributed to the MM-building's office spaces, production areas, industrial furnaces, and various processes to meet cooling and heating energy demand.

Based on the results of the work, it could be observed that the recovery system brought a significant advantage in improving energy efficiency. In an ideal situation, the heating circuit of the recovery system increased the energy efficiency of the MM-building by an average of 625 MWh/month, covering 43% of the heating energy demand monthly between September and March. The cooling circuit of the system increased energy efficiency by an average of 424.88 MWh/month, which was over 15 times the cooling energy requirement. The optimization of the district heating network's return water temperature achieved, on average, approximately 245.57 MWh/month with option 1 and approximately 361 MWh/month with option 2 in better thermal energy benefits compared to without optimization. Option 1 referred to the supply water temperature of the district heating network at 75 °C, and option 2 to the supply water temperature at 80 °C. Based on profitability calculations, it was profitable to utilize the system when the electricity price varied between 5–130 €/MWh from September to March, resulting in a real cost of electricity-produced heat ranging from 18.64–65.05 €/MWh.

---

**KEYWORDS:** Waste heat, improving energy efficiency, energy consumption standardization, heat pump technology, district heating in industry, bidirectional district heating network, district heating return water optimization, smart building automation, profitability

## Alkusanat

Tämä diplomityö toteutettiin Vaasassa sijaitsevalle yritykselle ABB Oy, IEC LV Motors. Toimintaympäristönä toimi alueen MM-rakennus, joka oli työn kohteena. Työssä tehtiin yhteistyötä Granlund Oy:n ja Schneider Electric Finland Oy:n kanssa. Haluan kiittää esimiestäni Johan Kalanderia työn mahdollistamisesta, sekä mielenkiintoisista ja haastavista tehtävistä, joiden parissa olen työn ohella saanut toimia. Haluan myös kiittää erityisesti ABB Oy:n työni ohjaajaa Pertti Alamartimoa innostavista ideoista ja hyvin kohdistetuista neuvoista työssäni. Lisäksi haluan osoittaa kiitokset mahtavalle tuotannonkehitys tiimille viihtyisästä työskentely-ympäristöstä.

Kiitän Vaasan yliopiston henkilökuntaa hyvästä opetuksesta. Erityisesti kiitokset työni valvojalle yliopistonlehtori Anne Mäkirannalle ja ohjaajalle yliopistonlehtori Birgitta Martinkaupille työni ansiokkaasta ohjaamisesta. Löysitte aina aikaa työn ohjaamiselle. Kiitokset myös opiskelujen aikaisista kurssien tuomista haasteista ja opeista, jotka innostivat minua perehtymään energiatekniikkaan. Lopuksi haluan kiittää opiskelukavereitani ikimuistoisista opiskeluajoista ja vanhempiani heidän korvaamattomasta tuestansa läpi opintojen.

*Vaasassa, 17.5.2024*

*Jaakko Rantamäki*

## Sisällys

1	Johdanto	14
1.1	Työn tavoitteet ja rajaus	15
1.2	Aineisto	16
1.3	Työn eteneminen	16
1.4	Yritysesittely	17
2	Teollisuuden hukkalämpö	18
2.1	Yleistä hukkalämmöstä	19
2.2	Hukkalämmön lähteet	20
2.2.1	Teknolohiateollisuus	20
2.2.2	Metsäteollisuus	21
2.2.3	Kemianteollisuus	21
2.2.4	Metalliteollisuus	22
2.2.5	Elintarviketeollisuus	22
2.3	Hukkalämmön hyödyntämiseen vaikuttavat tekijät	23
2.4	Vaikuttavat tekijät kiinteistötasolla	24
2.5	Potentiaali	25
2.6	Hukkalämmön energiamarkkina-arvo	29
3	Kaksisuuntainen kaukolämpöverkko	30
3.1	Toimintamalli yleisesti	30
3.2	Älykäs kaukolämpöjärjestelmä – 4GDH	31
3.3	Maanalainen lämpövarasto	33
4	Hukkalämmön talteenottojärjestelmä	34
4.1	Innovatiiviset lämmönvaihdin teknologiat	36
4.1.1	Levylämmönvaihdin	39
4.1.2	Vaippa-putkilämmönvaihdin	40
4.1.3	Kaksoisputkilämmönvaihdin	41
4.1.4	Spiraalilämmönvaihdin	42
4.2	Nanofluidi-seoksen hyödyntäminen lämmönsiirron tehostamisessa	43

4.3	Teollisuuden energiatehokkaat lämpöpumput	45
4.3.1	Toiminta	46
4.3.2	Mekaaninen lämpöpumppu	46
4.3.3	Absorptiolämpöpumppu	47
4.3.4	Kustannuskorrelaatio	48
4.3.5	Lämpökerroin	49
4.3.6	Kylmäaineet	49
5	Energiatehokkuuden parantaminen teollisuusympäristössä	51
5.1	ISO 50001 energiatehokkuuden johtamisjärjestelmä	53
5.2	Energiatehokkuusdirektiivi (EED)	54
6	Hukkalämmön hyödyntäminen MM-rakennuksessa	55
6.1	Hukkalämmön lähteet	56
6.2	Hukkalämmön käyttökohteet	56
6.3	Hukkalämmön talteenottojärjestelmä	57
6.3.1	Lämmityspiiri	58
6.3.2	Jäähdytyspiiri	60
7	Tulokset ja tarkastelu	62
7.1	Herkkyys- ja virhetarkastelu – energiankulutuksen normitus	62
7.2	Kaukolämmön kulutus ennen LTO-järjestelmän käyttöönottoa	64
7.3	LTO-järjestelmän käyttöönoton tulokset	66
7.3.1	Lämmityspiirin tuoma energiankulutuksen vähentyminen	69
7.3.2	Jäähdytyspiirin tuoma energiankulutuksen vähentyminen	70
7.4	Kaukolämpöverkon paluueden lämpötilan optimointi – skenaario	71
7.5	LTO-järjestelmän energiatehokkuuden toteuman analysointi	76
7.6	LTO-järjestelmän kannattavuus	79
7.7	Lämmityksen epäsuora sähköistäminen – vaikutukset	83
8	Pohdinta	85
8.1	MM-rakennuksen energiatehokkuuden parantuminen	85
8.2	Kaukolämpöverkon paluueden lämpötilan optimoinnin vaikutukset	87

8.3	LTO-järjestelmän hyödyntämisen kannattavuus	88
8.4	Hyödyntämismahdollisuudet alueen muissa kohteissa	89
8.5	Jatkotoimenpiteet ja suositukset tulevaisuudessa	89
9	Johtopäätökset	91
10	Yhteenveto	93
	Lähteet	95
	Liitteet	105
	Liite 1. Teollisuuden energiankäyttö Suomessa (Motiva, 2019, s. 16)	105
	Liite 2. Oilon lämpöpumpputjärjestelmän tekniset tiedot	106
	Liite 3. Lämmitystarveluvut 2018–2024 (°Cvrk) (ilmatieteenlaitos, 2024)	107

## Kuvat

Kuva 1.	Levylämmönvaihtimen rakenne ja toimintaperiaate (mukaillen Alfalaval, 2024).	40
Kuva 2.	Vaippa-putkilämmönvaihdin; yksi kuoripolku ja yksi putkipolku (mukaillen Zohuri, 2017).	41
Kuva 3.	Kaksoisputkilämmönvaihtimen rakenne ja toimintaperiaate (mukaillen Zwirner, 2021).	42
Kuva 4.	Spiraalilämmönvaihtimen rakenne (mukaillen, Towler & Sinnott, 2013).	43
Kuva 5.	Kokeellinen malli eräästä mikrokanava lämmönvaihtimesta (mukaillen, Chalermisinsuwana ja muut, 2022, s. 243).	45
Kuva 6.	Hukkalämmön talteenottojärjestelmän lämmityspuolen pääkuva (Schneider Electric, 2024a).	60
Kuva 7.	Hukkalämmön talteenottojärjestelmän jäähdytyspuolen ja MM403 VJK01 vedenjäähdytyskoneen pääkuva (Schneider Electric, 2024a).	61

## Kuviot

Kuvio 1.	Kysynnän ja tarjonnan vaikutukset hintaan ja tuotantoon (mukaillen, Alberta, 2024).	25
----------	---	----

Kuvio 2. Hukkalämmön potentiaalityypit (mukaillen, Agathokleous ja muut, 2017, s. 337).	26
Kuvio 3. Ehdotettu hukkalämmön potentiaalityyppien määrittäminen (mukaillen, Agathokleous ja muut, 2017, s. 337).	27
Kuvio 4. Hukkalämpöjen tekniset potentiaalit vuoden 2010 ja Motivan tekemien selvityksen pohjalta (mukaillen, Motiva, 2019).	28
Kuvio 5. Kaksisuuntaisen kaukolämmön toimintaperiaate (mukaillen Pöyry, 2016, s. 14).	31
Kuvio 6. Mekaanisen lämpöpumpun toimintaperiaate (mukaillen He ja muut, 2016, s. 4).	47
Kuvio 7. Paine-entalpiakaavio termodynaamiselle kierrolle (mukaillen He ja muut, 2016, s. 4).	47
Kuvio 8. Absorptiolämpöpumpun toimintaperiaate (mukaillen Koljonen & Sipilä, 1998, s. 13).	48
Kuvio 9. MM-rakennuksen normitettu kaukolämmön kulutus vuosilta 2018–2024 (EnerKey, 2024).	66
Kuvio 10. Hukkalämmön talteenottojärjestelmän lämpöenergian tuotto elokuu-maaliskuu väliltä vuosina 2023–2024 (Schneider Electric, 2024b).	68
Kuvio 11. Hukkalämmön talteenottojärjestelmän jäähdytysenergian tuotto elokuu-maaliskuu väliltä vuosina 2023–2024 (Schneider Electric, 2024b).	68
Kuvio 12. Hukkalämmön talteenottojärjestelmän lämpöenergian tuotto ja kohteet sekä vajaaksi jäänyt lämpöenergian määrä elokuu-maaliskuu väliltä vuosina 2023–2024.	70
Kuvio 13. Hukkalämmön talteenottojärjestelmän jäähdytysenergian tuotto ja kohteet sekä yli jäänyt jäähdytysenergian määrä elokuu-maaliskuu väliltä vuosina 2023–2024.	71
Kuvio 14. Paluuveden lämpötilan optimoinnin vaikutukset LTO-järjestelmälle lämpöenergian kasvun suhteen elokuu-maaliskuu välillä vuosina 2023–2024.	75
Kuvio 15. Hukkalämmön talteenottojärjestelmän lämpöenergian energiatehokkuuden toteuma suhteessa teoreettiseen maksimiarvon lämpöenergiaan.	78

Kuvio 16. Hukkalämmön talteenottojärjestelmän jäähdytysenergian energiatehokkuuden toteuma suhteessa teoreettisen maksimiarvon jäähdytysenergiaan.	78
Kuvio 17. ABB Oy, IEC LV Motorsin energiankulutus käyttäytymisen arvioidut muutokset vuosina 2019–2026 (mukaillen, ABB Ability, 2024b).	84

## Taulukot

Taulukko 1. Ylijäämälämmön lämpötilatasot ja ylijäämälämmön lähteet (mukaillen, Motiva, 2019, s. 18).	19
Taulukko 2. Neljännen sukupolven kaukolämpöverkon tekniset tiedot (mukaillen, Lund ja muut, 2014, s. 5).	33
Taulukko 3. Teollisuuslämpöpumppujen kylmäaineiden perusominaisuudet (mukaillen, IEA-Industry, 2014, s. 11–12).	50
Taulukko 4. Hukkalämmön lähteet ja arvioitu potentiaali (Parkkamäki, 2021).	56
Taulukko 5. Hukkalämmön käyttökohteet (ABB, 2024c).	57
Taulukko 6. Lämpimän käyttöveden laskennassa käytetyt parametrit (Mäkelä ja muut, 2022, s. 178; Kalander, 2024b).	65
Taulukko 7. Meno- ja paluuveden lämpötilan optimoinnin mitoitusarvot.	73
Taulukko 8. Kuukausittaiset keskiarvot tilavuusvirrasta lämmityspuolella (Schneider Electric, 2024b).	73
Taulukko 9. Hyödynnettävissä olevat lämpöenergian määrät optioilla 1 ja 2.	74
Taulukko 10. Keskimääräiset lämpö- ja sähköenergiat sekä keskimääräiset COP kertoimet (Schneider Electric, 2024b).	79
Taulukko 11. Sähkön ja kaukolämmön hintaan vaikuttavat muuttujat (ABB, 2024d; Vaasan Sähkö, 2024; Vaasan Sähköverkko, 2024).	80
Taulukko 12. Sähkön hinta suhteessa sähköllä tuotetun lämmön todelliseen hintaan.	82
Taulukko 13. Kaukolämmön todelliset hinnat vuosien 2016–2023 aikana (ABB, 2024d).	83

## Symboli- ja lyhenneluettelo

### Symboliluettelo

$A$	Sähköllä tuotetun lämmön todellinen hinta [€/MWh]
$a'$	Takaisinmaksuaika [mitaton]
$B$	Sähkön muuttuva hinta kyseisellä ajanhetkellä [€/MWh]
$C$	Veroluokka 1 [€/MWh]
$C, m \text{ ja } n$	Kertoimet [mitaton]
$C_B$	Kapasiteettia sisältävän laitteen peruskustannus ( $Q_B$ ) [€]
$C_E$	Laittekustannukset laitteelle, jonka kapasiteetti ( $Q$ ) [€/kW]
$c_p$	Hukkalämmön tai nesteen ominaislämpökapasiteetti [kJ/kg·K]
$c_{p,\text{vesi}}$	Veden ominaislämpökapasiteetti [kJ/kg·°C]
$c_v$	Lämmönlähteen tilavuuslämpökapasiteetti [MJ/m <sup>3</sup> K]
$D$	Sähkön siirtomaksu [€/MWh]
$D_v$	Virtaus kaarevan kappaleen ympärillä [kg/s]
$E$	Perusmaksu [€/kk]
$E_{\text{heating}}$	Lämmönlähteen lämmittämiseen käytetty energia [MJ/m <sup>3</sup> ]
$E_{\text{total}}$	Kokonaislämpönä tuotettu energia [MJ/m <sup>3</sup> ]
$F$	Tehomaksu [€/kW]
$f$	Taajuus [Hz]
$f_M$	Korjauskerroin 1 [mitaton]
$f_p$	Korjauskerroin 2 [mitaton]
$f_r$	Korjauskerroin 3 [mitaton]
$h$	Konvektiivinen lämmönsiirtokerroin [J/m <sup>2</sup> K]
$\dot{H}_x$	Entalpiavirran suuruus
$I$	Investointikustannukset [€/kW]
$i$	Korkotaso [%/100]
$k$	Nesteen lämmönjohtavuus [J/m·K]
$L_t$	Lämpöhäviöt ympäröivään ympäristöön [MJ/m <sup>3</sup> yr]
$M$	Eksponenttivakio [mitaton]

$\dot{m}$	Hukkalämmön tai nesteen massavirta [kg/s]
$n$	Vuosien lukumäärä
$Nu$	Dimensioton Nusseltin luku [mitaton]
$P_{\text{elect}}$	Sähköteho [kW]
$P_{\text{elect,avg}}$	Keskimääräinen kulutettu sähköenergia [MWh]
$Pr$	Prandtin luku [mitaton]
$Q$	Kapasiteetti [kW]
$Q_{\text{cold}}$	Kylmäteho [kW]
$Q_{\text{heat}}$	Lämpöteho [kW]
$Q_{\text{heat,avg}}$	Keskimääräinen tuotettu lämpöenergia [MWh]
$Q_{\text{kok}}$	Rakennuksen kokonaislämmitysenergiankulutus [kW]
$Q_{\text{lämmin käyttövesi}}$	Käyttöveden lämmittämisen vaatima energia [kW]
$Q_{\text{norm}}$	Rakennuksen normitettu lämmitysenergiankulutus [kW]
$Q_{\text{out}}$	Lämpöpumpun tuottama lämpöteho tai kylmäteho [kW]
$Q_{\text{toteutunut}}$	Rakennuksen tilojen lämmittämiseen kuluva energia [kW]
$Re$	Reynoldsin luku [mitaton]
$S_N$ vpkunta	Normaalivuoden tai -kuukauden (1991–2020) lämmitystarveluku vertailupaikkakunnalla [°Cvrk]
$S_{\text{toteutunut vpkunta}}$	Toteutunut lämmitystarveluku vuosi- tai kuukausitasolla vertailupaikkakunnalla [°Cvrk]
$T$	Lämpötilataso [°C]
$\Delta T$	Hyödynnettävän lämpöenergian lämpötilaero [K]
$T_{\text{alaraja}}$	Jäähdytyspuolen höyrystimen tuottolämpötilan alaraja [°C]
$T_{\text{asetusarvo}}$	Lämmityspiirin lämpötilanmittauksen asetusarvo [°C]
$\Delta T_{\text{avg-peak}}$	Huippu keskimääräinen lämpötilaero [K]
$\Delta T_i$	Lämpötilan nousun kokonaismäärä lämmönlähteen osuudelle [K]
$\Delta T_{\text{ln}}$	Logaritminen lämpötilaero [K]
$\Delta T_{\text{max}}$	Suurempi kylmän ja kuumen virran lämpötilamuutoksista [K]
$T_{\text{optio1}}$	Kaukolämpöverkon menoveden lämpötila optiolla 1 [°C]
$T_{\text{optio2}}$	Kaukolämpöverkon menoveden lämpötila optiolla 2 [°C]

$T_{\text{tod},1}$	Kaukolämpöverkon menoveden hetkellinen huippulämpötila [°C]
$T_{\text{tod},2}$	Kaukolämpöverkon menoveden hetkellinen alaraja [°C]
$\Delta T_v$	Lisäys lämmönlähteen lämpötilan noususta [K]
$T_{\text{out}}$	Lämmityspuolen tuottolämpötila [°C]
$T_1$	Lämmitettävän veden lämpötila [K]
$T_2$	Lämmitetyn veden lämpötila [K]
$\Delta T_1$	Virtojen lämpötilaero lämmönvaihtimen loppupäästä katsottuna [K]
$\Delta T_2$	Virtojen lämpötilaero lämmönvaihtimen alkupäästä katsottuna [K]
$U$	Lämmönvaihtimen kokonaislämmönsiirtokerroin [W/K]
$V$	Muuttuvat kustannukset [€/MWh]
$\dot{V}$	Tilavuusvirta [m <sup>3</sup> /s]
$V_k$	Vedenkulutus [m <sup>3</sup> ]
$W_{\text{in}}$	Lämpöpumpun vaatima sähköteho eli työ [kW]
$x_1$	Tuotannon tasapaino piste [mitaton]
$y_1$	Hinnan tasapaino piste [€]
$3600 \frac{s}{h}$	Yksikkömuunnoskerroin

### Kreikkalaiset symbolit

$\rho_{\text{vesi}}$	Veden tiheys [kg/m <sup>3</sup> ]
$\varepsilon$	Rekuperatioaste
$\theta_0$	Suurimman ja pienimmän lämpötilan välinen erotus [K]
$\phi$	Hukkalämmön lämpöteho [kW]

### Lyhenneluettelo

4GDH	4th Generation District Heating
CNO	Carbon Neutral Operations
COP	Coefficient of Performance (lämpökerroin)
CTES	Cavern Thermal Energy Storage

DPHE	Double Pipe Heat Exchanger
EED	Energiatohokkuusdirektiivi
GWP	Global Warming Potential
IEC LV	International Electrotechnical Commission Low Voltage
IHP	Industrial Heat Pump
LTO	Lämmön talteenotto
MCHE	Micro Channel Heat Exchanger
PHE	Plate Heat Exchangers
SHE	Spiral Heat Exchanger
STHE	Shell-and-Tube Heat Exchanger
THP	Thermo-Hydraulic Performance
VFD	Variable Frequency Drive
WHRS	Waste Heat Recovery System

## 1 Johdanto

Luotettavan, taloudellisen ja kestäväen energiamuodon varmistaminen sekä ilmastonmuutoksen ehkäiseminen ovat suuria 2000-luvun globaaleja haasteita. Samaan aikaan yritysten energiaturvallisuus ja omavaraisuus ovat nousseet entistä vahvemmin esille. Uusiutuva energia ja energiatehokkuuden parantaminen ovat tärkeimpiä askeleita energiapolitiikan tavoitteiden saavuttamiseksi. Tutkimukset ovat osoittaneetkin, että viimeisen kahden vuosikymmenen aikana on saavutettu merkittäviä tehokkuushyötyjä ja innovatiivisia ratkaisuja, mutta siitä huolimatta eri teollisuusalojen energiankäyttöä ja CO<sub>2</sub>-päästöjä voitaisiin vähentää edelleen (IEA-Industry, 2014, s. 17–18). Tämän tavoitteen vastaamiseksi on ehdotettu monia innovatiivisia ratkaisuehdotuksia.

Teollisuus on ala, joka käsittää laajan kirjon erilaisia tuotanto- ja valmistusprosesseja. Nämä prosessit vaativat usein merkittäviä määriä energiaa, ja prosessien sivutuotteena syntyy huomattava määrä hukkalämpöä (Johnson, Choate & David, 2008). Monet yritykset eivät hyödynnä tuotantoprosessissa syntyvää arvokasta hukkalämpöä, vaan se ohjataan usein pois rakennuksesta jäähdytysveden tai putkiston välityksellä ulkoilmaan, koska hukkalämmön talteenotto ei ole kaikissa kohteissa aina taloudellisesti kannattavaa. Samaan aikaan ilmastonmuutoksen hillitseminen vaatii yhä enemmän teollisuuden panosta ja kestäviä ratkaisuja ympäristön hyväksi. Kuitenkin Rämän ja Klobutin (2020, s. 25) mukaan energiatehokkuuden parantamiseen tähtäävät järjestelmät, kuten hukkalämmön talteenotto, tarjoavat merkittävän mahdollisuuden vähentää energiankulutusta ja tuotantokustannuksia teollisuusprosesseissa. Etenkin viime aikoina hukkalämmön talteenotto on erottunut lupaavana teknologiana sekä energiakriisin että ympäristön saastumisen torjumista estäväksi tekijäksi. Hyödyntämällä hukkalämpöä, voidaan lisätä teollisten prosessien kokonaistehokkuutta ja samalla voidaan vähentää ympäristövaikutuksia (Rämä & Klobut, 2020, s. 22–23).

Lisäksi viime aikoina maapallon lämpenemisen seurauksesta ympäristönäkökohdat ovat nousseet keskeiseen asemaan ja ilmastonmuutoksen torjunta nähdään tärkeämpänä kuin koskaan, jonka takia teollisuuden panos kestävien ratkaisujen edistämässä on

korvaamaton. Esimerkiksi Euroopan komission 2019 asettamat vaatimukset rakennusten energiatehokkuudesta teollisuudessa ovat merkittävä askel kohti kestävämpää tulevaisuutta. Vaatimus pakottaa teollisuuden parantamaan rakennusten energiatehokkuutta, mikä puolestaan rohkaisee uusien innovaatioiden ja teknologioiden käyttöönottoa energiatehokkuuden lisäämiseksi eri teollisuuden toimialoilla (European Commission, 2019). Tämä luo mahdollisuuksia teollisuuden tasapuolisen kilpailukyvyyn parantamiseen. Näin ollen energiatehokkuus on yksi tärkeimmistä parametreista, joka kuvastaa tietyn alan vaikutusta vallitsevan alueen talouskasvuun ja ympäristön saastumiseen.

### **1.1 Työn tavoitteet ja rajaus**

Diplomityö on toteutettu yritykselle ABB Oy, IEC LV Motors. Työn tutkimusstrategiana käytetään toimintatutkimusmenetelmää, jonka tarkoituksena on vaikuttaa tutkittavaan kohteeseen, sen toimintaan ja ympäristöön kehittävästi ja parantavasti (Jyväskylän yliopisto, 2015). Työn päätavoitteena on selvittää, kuinka Vaasan Strömberg Parkissa sijaitsevan MM-rakennuksen energiatehokkuutta parannetaan hukkalämmön talteenottojärjestelmän avulla. Painotus on hukkalämmön energiatehokkaassa hyödyntämisessä rakennuksen ja teollisuuden prosessien lämmitys- ja viilennystarpeiden optimaaliseen täyttämiseen. Työssä on tarkoitus vastata yrityksen antamaan tavoitteeseen ja tutkimuskysymyksiin:

- Millainen merkitys hukkalämmön talteenottojärjestelmän käyttöönotolla on case-yrityksen energiatehokkuuteen?
  - Voidaanko kaukolämpöverkon paluueden lämpötila optimoida suhteessa ulkolämpötilaan?
  - Kuinka sähkön ja kaukolämmön muuttuvat hinnat vaikuttavat järjestelmän kustannuksiin ja kannattavuuteen?

## 1.2 Aineisto

Toimintatutkimuksen aineistona käytetään tieteellisiä ja vertaisarvioituja tutkimuksia, raportteja, kirjoja ja verkosta löytyviä materiaaleja. Työn laskelmissa ja kuvioissa esite-tyissä lukuarvoissa käytetään ABB Oy, IEC LV Motors, MM-rakennuksesta saatuja aineis-toja, jotka ovat peräisin hukkalämmön talteenottojärjestelmän (LTO-järjestelmä) raken-nusautomaation datapankista. Työn aikana on kerätty yhtäjaksoisesti tietoa hukkaläm-mön kertymisestä kuukausitasolla. Laskentaa varten on kerätty tietoa hukkalämmön vir-tausnopeuksista, tilavuusvirrasta ja lämpötilajakaumista. Lisäksi on kerätty tietoa kauko-lämmön kulutuksesta MM-rakennuksessa vuosilta 2018–2023 ennen hukkalämmön tal-teenottojärjestelmän käyttöönottoa. Tätä tietoa verrataan vuosiin 2023–2024, jolloin talteenottojärjestelmä on otettu käyttöön. Kaikki yrityksiltä saatu aineisto on salattu yri-tyssalaisuuksien säilyttämiseksi. Salattu aineisto on merkattu [Rajattu pääsy] mukaisesti. Työssä on tehty yhteistyötä Granlund Oy:n ja Schneider Electric Finland Oy:n kanssa.

## 1.3 Työn eteneminen

Työn alussa johdanto luvussa (luku 1) lukijalle annetaan yleiskuva diplomityön aiheesta ja kerrotaan työn tutkimusstrategiasta, tavoitteista ja rajauksista, aineistosta sekä yrityss-ittelystä. Tämän jälkeen perehdytään kirjallisuuskatsaukseen (luvut 2–5), joissa ilme-nee järjestelmään liittyvä kirjallisuus ja hyödynnetyt teoriat sekä laskelmissa käytettävät laskentayhtälöt. Kirjallisuuskatsauksessa kerrotaan hukkalämmön lähteistä ja potentiaa-lista teollisuusympäristössä. Samalla johdatellaan kaksisuuntaisen kaukolämpöverkon integroimiseen hukkalämmön talteenottojärjestelmässä. Tämän jälkeen kerrotaan huk-kalämmön talteenottojärjestelmästä sekä lämpöpumpuista ja niiden merkityksestä jär-jestelmässä sekä suorituskertoimen (COP) vaikutuksesta energiatehokkuuteen. Työn me-netelmä osiossa (luku 6) siirrytään lämmönlähteiden paikallistamiseen ja hyödyntämis-kohteiden kartoitukseen sekä kerrotaan talteenottojärjestelmän toiminnasta. Tämän jäl-keen siirrytään tutkimaan, kuinka hukkalämmön talteenottojärjestelmän käyttöönotto on parantanut MM-rakennuksen energiatehokkuutta. Tulokset ja pohdinta luvuissa (lu-vut 7–8) kerrotaan työn tuloksista ja saavutuksista sekä pohditaan niiden merkitystä työn

kontekstissa. Johtopäätökset luvussa (luku 9) kerrotaan työn anti. Lopuksi yhteenveto luvussa (luku 10) käydään läpi diplomityön keskeisimmät lopputulokset.

## 1.4 Yritysesittely

**ABB Oy, International Electrotechnical Commission Low Voltage (IEC LV) Motors** keskittyy korkean hyötysuhteen sähkömoottorien valmistukseen, tuotekehitykseen ja tutkimiseen (ABB, 2024a; ABB, 2024b). Vaasan ABB Oy valmistaa LV moottoreita kaikille teollisuuden osa-alueille asiakkaan vaatimuksien mukaisesti. Yritys tarjoaa laajan valikoiman tuotteita ja palveluita, jotka tekevät energiajärjestelmistä ja teollisuusprosesseista entistä tehokkaampia, kestävämpiä ja älykkäämpiä. ABB Oy, IEC LV Motors tukee kestävä kehitystä ja yksi sen kestävä kehityksen hankkeista on Carbon Neutral Operations (CNO) (ABB, 2024b).

**Granlund Oy** on yritys, joka tarjoaa monipuolisia ja innovatiivisia suunnittelu- ja konsultointipalveluita rakennus-, kiinteistö-, ja energia-alalla (Granlund, 2024a). Yritys on perustettu vuonna 1960 ja sillä on vahva kokemus erilaisten kiinteistöprojektien parissa. Granlund Oy keskittyy tarjoamaan kestäviä ja energiatehokkaita ratkaisuja asiakkailleen. Palveluihin kuuluu muun muassa rakennusten suunnittelu, kiinteistöjen hallinta, sisäilma- ja energia-analyysi sekä teknisen järjestelmän suunnittelu (Granlund, 2024a).

**Schneider Electric Finland Oy** on osa maailmanlaajuista Schneider Electric -konsernia ja se tarjoaa energiahallinnan ja automaation ratkaisuja Suomessa (Schneider, 2024). Schneider Electric on sitoutunut tarjoamaan innovatiivisia ja kestäviä teknologioita asiakkailleen eri toimialoilla. Sen palvelut ja tuotteet kattavat laajasti sähkö- ja automaatio-ratkaisuja, jotka linkittyvät energiatehokkuuden parantamiseen, älykkäisiin rakennusratkaisuihin sekä teollisuusautomaatioon (Schneider, 2024).

## 2 Teollisuuden hukkalämpö

Hukkalämpö eli tässä kontekstissa teollisuuslämpö määritellään (Entrain, 2021, s. 3–4; Johnson, Choate & David, 2008) mukaan väistämättömäksi lämpöhukaksi, jota syntyy teollisuustuotteista, laitteista ja prosesseista johtumisen, konvektion ja säteilyn kautta siirtyvän lämpöhäviön sekä polttoprosesseista vapautuvan lämmön välityksellä. Valitettavan usein sivutuotteena syntyvää lämpöenergiaa ei hyödynnetä uusiokäyttöön tuotannon prosesseissa, vaan se ohjataan suoraan ympäristöön.

Teollisuuden valmistusprosessien energiatehokkuuden parantaminen on välttämätöntä, kuten monet tutkimukset ovat osoittaneet. Teollisuuden osuus maailmanlaajuisesta energian kysynnästä on merkittävä, kattaen noin kolmanneksen kokonaiskulutuksesta (IEA, 2012). Tulevaisuudessa odotettavissa oleva energiankulutuksen kasvu ja fossiilisten polttoaineiden väheneminen asettavat haasteita, jotka on otettava huomioon energiankäyttäytymisessä. Lisäksi teollisuuden nopea kasvu ja elintason nousu ovat johtaneet tilanteeseen, jossa hukkaan menevän energian määrä tulee kasvamaan väistämättä lähi vuosien aikana. IPCC (2022, s. 66) raportin mukaan todetaan, että teollisuuden suorat ja epäsuorat päästöt nousevat nopeammin kuin muilla toimialoilla metsä- ja kemianteollisuudessa. IPCC:n raportin mukaan 24 % maailman suorista kasvihuonekaasupäästöistä syntyi teollisuudesta vuonna 2019. Kun otetaan huomioon suorat ja epäsuorat päästöt, kasvihuonekaasupäästöjen osuus vuonna 2019 kasvaa peräti 34 %:iin. Vertailukohteena tilastokeskuksen (2018) mukaan Suomessa teollisuuden energiankäyttö oli noin 144 TWh vuonna 2017. Tästä osuudesta käytettiin noin 68 % polttoaineisiin, 22 % sähköön ja loput 10 % lämpöön.

Tilanne asettaa paineita teollisuudelle etsiä kestäviä ratkaisuja energiankulutuksen ja hukkalämmön hallintaan. Tehokkaammalla lämmön talteenotolla ja uusiutuvien energiamuotojen käytön lisäämisellä voitaisiin vähentää sekä energiankulutusta että ympäristövaikutuksia. Tulevaisuudessa teollisuuden rooli kestävästä energiantuotannosta edelläkävijänä voikin olla ratkaisevaa maailmanlaajuisen ilmastotavoitteiden saavuttamisessa.

## 2.1 Yleistä hukkalämmöstä

Hukkalämmön hyödyntämispotentiaalia määrittäessä ensimmäinen vaihe on hukkalämmön lähteiden tunnistaminen ja kartoittaminen tutkittavassa kohteessa. Lisäksi tulee huomioida käytettävä hyödyntämisteknologia. Hukkalämmön hyödyntämisteknologiat jaetaan pääasiassa kahteen luokkaan: passiiviseen ja aktiiviseen teknologiaan. Aktiivinen teknologia hyödyntää lämpöä suoraan käyttöön ja passiivinen teknologia hyödyntää alemman lämpötilatason hukkalämpöä, muuttaen sen korkeamman tason lämpötilaksi lämpöpumppujen avulla (Brückner ja muut, 2015, s. 158).

Hukkalämpö luokitellaan lämpötilatasojen mukaan pääsääntöisesti matalan, keskitason ja korkean tason hukkalämpöön (Motiva, 2019, s. 18). Matalan tason hukkalämpöä on alle 50 °C, keskitason hukkalämpö vastaavasti 50–100 °C välillä ja korkean tason hukkalämpö yli 100 °C. Taulukon 1 mukaisesti työn case-kohteena olevalla MM-rakennuksella syntyy pääsääntöisesti matalan tason hukkalämpöä prosessien jäähdytysvedestä, koneellisista ilmanvaihtokoneista ja prosessien poistoilmavirtojen kautta, joista koneellinen ilmanvaihto on merkittävin hukkalämmön lähde. Taulukossa 1 on listattu yleisimmät teollisuuden ylijäämälämmön lähteet sekä prosesseista syntyvät lämpötilat Motivan (2019, s.18) tutkimuksen mukaan.

**Taulukko 1.** Ylijäämälämmön lämpötilatasot ja ylijäämälämmön lähteet (mukaillen, Motiva, 2019, s. 18).

Lämpötilataso	Ylijäämälämmön lähteet
< 50 °C	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Erilaiset prosessien jäähdytysvedet ja jätevedet</li> <li>• Koneellisen jäähdytyksen lauhde-energia</li> <li>• Prosesseihin liittyvät poistoilmavirrat</li> </ul>
50–100 °C	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Erilaiset prosessien jäähdytysvedet</li> <li>• Erilaiset lämpövirrat tai poistohöyryt</li> <li>• Öljyvuideltujen paineilmakompressoreiden jäähdytys</li> </ul>
> 100 °C	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Savukaasut</li> <li>• Prosessien kuumat poistokaasut esimerkiksi sulatusuuneilta</li> </ul>

## 2.2 Hukkalämmön lähteet

Seuraavassa osiossa tarkastellaan Suomen teollisuudenalojen erityispiirteitä ja tyypillisiä hukkalämmönlähteitä sekä saatavilla olevan hukkalämmön lämpötilatasoja ja teollisuusalojen tyypillisiä prosessilämpötiloja pääpiirteittäisesti.

### 2.2.1 Teknologiateollisuus

Teknologiateollisuuden erityispiirteenä on huomattava hiilikädenjälki, mikä tekee hukkalämmön talteenotosta positiivisesti merkittävää ympäristön näkökulmasta. Energiankulutuksen näkökulmasta kiinteistötekniikka ja teollisuuden prosessit ovat merkittävin osa teknologiateollisuuden energian kokonaiskulutuksessa (Motiva, 2021, s. 42–43). Tyypillisesti teknologiateollisuuden prosessien lämpötilat vaihtelevat 100–200 °C välillä, ja korkeimmat lämpötilat voivat ylittää lämpökäsittelyprosesseissa jopa 150 °C. Tämä tekee hukkalämmöistä peräisin olevista lämmönlähteistä moninaisia, kuten maalaus- ja lämpökäsittelyuunit, kuivausprosessit sekä erilaiset poistoilmat ja savukaasut (Motiva, 2021, s. 42–43; Motiva, 2019, s. 18).

Koska hukkalämpöjen lämpötilat vaihtelevat paljon eri prosessien mukaan, voidaan hukkalämpöä hyödyntää monissa prosesseissa teollisuuden energiatehokkaiden lämpöpumppujen avulla. Lämpöpumpuilla on mahdollista hyödyntää myös matalan lämpötilan hukkalämpöä (Motiva, 2021, s. 42–43). Ainoastaan korkean lämpötilan lämpökäsittelyprosesseja ei voida hyödyntää lämpöpumppujen avulla, vaan ne hyödynnetään aktiivisella teknologialla suoraan käyttöön teollisissa prosesseissa. Lisäksi teknologiateollisuudessa on tarve kiinteistöjen jäähdytykselle ja lämmitykselle, mikä avaa merkittävän mahdollisuuden hyödyntää hukkalämpö virtoja näissä kohteissa. Kiinteistötekniikka tarjoaa-kin parhaimmat käyttökohteet hukkalämpö virtojen tehokkaaseen hyödyntämiseen, kuten Motivan (2021, s. 42–43) tutkimukset ovat osoittaneet.

### 2.2.2 Metsäteollisuus

Metsäteollisuus toimii Suomen merkittävimpänä energiankäyttäjänä teollisuudenaloista, kuten liitteestä 1 käy ilmi. Noin 80 % energiankulutuksesta kohdistuu polttoaineiden käyttöön. Toimialalla suoritetaan useita vedenpoisto- ja kuivausprosesseja, joiden lämpötila-alue vaihtelee riippuen lopputuotteen laatuvaatimuksista. Erityisesti sellunkeitto, kartongin kuivaus, vanerin, viilun ja paperin valmistus edellyttävät lämpötila-alueita, jotka vaihtelevat 95–125 °C välillä (Agathokleous ja muut, 2017, s. 339–340). Vaikka metsäteollisuudessa tarvittavat kuivauslämpötilat voivat olla hieman matalampia esimerkiksi sahateollisuudessa noin 70–80 °C, tietyissä prosesseissa tarvitaan jopa 800–1100 °C lämpötiloja (Agathokleous ja muut, 2017, s. 339–340).

Hukkalämpö virtojen käyttökelpoisuutta voidaan arvioida myös Brückner ja muut (2015) tutkimuksen perusteella, joka määritteli metsäteollisuuden hukkalämpö virtojen olevan tyypillisesti saatavilla 50–120 °C lämpötiloissa. Esimerkiksi prosessin lauhdehöyry on 50–90 °C välillä (Brückner ja muut, 2015, s. 160).

### 2.2.3 Kemianteollisuus

Kemianteollisuus on Suomen toiseksi suurin energiankäyttäjä teollisuudenaloista, kuten liitteestä 1 nähdään. Kemianteollisuudessa valtaosa käytetyistä polttoaineista on vielä fossiilisia, jonka takia alalla on kasvava tarve siirtyä pois fossiilisista polttoaineista ja mahdollisesti sähköistää prosesseja (Motiva, 2021, s. 36–37).

Kemianteollisuudessa prosessien lämpötilat vaihtelevat tyypillisesti noin 50–1500 °C välillä. Kuitenkin suurin osa kemianteollisuuden prosesseista tapahtuu 100–300 °C välimaastossa (Arpagaus ja muut, 2018, s. 2). Esimerkiksi erotusprosesseissa, joita ovat haihdutus, tislaukset ja kuivaus, käytettävät lämpötilat voivat olla melko matalia. Haihdutuksessa vaaditaan usein vain noin 95–105 °C lämpötiloja (Brückner ja muut, 2015). Osa kemianteollisuuden hukkalämmöistä liikkuvat myös 50–300 °C lämpötila-alueella, kuten prosesseissa syntyvät lauhdevedet ja jäähdytysvedet. Vastaavasti kuivausprosesseista

peräisin olevat hukkalämmöt liikkuvat välillä 90–230 °C (Brückner ja muut, 2015, s. 160–162).

#### **2.2.4 Metalliteollisuus**

Metalliteollisuus muodostaa Suomen kolmanneksi suurimman energiankäyttäjän teollisuudenaloista, joka nähdään liitteestä 1. Energiankulutus metalliteollisuudessa jakautuu tasaisesti sähkön (n. 45 %) ja polttoaineiden (n. 55 %) välillä. Fossiilisten polttoaineiden, erityisesti hiilen merkittävä käyttö metalliteollisuudessa vaatii kehittämistä kohti kestävämpiä vaihtoehtoja. Metalliteollisuuden prosessit, kuten esilämmitysuunit ovat jo sähköistettyjä. Metalliteollisuudelle on tyypillistä energiaa vievät prosessit, erityisesti terästeollisuudessa, jotka heijastuvat koko maan energiankäyttöön (Motiva, 2021, s. 38–39).

Metalliteollisuuden prosessien lämpötilat vaihtelevat huomattavasti. Teollisuudenalalla on korkealämpöisiä prosesseja, kuten hehkutus, sulatus, valu ja karkaisu, joissa lämpötilat voivat nousta jopa 500–1000 °C (Agathokleous ja muut, 2017, s. 336–337). Toisaalta on myös prosesseja, joiden vaatimat lämpötilat ovat melko matalia, liikkuen 50–200 °C välimaastossa. Näitä matalalämpöisiä prosesseja ovat muun muassa erilaiset kuivausprosessit, peittäus, esilämmitys, fosfointi sekä maalausprosessit.

#### **2.2.5 Elintarviketeollisuus**

Elintarviketeollisuus on Suomen neljänneksi suurin energiankuluttaja teollisuudenaloista, kuten liitteestä 1 käy ilmi. Vaikka sen osuus koko teollisuuden energiankulutuksesta on suhteellisen pieni, vain n. 3 %, on elintarviketeollisuus merkittävä kohde hukkalämpöjen hyödyntämisen näkökulmasta. Elintarviketeollisuudessa lämpö muodostaa (n. 50 %) energiankulutuksesta ja sähkö vastaavasti (n. 35 %). Loput (n. 25 %) kuluu muihin energianmuotoihin (Motiva, 2021, s. 40–41).

Elintarviketeollisuuden prosessien lämpötilat ovat yleensä alhaisempia verrattuna muihin suuriin teollisuudenaloihin. Tyypillisesti prosessien lämpötilat vaihtelevat välillä 20–

250 °C. Korkeimmat lämpötilat saavutetaan uuneissa, kun taas suurin osa prosesseista vaatii lämpötiloja 50–150 °C. Näihin kuuluvat esimerkiksi kuivaus- ja haihdutusprosessit (Arpagaus ja muut, 2018, s. 2–3). Muita esimerkkejä ovat liuottamis- ja alkalointiprosessien lämpötilat 45–130 °C sekä jäähdytysjärjestelmistä saatavan lämmöntalteenoton lämpötilat, jotka ovat tyypillisesti 50–60 °C välillä (Agathokleous ja muut, 2017, s. 339–340).

### 2.3 Hukkalämmön hyödyntämiseen vaikuttavat tekijät

Hukkalämmön hyödyntämiseen vaikuttavia tekijöitä voidaan tarkastella hyvinkin laajalla skaalalla. Ne voivat olla esimerkiksi teknisiä, taloudellisia tai lainsäädännöllisiä. Tässä tapauksessa on perusteltua tarkastella ainoastaan teknisiä rajoitteita. Alla on listattuna päätekijät, jotka vaikuttavat hukkalämmön hyödyntämiseen ja sen kannattavuuteen enimmäkseen teknisellä tasolla (Heikkilä & Kiuru, 2014, s. 10–13):

- lämpötilataso ( $T$ )
- entalpiavirran suuruus ( $\dot{H}_x$ )
- lämpövirran väliaine ja faasi (kaasu, höyry, neste ja ilma)
- väliaineen kemialliset ominaisuudet
- väliaineen puhtaus.

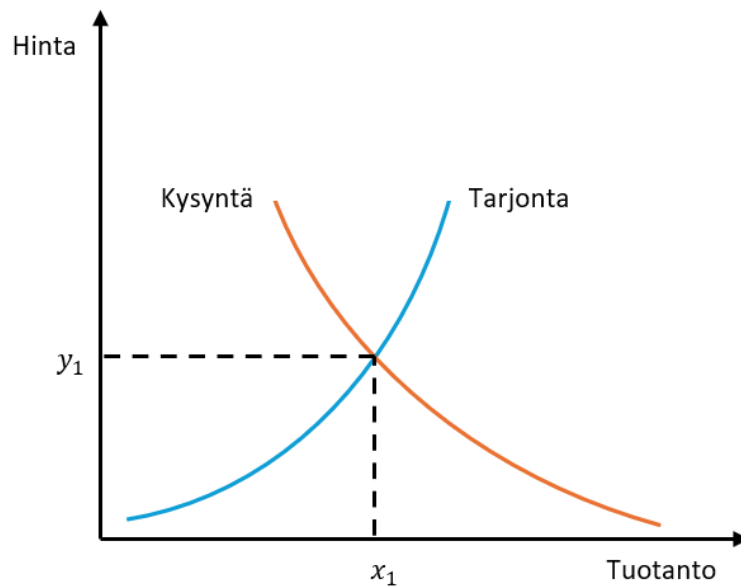
Mikäli jokin yllä mainituista tekijöistä on epäsuotuisa, vaikuttaa tämä hukkalämmön hyödyntämismahdollisuuksiin (Heikkilä & Kiuru, 2014, s. 10–13). Tutkimukset ovat osoittaneet, että vaikka potentiaalia hukkalämmön hyödyntämiseen olisi runsaasti, se ei välttämättä ole taloudellisesti kannattavaa, jos yksi yllä mainituista tekijöistä on epäsuotuisa. Tässä tapauksessa hukkalämmön hyödyntäminen saattaa olla mahdotonta. Yksi yleisin tekijä on riittämätön lämpötilataso suoraan hukkalämmön hyödyntämiseen teollisuuden prosesseissa. Lämpötilatasoa voidaan kuitenkin helposti nostaa esimerkiksi lämpöpumpujen avulla. Tämä parantaa kokonaisuuden energiatehokkuutta ja investoinnin kannattavuutta merkittävästi (Heikkilä & Kiuru, 2014, s. 10–13).

## 2.4 Vaikuttavat tekijät kiinteistötasolla

Hukkalämmön optimaalinen hyödyntäminen vaatii tasaisuutta ja ennustettavuutta tuotannossa suhteessa kysyntään. Mitä vaihtelevampaa hukkalämmön tuotanto on suhteessa kysyntään, sitä haastavampaa sen hyödyntäminen on (Entrain, 2021, s. 7–8). Tämä lisää varastoinnin tarvetta ja vaihtoehtoisten lämmönlähteiden käyttöä, erityisesti silloin kun hukkalämmön tuotanto on epäsäännöllistä tai sen määrää on vaikea arvioida. Tämä voi tehdä hukkalämmön hyödyntämisestä taloudellisesti kannattamatonta. Sekä hukkalämmön talteenoton että varalämmöntuotannon kustannukset kasvavat yleensä liian suuriksi, jotta niiden käyttö olisi kannattavaa (Bröckl ja muut, 2014, s. 17–20). Kuviossa 1 on esitetty kysynnän ja tarjonnan vaikutuksista hintaan ja tuotantoon. Tuotanto ja hinta ovat tasapainossa, kun kysynnän ja tarjonnan käyrät leikkaavat kuvion 1 kohdissa  $x_1$  ja  $y_1$  (Alberta, 2024).

Suurimmat rajoitteet liittyvät hukkalämmön lämpötilatasoon, sen saatavuuden varmuuteen ja ajalliseen sopivuuteen suhteessa kulutukseen (Bröckl ja muut, 2014, s. 17; Heikkilä & Kiuru, 2014, s. 11–12). Teollisuusprosessit eivät aina tuota hukkalämpöä tasaisella tahdilla, ja tuotanto voi keskeytyä, mikä voi vaatia varalämmönlähteen käyttöä lisäkustannuksilla ja saattaa tehdä hukkalämmön hyödyntämisestä kannattamatonta. Jos hukkalämpöä voidaan hyödyntää samassa prosessissa, sen ajallinen yhteensopivuus yleensä paranee ja häiriötilanteiden riski pienenee. Lämmön varastointi voi myös parantaa ajallista yhteensopivuutta ja hukkalämmön toimintavarmuutta. Lisäksi on tärkeää arvioida syntyvän hukkalämmön tehoa ja lämpötilaa suhteessa kulutuskohteen lämmöntarpeisiin.

Hukkalämmön lähteen sijainnilla on merkitystä lämmön tuotantoprosessissa. Hukkalämpöä voi syntyä pieniä määriä monissa eri kohdissa prosessia tai suurempia määriä muutamissa keskitetyissä kohdissa (Entrain, 2021, s. 7). Investointikustannukset  $I$  ovat yleensä pienemmät jälkimmäisessä vaihtoehdossa, sillä lämmöntalteenottoa vaativaa teknologiaa tarvitaan vähemmän.



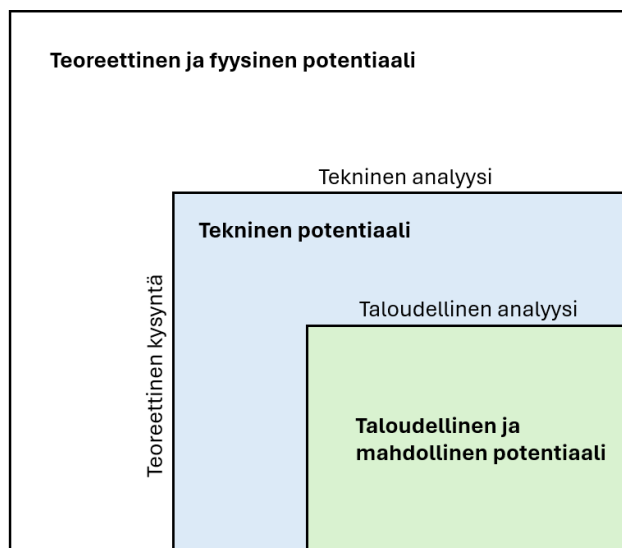
**Kuvio 1.** Kysynnän ja tarjonnan vaikutukset hintaan ja tuotantoon (mukaillen, Alberta, 2024).

## 2.5 Potentiaali

Brueckner ja muiden (2014, s. 165) mukaan hukkalämmön potentiaali arvioidaan kolmella potentiaalityypillä: teoreettinen ja fysikaalinen potentiaali, tekninen potentiaali sekä mahdollinen potentiaali, joka viittaa taloudelliseen näkökulmaan. Potentiaalityypit ovat esitettyinä kuviossa 2 ja sen mukaan teoreettinen ja fyysinen potentiaali huomioi fyysiset rajoitukset eli ympäristön lämpötilan yläpuolella olevan lämmön, joka on sitoutunut johonkin väliaineeseen. Esimerkiksi säteilyn kautta diffuusisti eli tasaisesti vapautuva lämpö jätetään arvioimatta. Nämä rajoitukset määrittelevät teknisen potentiaalin eli potentiaali riippuu hyvin paljon käytetyistä tekniikoista. Tekniset rajoitukset voivat liittyä esimerkiksi järjestelmän toiminnan mahdollistavaan vähimmäislämpötilaan tai lämmönsiirron aiheuttamiin lämpöhäviöihin ja siten vaikuttaa potentiaalin määrään (Brueckner ja muut, 2014, s. 165).

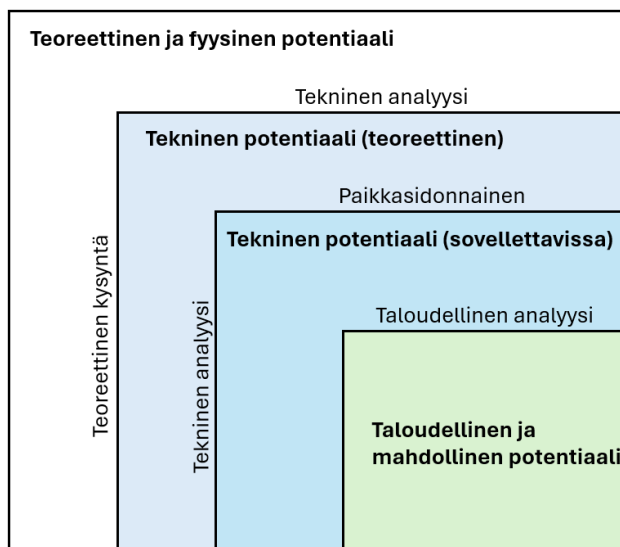
Hukkalämmön käytön tekniset mahdollisuudet määritellään kahdella suurella, jotka oleellisesti hallitsevat rajoituksia: käytetyn teknologian reunaehdot ja kohteen välttämätön lämmitys- tai jäähdytystarve (Agathokleous ja muut, 2017, s. 336–337). Lopuksi kuviossa 2 mahdollisen potentiaalin näkökulma ottaa huomioon taloudellisen potentiaalin,

jota kutsutaan usein myös toteutettavissa olevaksi potentiaaliksi. Siinä tarkastellaan rahallisia parametreja, kuten energianhintoja [€/MWh], korkotasoa  $i$  ja takaisinmaksuikoja  $a'$  (Agathokleous ja muut, 2017, s. 336–337; Brueckner ja muut, 2014, s. 165).



**Kuvio 2.** Hukkalämmön potentiaalityypit (mukaien, Agathokleous ja muut, 2017, s. 337).

Agathokleous ja muiden (2017, s. 336–337) mukaan kuvio 2 on esitetty toinen mahdollinen hukkalämmön potentiaalimäärittäminen. Tämä on esitetty kuviossa 3 ja siinä hukkalämmön teoreettinen ja fyysinen potentiaali määritellään kuvion 2 mukaisesti. Vastaavasti tekninen potentiaali jaetaan teoreettiseen ja sovellettavissa olevaan. Menetelmä poikkeaa siinä määrin, että kuviossa 2 tekninen potentiaali lasketaan käyttämällä teoreettista tai yleiseen prosessiin liittyvää analyysia, kun taas kuvion 3 mukaan lasketaan käyttämällä paikan päällä olevia tarkkoja tietoja koko laitoksesta ja otetaan huomioon mallinnetut parametrit, jolloin kyseessä on paikkasidonnainen analyysi. Kuvion 3 menetelmillä saavutetaan täten luonnollisesti realistisemmat tulokset ja teknologian toteutettavuus voidaan analysoida taloudellisten kriteerien avulla, kuten myös kuviossa 2. Kuviossa 3 niin ikään mahdollisen potentiaalimäärittämisessä otetaan huomioon taloudellisen potentiaalimäärittäminen, jota kutsutaan usein myös toteutettavissa olevaksi potentiaaliksi.

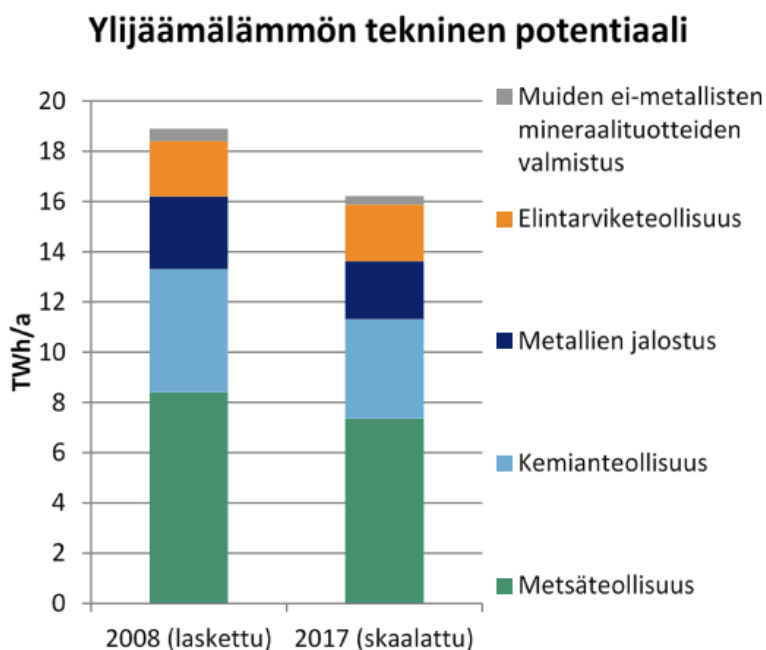


**Kuvio 3.** Ehdotettu hukkalämmön potentiaalityyppien määrittäminen (mukaan, Agathokleous ja muut, 2017, s. 337).

Suomen teollisuudella on suuri rooli energian loppukulutuksessa. YIT:n laatimassa selvityksessä vuonna 2010 arvioitiin, että Suomen teollisuuden ylijäämälämmön teknisesti hyödynnettävissä olevan hukkalämmön määrä olisi n. 19 TWh vuodessa, joka on esitetty kuvion 4 vasemmassa pylväskaaviossa (Motiva, 2019, s. 15). Arvio perustui Suomen vuoden 2008 energiankulutus tietoihin. Kuitenkin Motivan vuonna 2019 tekemän tutkimuksen mukaan käyttämällä vuoden 2017 teollisuuden energiankäytön tilastoja, Suomen teollisuuden hukkalämpöjen teknisen potentiaalın arvioitiin olevan vain n. 16 TWh vuodessa, joka on esitetty kuvion 4 oikeassa pylväskaaviossa. Arvion todetaan olevan hyvin lähellä vuoden 2010 selvityksen laskennallista potentiaalia, mutta sen pieneneminen pohjustetaan Suomen teollisuuden energiankäytön yleisen vähentymisen kautta 2010-luvulla. Motivan selvityksen mukaan metsäteollisuudessa olisi edelleen suurin potentiaali hukkalämmöille, joka on n. 7 TWh (Motiva, 2019, s. 15–16).

Hukkalämpöjen teknisen potentiaalın arvioinnissa on otettu huomioon lämpöpumppujen rooli. Tutkimuksissa oletetaan, että lämpöpumput ovat merkittäviä mahdollistajia hukkalämpöjen tehokkaassa hyödyntämisessä. Erityisesti matalien hukkalämpöjen hyödyntämisessä lämpöpumput ovat keskeisessä roolissa, sillä lämpöpumppujen avulla voidaan nostaa lämpötilatasoa tehokkaasti ylöspäin. Motivan tutkimuksessa käytettiin

teollisuuslämpöpumppujen tuottamien maksimaalisten lämpötilojen arviointia, joka oli n. 80 °C (Motiva, 2021, s. 29–30). Lämpötila perustuu siihen olettamukseen, että Suomen kaukolämpöverkon keskimääräinen lämpötila on välillä 65–115 °C, jolloin 80 °C on kokemusperäisesti hyväksi todettu välimaasto. Nykyään on jo mahdollista saavuttaa yli 100 °C:n lämpötiloja teollisuuslämpöpumpuilla. Tämän vuoksi Motiva on esittänyt uusia arvioita hukkalämpöjen teknisestä potentiaalista olettaen lämpöpumppujen maksimaalisten tuottolämpötilojen olevan 100 °C ja jopa 150 °C (Motiva, 2021, s. 30). Maksimaalisen tuottolämpötilan ollessa 100 °C, tekninen potentiaali kasvaisi noin 2,5 TWh vuodessa, saavuttaen jopa noin 18,5 TWh teknisen hyödyntämispotentiaalin. Vastaavasti 150 °C:n lämpötilalla tekninen hyödyntämispotentiaali nousisi 20 TWh:iin (Motiva, 2021, s. 30–31). Lämpötilojen kasvun odotetaan avaavan uusia sovelluskohteita ja polkuja teollisuuden prosessien hukkalämpöjen hyödyntämiseen, mikä selittää hukkalämpöjen hyödyntämispotentiaalin korkeaa kasvumarginaalia.



**Kuvio 4.** Hukkalämpöjen tekniset potentiaalit vuoden 2010 ja Motivan tekemien selvityksen pohjalta (mukaillen, Motiva, 2019).

## 2.6 Hukkalämmön energiamarkkina-arvo

Hukkalämmön hyödyntäminen voidaan suunnata keskitetysti erityisesti niihin energiamarkkinoilta hankittuihin energioihin, kuten lämpöenergiaan ja sähköenergiaan, joita teollisuusyritys ensisijaisesti hyödyntää prosesseissaan. Hukkalämmön käytöstä syntyviä säästöjä voidaan mitata suorassa energianhankinnassa energiamarkkinoilta tai vastaavasti vähentyneessä tarpeessa hankkia polttoaineita omalle energiantuotannolle. Näin ollen voidaan yksityiskohtaisesti arvioida hukkalämmön tuottamaa taloudellista arvoa eri näkökulmista, kuten säästettyä energiaa kohden [€/MWh] (Energiateollisuus, n.d.). Esimerkiksi, kun hukkalämmön talteenottojärjestelmällä tuotettu lämpöenergia pumpataan kaksisuuntaiseen kaukolämpöverkkoon, se vähentää oleellisesti yrityksen ostettavaa kaukolämmön tarvetta, jolloin luonnollisesti muuttuvien kustannuksien  $V$  määrä laskee.

Toisaalta GNF (2020, s. 10) loppuraportin mukaan hukkalämmön arvoa voidaan tarkastella myös sen perusteella, kuinka paljon hiilidioksidipäästöjä kohde pystyy vähentämään [t/CO<sub>2</sub>], ja tämä voidaan mallintaa hyödyiksi päästökaupassa [€/t/CO<sub>2</sub>], joka on merkittävässä roolissa erityisesti globaaleissa yrityksissä. Hukkalämmön arvoa nostaa päästökauppadirektiivi, joka astui voimaan 2021 Euroopan unionin sisäpuolella (GNF, 2020, s. 34–35). Lisäksi hukkalämmön arvoa voidaan arvioida myös energiayhtiön näkökulmasta, joka voisi ostaa hukkalämpöä [€/MWh] suoraan sen tuottajilta. Tämä voisi tapahtua tilanteessa, jossa teollisuusyritys tuottaa hukkalämpöä yli tarpeiden ja tarjoaa hukkalämpöä energiayhtiölle. Haittapuolena ilmenee kesäaika, jolloin syntyy merkittävää hukkalämpöä, eikä tälle lämpöenergialle ole esimerkiksi MM-rakennuksessa riittävästi käyttökohteita, kuten kiinteistöjen lämmityksessä (Pöyry, 2016, s. 13–15).

Laajemmassa mittakaavassa hukkalämpöpotentialin hyödyntämisellä voi olla vaikutusta tarvittavien voimalaitosinvestointien määrään valtakunnallisella tasolla. Tämän toteutuksen saavuttaminen tarvitsee kuitenkin poliittisia muutoksia, koska hukkalämmön talteenottojärjestelmien investointikustannukset  $I$  ovat vielä merkittävät, eikä kaikilla yrityksillä ole voimavaroja investoida talteenottojärjestelmiin.

### 3 Kaksisuuntainen kaukolämpöverkko

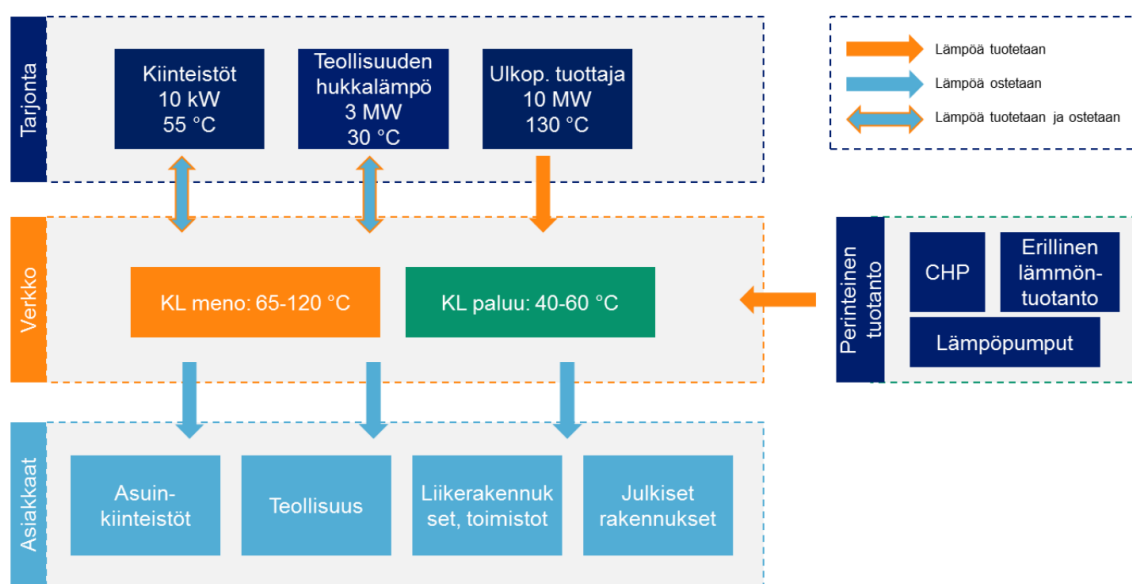
Nykyinen kaukolämpöverkon toimintamalli ilmentää rajoitettua joustavuutta tulevaisuuden kulutusprofiilien ja kokonaiskulutuksen muutoksille. Toimintaympäristön muutokset, erityisesti rakennusten energiatehokkuuden parantaminen, aiheuttavat muutoksia sekä kaukolämmön kokonaiskulutuksessa että kulutusprofiilissa (Lund ja muut, 2014, s. 1). On todennäköistä, että tulevaisuudessa huipunkäyttöajat vähenevät, mikä vaikuttaa lämmöntuotannon rakenteeseen ja huipputehon optimaaliseen mitoittamiseen. Tämä painottaa tarvetta kehittää kaukolämpöinfrastruktuuria, joka hyödyntää tehokkaasti jo olemassa olevaa infrastruktuuria rakennelman perustana (Lund ja muut, 2014, s. 2–3). Tämä edellyttää älykkyyden integroimista verkkoon, jotta eri osa-alueet tukisivat toisiaan kulutuksen ja tuotannon vaihtelun välimaastossa (Pesola ja muut, 2011, s. 4). Tutkimuksien mukaan esille nousee kaksisuuntainen kaukolämpöverkko, joka yhdistää kaukolämmön ja kiinteistökohtaiset energiantuotantoratkaisut. Yhdistetyllä järjestelmällä saadaan hyödynnettyä tehokkaasti teollisuudessa ja kiinteistöissä syntyviä hukka- ja ylijäämälämpöjä halutuissa kohteissa (Pöyry, 2016, s. 4–5).

#### 3.1 Toimintamalli yleisesti

Kaksisuuntainen kaukolämpöverkko on lämmitysmarkkinoille luotu järjestelmä, joka mahdollistaa kaukolämpöverkkoa käyttävien asiakkaiden kaukolämmön ostamisen tai vastaavasti mahdollisuuksien mukaan oman lämpötuotannon tai ylijäämälämmön myymisen kaukolämpöyhtiölle (Energiateollisuus, 2016, s. 1). Kaksisuuntainen kaukolämpöverkko on integroitu kokonaisuus, joka mahdollistaa kaukolämmön tuotannon ja hajautettujen lämmöntuotantoratkaisujen liittämisen kaukolämpöverkkoon. Esimerkiksi teollisuuden hukkalämpö on potentiaalinen lämmönlähde liitettäväksi kaukolämpöverkkoon (Energiateollisuus, 2016, s. 1–2).

Kaksisuuntaiset kaukolämpöverkot parantavat oleellisesti teollisuuden tai pienien tuotantokohteiden kannattavuutta integroida järjestelmänsä kaukolämpöverkkoon (Pöyry, 2016, s. 4–12). Tuotantokohteissa syntyvä hukkalämpö voi olla kannattavaa siirtää

kaukolämpöjärjestelmiin. Tuotantokohteista saatu hukkalämpö vähentää kaukolämpöyhtiön polttoaineiden käyttöä ja hyöty ympäristölle on merkittävä, koska kasvihuonekaasupäästöjen määrä vähenee. Samaan aikaan kaukolämpöyhtiön lämmöntuotannon tarve pienenee (Pöyry, 2016, s. 4–12). Kuitenkin usein kaksisuuntainen kaukolämpöverkko edellyttää asiakkaalta suuria muutoksia lämmitysjärjestelmiin, jotka vaativat mittavat investointikustannukset. Tästä syystä muutos toteutetaan lähes aina uudisrakennuksien yhteydessä. Kuviossa 5 on esitetty kaksisuuntaisen kaukolämmön periaatekuva. Kuvion 5 esimerkkitapauksessa nähdään, että verkkoa syötetään perinteisillä menetelmillä sekä lämpöpumpuilla, jotka pumppaavat kiinteistön ylijäämlämpöä verkkoon muille käyttäjille. Lisäksi verkkoon päin syötetään lämpöä kiinteistöistä sekä teollisuusympäristöistä saatavaa hukkalämpöä. Lämpöä saadaan myös ulkopuolisilta kuluttajilta.



**Kuvio 5.** Kaksisuuntaisen kaukolämmön toimintaperiaate (mukaillen Pöyry, 2016, s. 14).

### 3.2 Älykäs kaukolämpöjärjestelmä – 4GDH

Älykkäällä kaukolämpöjärjestelmällä viitataan useisiin määritelmiin, joissa korostuvat erityisesti kysyntäjousto ja hajautettu energiantuotanto. Pesolan ja muiden (2011, s. 17–18) mukaan älykäs kaukolämpöverkko on kokonaisuus, jossa lämpöenergiaa tuotetaan joustavalla tuotantorakenteella, yhdistäen hajautetun ja keskitetyn lämmöntuotannon.

Kulutushuippuja pyritään ohjaamaan lämpövarastoilla ja kulutuksen ohjauksella, ja tuotannossa hyödynnetään mittaustietoja sekä reaaliaikaista ohjausta. Hinnoittelumallit tukevat älykkään teknologian mahdollisuuksia, kuten asiakkaiden palkitsemista rahallisesti kysyntäjouston perusteella (Pesola ja muut, 2011, s. 17; Lund ja muut, 2014, s.1–2).

Lund ja muut (2014, s. 1–2) määrittelevät älykkään kaukolämpöjärjestelmän perustuvan sähkön ja kaukolämmön verkostojen integrointiin sekä niiden optimaaliseen toteutukseen. Siinä keskitetty ja hajautettu lämmöntuotanto ovat osa järjestelmää, ja uusiutuvat energiamuodot ovat keskeinen osa järjestelmän tuotantoprofiilia. Asiakkaat voivat osallistua markkinoille omalla panoksellaan esimerkiksi pumppaamalla verkkoon tuotettua hukkalämpöä lämpöpumppujen avulla. Haasteita ovat kuitenkin matalan lämpötilan lämmönlähteiden hyödyntäminen ja mittausdatan laajamittainen kerääminen erilaisiin datapankkeihin (Lund ja muut, 2014, s. 2–3). Kaukolämpöverkko sisältää jo nyt älykkyyttä eri osa-alueilla, kuten lämmön tuotantolaitteisto, jakeluverkosto, lämmönsiirtimet, lämpövarastot ja käytönvalvonta. Verkon älykkyydellä pyritään erityisesti optimoimaan eri lämmöntuotantomuotojen ajojärjestystä, käytön optimointia ja kysynnän joustoa (Pesola ja muut, 2011, s. 4–6).

Neljännän sukupolven kaukolämpöverkko eli 4th Generation District Heating (4GDH) viittaa älykkääseen uuden sukupolven kaukolämpöverkkoon. Neljäs sukupolvi kuvaa tulevaisuuden kaukolämpöä, jossa korostetaan matalan lämpötilan kaukolämpöä, komponenttien kehitystä ja joustavia putkimateriaaleja, jotka kestävät maaperän tuottamaa routa- ja maankohoamisrasitusta paremmin. Kaukolämpöverkkojen on tarkoitus vastata haasteisiin, kuten lämmittää matalan lämpötilan tuotannolla sekä olemassa olevaa että uutta rakennuskantaa taulukon 2 mitoitustietojen mukaisesti, vähentää häviöitä ja hyödyntää paremmin hukkalämpö virtoja. Neljännän sukupolven verkkojen odotetaan myös kykenevän vuorovaikutukseen muiden älykkäiden energiaratkaisujen kanssa kokonaisjärjestelmän optimoimiseksi (Lund ja muut, 2014, s. 2–3). Taulukossa 2 on eriteltyä Lundin ja muiden (2014, s. 5) tunnistamat tekijät neljännän sukupolven kaukolämpöverkosta.

**Taulukko 2.** Neljännen sukupolven kaukolämpöverkon tekniset tiedot (mukaillen, Lund ja muut, 2014, s. 5).

<b>Sukupolvi</b>	4. sukupolvi
<b>Kuvaus</b>	4GDH
<b>Aikakausi</b>	2020–2050
<b>Lämmön siirtoaine</b>	Matalan lämpötilan neste (70 °C / 30 °C)
<b>Lämmönsiirrin tyyppi</b>	Levyllämmönsiirrin ja lämmönjakokeskus
<b>Rakennukset</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Uudisrakennukset (&lt; 25 kWh/m<sup>2</sup>)</li> <li>- Olemassa olevat rakennukset (50–150 kWh/m<sup>2</sup>)</li> </ul>
<b>Lämpöpatterityypit</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Lattialämmitys</li> <li>- Matalan lämpötilan (50 °C) lämpöpatterit</li> <li>- Epäsuora kaukolämpöveden hyödyntäminen</li> </ul>

### 3.3 Maanalainen lämpövarasto

Kaukolämpöä voidaan varastoida maanalaisiin lämpövarastoihin myös lämmityskauden ulkopuolella. Esimerkiksi Vaasan alueella toimivan Vaasan Sähkön yksi keskeinen tavoite on kaukolämpövarastojen avulla energiatehokkuuden maksimointi ja energiaturvallisuuden varmistaminen. Vuonna 2020 käyttöön otettu Vaasan Vaskiluodon maanalainen kaukolämpövarasto eli Cavern Thermal Energy Storage (CTES) on suunniteltu siten, että siihen voidaan varastoida esimerkiksi teollisuuden hukkalämpöä silloin, kun lämmöntarve on yleisesti alhainen (GNF, 2020, s. 17). Lämpövaraston lataus- ja purkuteho on peräti 100 MW, joka mahdollistaa merkittävän hyödyn. Vastaavanlainen järjestelmä on suunnitella MM-rakennuksessa, mikäli käytöstä poistettu maanalainen öljysäiliö löydetään alueelta ja se kytetään integroimaan hukkalämmön talteenottojärjestelmän yhteyteen toimivaksi kokonaisuudeksi (Kalander, 2024a). Tällöin voidaan hyödyntää lämpövaraston lämpöenergiaa lämmitystarpeen kasvaessa ja vähentää riippuvuutta kalliimmista fossiilisista polttoaineista. Lisäksi lämpövaraston avulla voidaan tasata lämmöntuotannon ja -kulutuksen välistä epätasaisuutta, mikä edelleen parantaa energiatehokkuutta. Kaukolämpövarastojen ylläpidolla ja hallinnalla on myös merkittävä rooli kaukolämpöjärjestelmän tehokkaassa toiminnassa (GNF, 2020, s. 17).

## 4 Hukkalämmön talteenottojärjestelmä

Energiatehokkuutta pidetään yhtenä keskeisimmistä strategioista hillitä kasvavaa maailmanlaajuista energian kysyntää ja siten vähentää kasvihuonekaasupäästöjen vapautumista ilmakehään. Energiatehokkuus liittyy kykyyn tuottaa tai kuluttaa energiaa tehokkaasti, minimoiden energiahävikit ja optimoiden energiankäyttö-prosessit. Kasvava ympäristövaikutuksista on lisännyt paineita etenkin teollisuudelle ryhtyä toimiin energiatehokkuuden parantamiseksi. Hukkalämmön talteenottojärjestelmät ovat yksi keskeinen tekniikka energiatehokkuuden lisäämiseksi erityisesti teollisissa prosesseissa ja energiantuotannossa. Tämän lisäksi teollisuuden hukkalämmön talteenottosovelluksien teknologisia kehityksiä ohjaa tietyt strategiset tekijät, kuten kannattavuus, taloudellisuus ja lämmönlähteen lämpötila sekä saatavuus (Rämä & Klobut, 2020, s. 10–11).

Hukkalämmön talteenottojärjestelmä eli Waste Heat Recovery System (WHRS) mahdollistaa lämmön talteenoton tuotannon prosesseista tai laitteista, joissa lämpöä muodostuu ja perinteisesti menetetään ilmakehään (Almahmoud ja muut, 2018, s. 269). Talteen otettu hukkalämpö siirretään kaasun tai nesteen välityksellä takaisin järjestelmään ylimääräisenä energialähteenä. Järjestelmät voivat kattaa laajan kirjon sovelluksia, kuten teollisuuden uunit, jäähdytysjärjestelmät ja muut lämmönlähteet kuten ilmanvaihtokoneet ja porakaivoveden hyödyntäminen. Ylimääräistä energialähdettä voidaan käyttää lämmitys- ja jäähdytystarpeisiin tai sähköisen ja mekaanisen tehon tuottamiseen (Parkkamäki, 2021; Reddy & Naidu, 2017). Erityisesti tässä työssä tutkitaan case-kohteen eli MM-rakennuksen hukkalämmön käyttöä lämmitys- ja jäähdytystarpeiden täyttämiseen.

Rämän ja Klobutin (2020, s. 10–11) mukaan hukkalämmön talteenottojärjestelmä kykenee hyödyntämään korkean-, keskitason- ja matalan tason hukkalämpöä. Tämä tarkoittaa sitä, että mitä korkeampi lämpötila sitä korkeampi hukkalämmön laatu. On tärkeää löytää tuotannon prosessissa mahdollisimman korkeatasoinen lämmönlähde (Rämä & Klobut, 2020, s. 10–11). Lämmönlähteen laatuun vaikuttavat lämpötilan lisäksi kohteen potentiaali ja saatavuuden vaihtelu. Esimerkiksi MM-rakennuksen ilmanvaihtokoneiden poistoilman ja paineilmakompressorien hyödyntäminen lämmönlähteenä ovat

potentiaalisia vaihtoehtoja (Parkkamäki, 2021). Ilmanvaihtokoneet ja paineilmakompressorit toimivat ympäri vuorokauden, joten lämmönlähteen saatavuus on tasaista. Lisäksi kohteet takaavat riittävän lämpötilatason ja merkittävän potentiaalin.

Energiatehokkuuden edistäminen ei vähennä vain energiakustannuksia ja ympäristövaikutuksia, vaan se parantaa myös yritysten kilpailukykyä ja kestävyyttä pitkällä aikavälillä. Hukkalämmön talteenottojärjestelmien käyttöönotto edustaa käytännön lähestymistapaa tavoitteen saavuttamiseksi, edistäen samalla kestäväää ja vastuullista liiketoimintaa (Almahmoud ja muut, 2018, s. 284–285). Alla olevassa kaavassa (1) on esitetty laskentayhtälö hyödynnettävissä olevalle teoreettiselle häviölämpövirralle, joka hukkalämmöstä saadaan teollisuuden määritetyssä prosessissa:

$$\phi = c_p \cdot \dot{m} \cdot \Delta T, \quad (1)$$

missä

$\phi$  = Hukkalämmön lämpöteho [kW]

$c_p$  = Hukkalämmön lähteen ominaislämpökapasiteetti [kJ/kg·K]

$\dot{m}$  = Hukkalämmön lähteen massavirta [kg/s]

$\Delta T$  = Hyödynnettävän lämpöenergian lämpötilaero [K].

Hukkalämmön tuotantoarvot voidaan laskea käyttämällä Yesiller ja muut (2005) lähestymistapaa kaavassa (2). Menetelmä perustuu siihen olettamukseen, että jokaisessa lämmönlähteessä vakaan enimmäislämpötilan saavuttaneet kohteet valitaan laskelmiin, jolloin tulos saadaan osumaan mahdollisimman hyvin toivottujen raja-arvojen välille. Tuotettu lämpöenergia lasketaan seuraavasti:

$$E_{\text{heating}} = \sum_{i=1}^n \Delta T_v \cdot c_v, \quad (2)$$

missä

$E_{\text{heating}}$  = Lämmönlähteen lämmittämiseen käytetty energia [MJ/m<sup>3</sup>]

$\Delta T_v$  = Lisäys lämmönlähteen lämpötilan noususta [K]

$c_v$  = Lämmönlähteen tilavuuslämpökapasiteetti [ $\text{MJ}/\text{m}^3\text{K}$ ].

Lämmitys edustaa sitä lämpöenergiaa, joka tarvitaan nostamaan tietyn lämmönlähteen lämpötilaa määrällä, joka vastaa huippu keskilämpötilaeroa. Huippu keskimääräistä lämpötilaeroa  $\Delta T_{\text{avg-peak}}$  tietylle paikalle käytettiin lämpötilan nousun  $\sum \Delta T_i$  kokonaismäärää lämmönlähteen osuudelle (Yesiller ja muut, 2005).

Lopuksi yllä esitetyn kaavan (2) avulla voidaan määrittää kokonaislämmöntuotanto muilta kuin yhden vuoden ajalta. Lisäksi kaavan avulla voidaan määrittää lämmönlähteiden tuottamat kokonaislämpöhäviöt ympäröivään ympäristöön tai tilaan. Kokonaislämpönä tuotettu energia voidaan laskea käyttämällä kaavaa (3):

$$E_{\text{total}} = E_{\text{heating}} + n \cdot L_t, \quad (3)$$

missä

$E_{\text{total}}$  = Kokonaislämpönä tuotettu energia [ $\text{MJ}/\text{m}^3$ ]

$E_{\text{heating}}$  = Lämmönlähteen lämmittämiseen käytetty energia [ $\text{MJ}/\text{m}^3$ ]

$n$  = Vuosien lukumäärä

$L_t$  = Lämpöhäviöt ympäröivään ympäristöön [ $\text{MJ}/\text{m}^3\text{yr}$ ].

#### 4.1 Innovatiiviset lämmönvaihdin teknologiat

Lämmönvaihdin on laite, joka siirtää lämpöenergiaa kahden tai useamman eri lämpötilassa olevan neste- tai kaasuvirran välillä konvektiivisen lämmönsiirron periaatteiden mukaisesti. Lämmönvaihtimia käytetään yleisesti nesteiden lämmittämiseen ja jäähdyttämiseen sekä yksittäisten tai monikomponenttisten liuosten haihduttamiseen ja kondensointiin (Shah & Sekulić 2003, s. 32–33). Niitä hyödynnetään myös lämmön talteenotossa, joka on tutkimuskohteena tässä työssä. Hukkalämmön hyödyntämiseen lämmönvaihtimien avulla vaaditaan lämpötilatasoltaan käyttökohteeseen sopiva

hukkalämpövirta ja riittävä lämpötilaero. Mikäli riittävää lämpötilaeroa ei saada, voidaan sitä korvata kasvattamalla hukkalämmön lämpötilatasoa lämpöpumppujen avulla.

Useimmiten lämmönvaihtimessa olevat nesteet ovat eristettyinä toisistaan väliaineella, joka toimii lämmönsiirtopintana. Tätä tyyppiä kutsutaan rekuperaattoriksi. Joissakin lämmönvaihtimissa kylmä ja kuuma neste syötetään vuorotellen lämmönvaihtimeen, mikä mahdollistaa lämpöenergian siirron ensin kuumasta nesteestä lämmönvaihtimen rakenteisiin ja sieltä edelleen kylmään nesteeseen. Tällaisissa tapauksissa käytetään lämpöä varaavia komponentteja lämmönsiirtopintoina, ja tällaista laitetta kutsutaan vastaavasti regeneraattoriksi (Shah & Sekulić 2003, s. 33–36; Motiva, 2017, s. 3–4).

Lämmönvaihtimen toiminta perustuu lämpötilaeroihin eli vaihtimien nesteiden sisään- uloslämpötilat eroavat niiden ulostulolämpötiloista, jolloin lämpöä siirtyy termodynamiikan toisen pääsäännön mukaisesti korkeammasta lämpötilasta matalampaan lämpötilaan lämpötilagradientin suuntaisesti. Lämmönvaihtimen lämpöteho voidaan laskea, kun tiedetään virtaavan nesteen massavirta, ominaislämpökapasiteetti ja sisään- sekä ulostulon lämpötilat (Motiva, 2017, s. 4). Lämmönvaihtimen lämpöteho lasketaan kaavan (4) mukaisesti:

$$\phi = c_p \cdot \dot{m} \cdot \Delta T = U \cdot \Delta T_{\ln}, \quad (4)$$

missä

$\phi$  = Lämpöteho [kW]

$c_p$  = Nesteen ominaislämpökapasiteetti [kJ/kg·K]

$\dot{m}$  = Nesteen massavirta [kg/s]

$\Delta T$  = Nesteen lämpötilanmuutos lämmönvaihtimen yli [K]

$U$  = Lämmönvaihtimen kokonaislämmönsiirtokerroin [W/K]

$\Delta T_{\ln}$  = Logaritminen lämpötilaero [K].

Logaritminen lämpötilaero voidaan esittää seuraavasti kaavan (5) mukaan:

$$\Delta T_{\ln} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}}, \quad (5)$$

missä

$\Delta T_{\ln}$  = Logaritminen lämpötilaero [K]

$\Delta T_1$  = Virtojen lämpötilaero lämmönvaihtimen loppupäästä katsottuna [K]

$\Delta T_2$  = Virtojen lämpötilaero lämmönvaihtimen alkupäästä katsottuna [K].

Lämmönvaihtimen tehokkuutta kuvastaa rekuperaatioaste, joka voidaan esittää seuraavasti kaavan (6) mukaan:

$$\varepsilon = \frac{\Delta T_{\max}}{\theta_0}, \quad (6)$$

missä

$\varepsilon$  = Rekuperaatioaste

$\Delta T_{\max}$  = Suurempi kylmän ja kuuman virran lämpötilamuutoksista [K]

$\theta_0$  = Suurimman ja pienimmän lämpötilan välinen erotus [K].

Rekuperaatioaste  $\varepsilon$  kuvaa sitä osuutta lämmöstä, mikä on teoreettisesti mahdollista ottaa talteen. Paras energiatehokkuus saavutetaan, kun lämpötilaero  $\Delta T_{\max}$  on mahdollisimman suuri. Tämä edellyttää hyvää lämmönsiirtoa virtauksen välillä, mikä saavutetaan hyvällä kokonaislämmönsiirtokertoimella  $U$ . Logaritminen lämpötilaero  $\Delta T_{\ln}$  määräytyy virtausten välisistä lämpötilaeroista. Vakionopeuksilla lämmönsiirtokertoimiin vaikuttaa merkittävästi lämmönsiirtopintojen puhtaus olemassa olevassa lämmönvaihtimessa. Tämän takia lämmönvaihtimien säännöllinen puhdistus on energiatehokkuuden kannalta erityisen tärkeää. Ulkoinen prosessi voi myös asettaa rajoituksia lämmönvaihtimen energiatehokkuudelle, sillä virtausnopeuksien rajoittaminen voi alentaa lämmönsiirtokertoimia (Motiva, 2017, s. 4). On myös huomattava, että lämmönvaihtimen painehäviöt ovat osa vaihtimen energiatehokkuutta. Lisääntynyt tarve pumppaukseen tai puhallukseen kasvattaa yleensä sähköenergian tarvetta. Tämän lisäksi likaantuneet

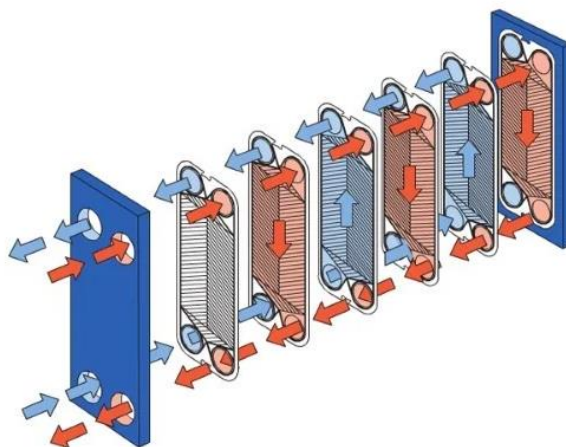
lämmönsiirtopinnat heikentävät energiatehokkuutta kasvattaen samalla painehäviöitä (Motiva, 2017, s. 4).

#### 4.1.1 Levylämmönvaihdin

Levylämmönvaihdin eli Plate Heat Exchanger (PHE) koostuu useista ohuista ruostumattomista teräslevyistä, jotka on poimutettu eri tavoin optimaalisen lämmönsiirron saavuttamiseksi. Levyjen poimuttaminen lisää lämmönsiirtopinta-alaa jopa 10 % verrattuna samankokoiseen tasaiseen levyyn. Levyjen muotoilun tukipisteet pitävät levyt erillään, luoden kanavia, joiden läpi neste virtaa lämmönvaihtimessa. Nestevirtaus tulee kanavaan ja poistuu levyjen kulmissa olevien aukkojen kautta. Kuvassa 1 on havainnollistettu, kuinka väliaineet kulkevat vastakkaisiin suuntiin levyjen eri puolilla. Joka toisen levyparin välissä virtaa kuuma väliaine ja joka toisen levyparin välissä vastaavasti kylmä väliaine. Levyjen ja niiden reikien reunustat on varustettu tiivisteillä estämään sisäisen sekoittumisen ja vuodot (Das ja muut, 2008, s. 1–6; Majstorović ja muut, 2017, s. 1–4).

Levylämmönvaihtimet ovat suunniteltu neste–neste lämmön siirtämiseen. Niitä voidaan soveltaa myös muihin käyttötarkoituksiin, kuten nesteen ja kaasun väliseen siirtoon tai kaasun ja kaasun väliseen siirtoon. Parhaimmat toimintaolosuhteet levylämmönvaihtimille ovat lämpötila-alueella (-195 – +220 °C), käyttöpainella 0–25 bar ja virtausmäärillä 0,3–1000 kg/s (Das ja muut, 2008, s. 1–6; Majstorović ja muut, 2017, s. 1–4).

Levylämmönvaihdin on erinomainen viskoosien aineiden käsittelyssä sen profiililevyjen ansiosta. Levyjen kuviointi parantaa virtauksen turbulenttisuutta, mikä edistää vaihtimien puhdistettavuutta ja lämmönsiirtoa. Virtausperiaate perustuu vastavirtausperiaatteeseen, mikä takaa optimaalisen lämmönsiirron. Levylämmönvaihdin on huomattavasti vähemmän altis likaantumiselle verrattuna putkilämmönsiirrintyyppiin. Se soveltuu erityisen hyvin tilanteisiin, joissa lämpötilaero aineiden välillä on pieni (Das ja muut, 2008, s. 2–4).

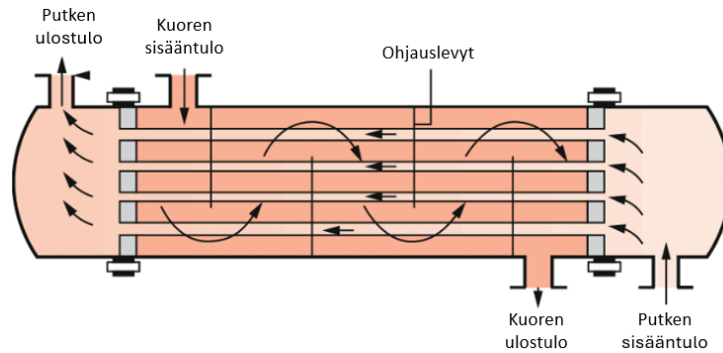


**Kuva 1.** Levylämmönvaihtimen rakenne ja toimintaperiaate (mukaillen AlfaLaval, 2024).

#### 4.1.2 Vaippa-putkilämmönvaihdin

Yksi yleisimmistä lämmönsiirrintyypeistä teollisissa sovelluksissa on putkilämmönvaihdin, erityisesti vaippa-putkilämmönvaihdin eli Shell-and-Tube Heat Exchanger (STHE). Vaippa-putkilämmönvaihdin koostuu kuoresta, joka toimii paineastiana (Cengel & Ghajar, 2011, s. 629–635). Kuoren sisällä on huomattava määrä putkinippuja ja kuoren sisällä olevan vaipan ja putkinippujen akselit ovat samansuuntaisia. Lämmönsiirto tapahtuu kuvan 2 mukaisesti siten, että ensimmäinen väliaine virtaa putkien sisällä samalla, kun toinen väliaine virtaa putkien ulkopuolella vaipan läpi. Väliaine syötetään säiliöön etupäätykappaleen kautta, mistä se jakautuu muihin putkiin. Putkista väliaine jatkaa säiliön toiselle puolelle takapäätykappaleeseen, mistä se poistuu säiliöstä ulostuloaukon kautta kuvan 2 mukaisesti. Ohjauslevyt vaippapuolella ohjaavat väliaineen virtausta säiliön poikki, parantaen lämmönsiirron tehokkuutta. Putkilämmönsiirtimet voidaan luokitella rakenteensa mukaan kaksoisputki-, vaippaputki- ja ripaputkilämmönvaihtimiin (Cengel & Ghajar, 2011, s. 629–635).

Yleisimpiä käyttökohteita vaippa-putkilämmönvaihtimille ovat hydraulijölyn ja -nesteiden jäädytys moottoreissa, vaihteistoissa ja hydraulijärjestelmissä (Cengel & Ghajar, 2011, s. 629–635). Kuvassa 2 havainnollistetaan vaippa-putkilämmönvaihtimen yleistä toimintaperiaatetta.

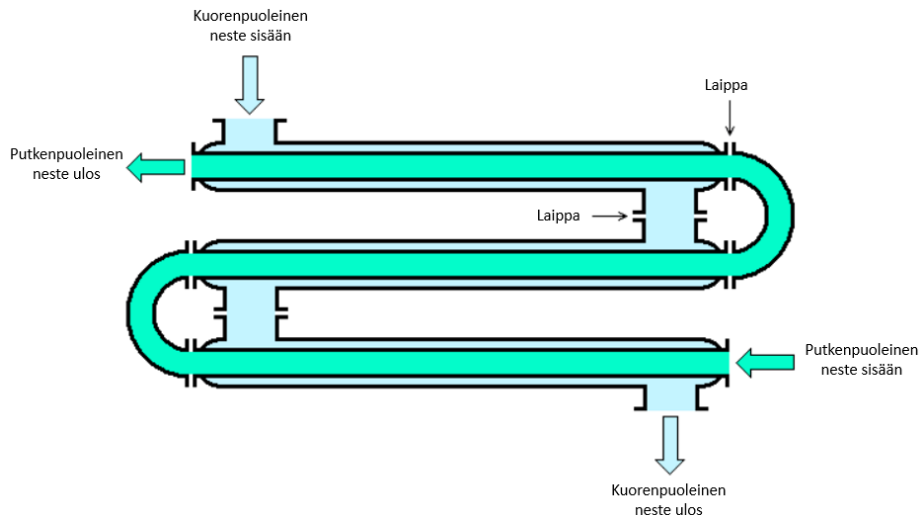


**Kuva 2.** Vaippa-putkilämmönvaihdin; yksi kuoripolku ja yksi putkipolku (mukaan Zohuri, 2017).

#### 4.1.3 Kaksoisputkilämmönvaihdin

Yksinkertaisimmillaan kaksoisputkilämmönvaihdin eli Double Pipe Heat Exchanger (DPHE) muodostuu kahdesta putkesta, jotka ovat sisäkkäin. Kuvan 3 mukaan toisessa putkessa virtaa ensimmäinen väliaine, kun taas toisen putken sisällä on tila toista väliainetta varten. Väliaineet ovat samaa fluidia ja ne virtaavat vastakkaisiin suuntiin suhteessa toisiinsa nähden, mikä mahdollistaa optimaalisen lämmönsiirtotehon käytetyllä lämmönsiirtopinta-alalla (Dhirgham & Mustafa, 2021, s. 2–7). Kaksoisputkilämmönvaihtimia hyödynnetään yleisesti matalilla virtaamilla ja laajoilla lämpötila-alueilla. Ne soveltuvat erityisen hyvin kohteisiin, joissa toinen tai molemmat aineista virtaavat korkeassa paineessa. Niitä käytetään tilanteissa, joissa tarvitaan enintään 50 m<sup>2</sup> lämmönsiirtopinta-alaa. Sisempi putki voi koostua useammasta putkesta (Dhirgham & Mustafa, 2021, s. 2–7).

Kaksoisputkilämmönvaihtimien haittapuolina ovat niiden suurempi koko ja kustannukset suhteessa lämmönsiirtopinta-alaan, kun verrataan tätä perinteiseen putkilämmönvaihtimeen. Kuvassa 3 on esitettyä kaksoisputkilämmönvaihtimen periaatekuva.



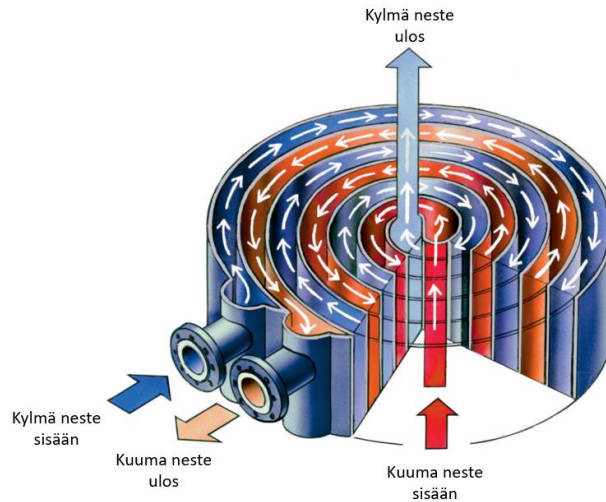
**Kuva 3.** Kaksoisputkilämmönvaihtimen rakenne ja toimintaperiaate (mukaiillen Zwirner, 2021).

#### 4.1.4 Spiraalilämmönvaihdin

Spiraalilämmönvaihdin eli Spiral Heat Exchanger (SHE) rakentuu kahdesta taivutetusta levyistä, jotka muodostavat yhdessä spiraalin ja säilyttävät keskinäisen etäisyyden vakiona suhteessa toisiinsa. Lämmönvaihtimessa kuumat ja kylmät nestevirtaukset kulkevat kanavissa vastakkaisiin suuntiin, jota on havainnollistettu kuvassa 4. Towler ja Sinnott (2013, s. 928) mukaan spiraalilämmönvaihtimen erityispiirteenä on tiivisteiden puuttuminen, mikä mahdollistaa lämmönvaihtimen käytön jopa 400 °C:n lämpötilassa ja 25 bar. Spiraalilämmönvaihdin osoittaa erinomaista soveltuvuutta prosesseihin, joissa lämpötilaero virtausten välillä on pieni (Towler & Sinnott, 2013, s. 928; Danfoss, 2024).

Spiraalilämmönvaihdin soveltuu erityisesti likaantumista ja kuitujen läsnäoloa sisältäville virtausaineille, koska sillä on itsensä puhdistava ominaisuus. Lisäksi lämmönvaihdin soveltuu erittäin likaisille prosessinesteille ja lietteille, joita syntyy esimerkiksi teollisuusympäristöissä. Itsensä puhdistava ominaisuus perustuu siihen, että likaavan aineen kertyessä johonkin kohtaan, lämmönvaihtimen virtauspoikkipinta-ala pienenee, mikä lisää virtausnopeutta ja irrottaa kertyneen aineen nopeasti. Spiraalilämmönvaihdin on erinomainen lauhtuville prosesseille, joissa tarvitaan lauhtuvan aineen alijäähtymistä. Lisäksi se mahdollistaa pienen painehäviön, joka on yleensä vaikeampi saavuttaa esimerkiksi

putkilämmönvaihtimella (Towler & Sinnott, 2013, s. 928; Danfoss, 2024). Kuvassa 4 on esitetty spiraalilämmönvaihtimen rakenne sekä kuuman ja kylmän ainevirran suunnat (Towler & Sinnott, 2013, s. 928; Danfoss, 2024).



**Kuva 4.** Spiraalilämmönvaihtimen rakenne (mukaillen, Towler & Sinnott, 2013).

## 4.2 Nanofluidi-seoksen hyödyntäminen lämmönsiirron tehostamisessa

Perinteisellä lämmönvaihtimella on rajoituksia, kuten laitteiston koko, asennustila ja joustavuus. Mikrokanava lämmönvaihdin eli Micro Channel Heat Exchanger (MCHE) on yksi teknologia näiden rajoitusten ratkaisemiseksi. Chalermssinsuwana ja muiden (2022, s. 240–241) mukaan tutkimukset ovat osoittaneet, että mikrolämmönvaihtimissa nanofluidien käyttö parantaa lämmönvaihtimen lämmönsiirto hyötysuhdetta sekä vähentää lämmönvaihtimen massaa 26 % ja tilavuutta 60 %.

Esimerkiksi 3 % painopitoisuuden omaava titaanioksidi-vesi nanoneste ( $\text{TiO}_2/\text{vesi}$ ) kykeni korkeimman termohydraulisen suorituskyvyn eli Thermo-Hydraulic Performance (THP) arvoon määritellyissä käyttöolosuhteissa, eikä vaatinut yhtä paljon pumpun tehoa, kun tulosta verrattiin pelkän veden kanssa (Chalermssinsuwana ja muut, 2022, s. 240–241). Vastaavasti alumiinioksidi-vesi nanoneste ( $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{vesi}$ ) saavutti 31 % korkeamman Nusselt-luvun sekä 14 % suuremman lämmönsiirtokertoimen verrattuna tulosta pelkän

veden kanssa. Pienen määrän nanokokoisia hiukkasia sisältävän nesteen lämmönsiirron parantamisen periaate on lämmönjohtavuuden ja turbulenssin lisääminen suspendoituneiden nanohiukkasten läpi.

Tuckermanin tutkimus osoitti, että putkien pienentyneet halkaisijat lisäävät lämmönsiirtokerrointa (Almomani, 2023). Myös Nusselt-luku pysyy vakiona erityisesti pinnan va-kiolämpötilassa täysin kehittyneellä alueella  $Nu = 3,657$ , joka esitetään kaavassa (7):

$$Nu = \frac{h \cdot D_v}{k} = C \cdot Re^m \cdot Pr^n, \quad (7)$$

missä

$Nu$  = Dimensioton Nusseltin luku

$h$  = Konvektiivinen lämmönsiirtokerroin [ $J/m^2K$ ]

$D_v$  = Virtaus kaarevan kappaleen ympärillä [ $kg/s$ ]

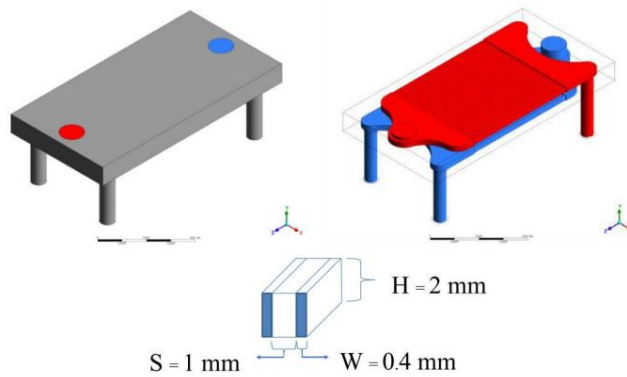
$k$  = Nesteen lämmönjohtavuus [ $J/m \cdot K$ ]

$Re$  = Reynoldsin luku [mitaton]

$Pr$  = Prandtlin luku [mitaton]

$C, m$  ja  $n$  = Kertoimet [mitaton].

Kaava (7) osoittaa, että mikrokanavavaihtimien kanavan halkaisijan pienentäminen parantaa lämmönsiirtonopeutta (Almomani, 2023). Nanohiukkaset seuraavat Brownin liikettä, jossa hiukkaset etenevät nesteessä törmäyksen seurauksena ja niitä pidetään lämmönsiirtona kiinteästä kiintoaineeseen sekä hiukkasesta hiukkaseen, mikä lisää lämmönjohtavuutta prosessin aikana. Brownin liikkeen aiheuttama hiukkasten liike on hitaampaa siirtämään suuria lämpömääriä nanonesteiden läpi. Nanofluidi hiukkaset muodostavat kuitenkin klustereita, mikä parantaa lämmönjohtavuutta (Almomani, 2023). Kuvassa 5 on esitetty kokeellinen malli eräästä mikrokanava lämmönvaihtimesta.



**Kuva 5.** Kokeellinen malli eräästä mikrokanava lämmönvaihtimesta (mukaillen, Chalermisinsuwana ja muut, 2022, s. 243).

### 4.3 Teollisuuden energiatehokkaat lämpöpumput

Lämpöpumput ovat nousseet merkittäväksi teknologiaksi, koska ne parantavat energiatehokkuutta ja hillitsevät hiilidioksidipäästöjen syntymistä ilmakehään (IEA-Industry, 2014, s. 7–8). Erityisesti teollisuuslämpöpumput eli Industrial Heat Pumps (IHPs) tarjoavat monipuolisia mahdollisuuksia erilaisissa valmistusprosesseissa ja -toiminnoissa. Hyödyntämällä prosessin hukkalämpöä ensisijaisena ja toissijaisena lämmönlähteenä lämmitykseen, esilämmitykseen sekä teollisuuden tilojen lämmitykseen ja jäähdytykseen. Lämpöpumput tuottavat lämpöä korkeissa lämpötiloissa teollisuuden eri prosesseihin ja ovat optimoitavissa haluttuihin menoveden lämpötiloihin portaattomasti taajuusmuuttajien eli Variable Frequency Drive (VFD) avulla (Kiiski, Niemelä & Paasalo, 2021). Teollisuuden energiatehokkaat lämpöpumput eroavat perinteisistä lämpöpumpuista siinä, että ne pystyvät ottamaan lämpöä talteen suhteellisen matalissa lämpötiloissa, yleisesti lämpötila-alueella 5–35 °C (IEA-Industry, 2014, s. 11). Lämpöpumppujen käyttö voi vähentää merkittävästi fossiilisten polttoaineiden käyttöä ja kasvihuonekaasupäästöjä esimerkiksi kuivauksessa, pesussa, haihdutuksessa ja tislauksessa monilla teollisuudenaloilla, kuten teknologiateollisuudessa, elintarviketeollisuudessa, metsäteollisuudessa ja kemianteollisuudessa (IEA-Industry, 2014, s. 8).

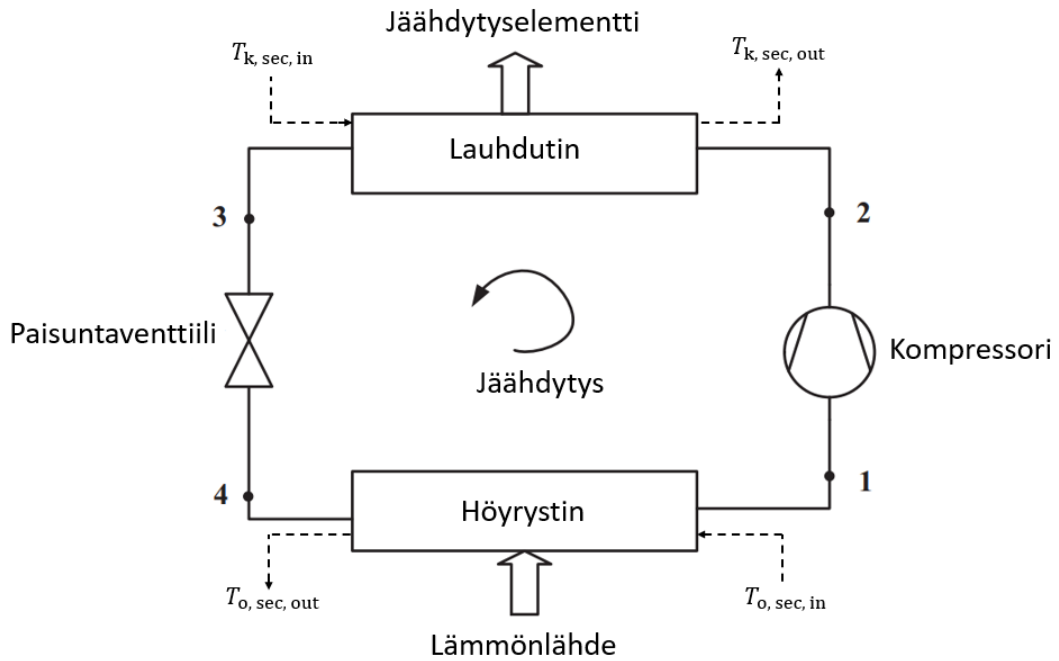
### 4.3.1 Toiminta

Tässä työssä käsitellään mekaaniset- ja absorptiolämpöpumput sekä niiden toiminnallinen käyttö jäähdytykseen. Työn menetelmät osuudessa käsitellään vain mekaanisia lämpöpumppuja, koska ABB Oy, IEC LV Motors, MM-rakennuksen hukkalämmön talteenottojärjestelmä hyödyntää kyseistä pumpputyyppejä.

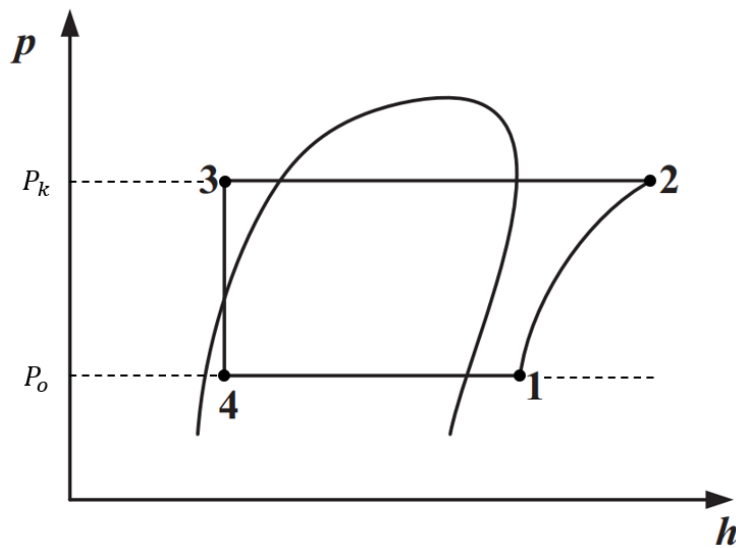
Lämpöpumppu on laite, jonka avulla hyödynnetään tuotannon prosessissa syntyvää matlalämpöistä hukkalämpöä tehokkaasti (Kataikko & Maaskola, 2014, s. 17). Lämpöpumpulla nostetaan hukkalämmön tasoa alemmasta lämpötilatasosta korkeammalle lämpötilatasolle, jotta lämpöä voidaan hyödyntää uudestaan teollisuuden prosesseissa, kiinteistöjen lämmityksessä tai pumpatessa lämpö suoraan kaukolämpöverkkoon. Lämpöpumppua voidaan käyttää lämmitys- ja jäähdytystarpeiden täyttämiseen, koska sen toiminta perustuu järjestelmän sisällä kiertävän kylmäaineen faasimuutoksiin. (Kataikko & Maaskola, 2014, s. 17). Yksinkertaisimmillaan lämpöpumppu koostuu kompressorista, kuristusventtiilistä, lauhduttimesta ja höyrystimestä sekä järjestelmän sisällä kiertävästä kylmäaineesta, joka vaihtelee lämpöpumpun tyyppiin ja käyttötarkoituksen mukaan.

### 4.3.2 Mekaaninen lämpöpumppu

Kuviossa 6 esitetään mekaanisen lämpöpumpun keskeiset komponentit ja niiden vaiheet  $p,h$  -kuvaajassa kuviossa 7. Höyrystimessä tapahtuu lämmönsiirto lämmönlähteen aineesta kiertävään kylmäaineeseen, joka kiertää lämpöpumpun sisällä. Kylmäaine höyrystyy pisteissä (4–1) siirtyen lämmönlähteestä kiertävään järjestelmään. Kompressorissa kylmäaineen paine kasvaa ja samalla sen lämpötila nousee pisteiden (1–2) aikana. Lauhduttamisvaiheessa kylmäaine siirtää lämpöä lämpönieluun ja samalla kylmäaineen lämpötila laskee, aiheuttaen sen siirtymisen nestemäiseen olomuotoon pisteissä (2–3). Viimeisessä prosessin vaiheessa kylmäaine kulkee paisuntaventtiilin läpi, minkä seurauksena kylmäaineen paine laskee pisteissä (3–4) (He, Tao, Zhang & Zhang, 2016, s. 3–4; Amat-Albuixech ja muut, 2018, s. 229–230).



**Kuvio 6.** Mekaanisen lämpöpumpun toimintaperiaate (mukaiillen He ja muut, 2016, s. 4).

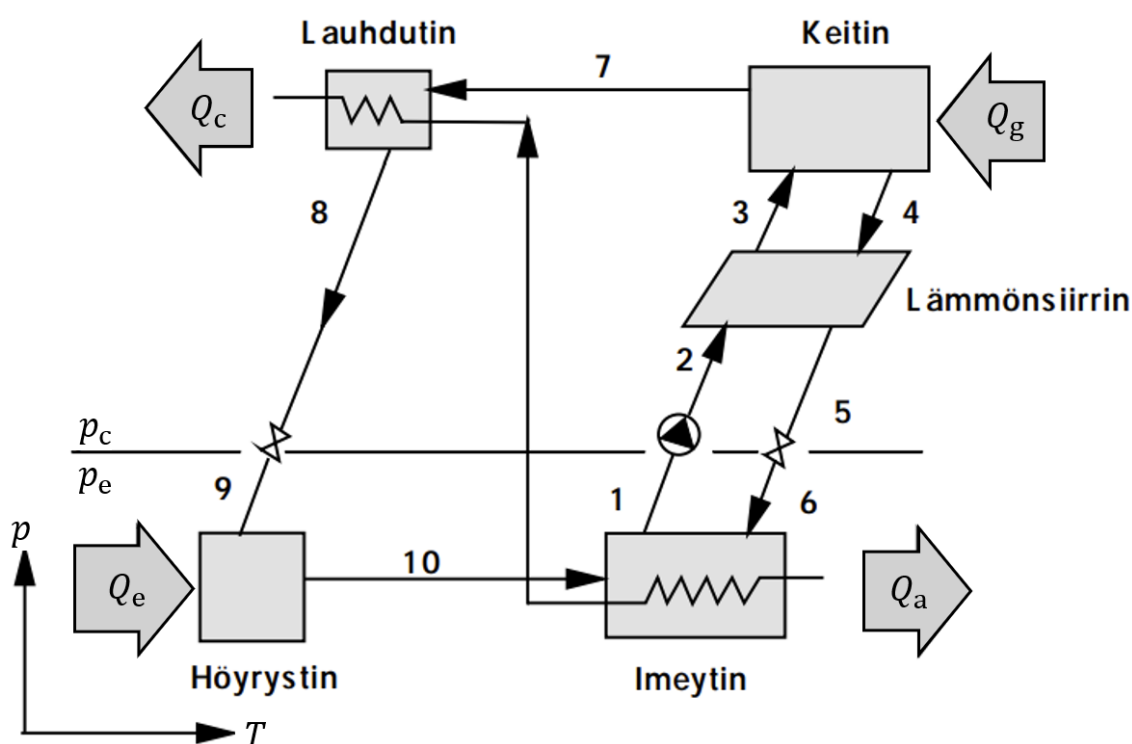


**Kuvio 7.** Paine-entalpiakaavio termodynaamiselle kierrolle (mukaiillen He ja muut, 2016, s. 4).

### 4.3.3 Absorptiolämpöpumppu

Kuviossa 8 esitetään absorptiolämpöpumpun pääkomponentit ja toimintaperiaate. Yksinkertainen absorptiolämpöpumppu koostuu neljästä päälämmönsiirtimestä:

lauhduttimesta, höyrystimestä, keittimestä ja imeytimestä. Näiden lisäksi laitteistoon kuuluvat liuospumppu ja kaksi paisuntaventtiiliä. Hyvin usein keittimen ja imeyttimen välille sijoitetaan ylimääräinen liuoslämmönvaihdin, joka parantaa lämpöpumpun energiatehokkuutta oleellisesti. Absorptiolämpöpumpun kiertoprosessi perustuu korkean ja matalan paineen väliseen eroon, kuten perinteisessä lämpöpumpussa. Tämä paine-ero syntyy säätämällä työaineiden konsentraatioita lämpöpumpussa, mikä vaikuttaa edelleen aineiden toimintapisteeseen muutoksiin (Xu & Wang, 2017, s. 415–422; Koljonen & Sipilä, 1998, s. 12–15).



**Kuvio 8.** Absorptiolämpöpumpun toimintaperiaate (mukaillen Koljonen & Sipilä, 1998, s. 13).

#### 4.3.4 Kustannuskorrelaatio

Andreasen ja muiden (2016) mukaan lämpöpumpun investointikustannuksien  $I$  [€/kW] suuruutta riippumatta lämpöpumpputyypistä, voidaan arvioida seuraavasti kaavalla (8):

$$C_E = C_B \cdot \left(\frac{Q}{Q_B}\right)^M \cdot f_M \cdot f_p \cdot f_r, \quad (8)$$

missä

$C_E$  = Laitekustannukset laitteelle, jonka kapasiteetti ( $Q$ ) [€/kW]

$C_B$  = Kapasiteettia sisältävän laitteen peruskustannus ( $Q_B$ ) [€]

$Q$  = Kapasiteetti [kW]

$M$  = Eksponenttivakio [mitaton]

$f_M$  = Korjauskerroin 1 [mitaton]

$f_p$  = Korjauskerroin 2 [mitaton]

$f_r$  = Korjauskerroin 3 [mitaton].

#### 4.3.5 Lämpökerroin

Kerroin eli Coefficient of Performance (COP) kuvaa lämpöpumppujen energiatehokkuutta (Kataikko & Maaskola, 2014, s. 19). COP kerroin määrittää, kuinka paljon lämmitysenergiaa tai jäähdytysenergiaa saadaan tietyllä määrällä sähköenergiaa. COP saadaan laskettua, kun jaetaan lämpöpumpun tuottama lämpöteho tai kylmäteho laitteen vaatimalla sähköteholla eli työllä, joka kuluu lämpöpumpun kompressorissa. Kaavassa (9) on esitetty kertoimen COP laskentayhtälö:

$$COP = \frac{Q_{out}}{W_{in}}, \quad (9)$$

missä

$COP$  = Kerroin [mitaton]

$Q_{out}$  = Lämpöpumpun tuottama lämpöteho tai kylmäteho [kW]

$W_{in}$  = Lämpöpumpun vaatima sähköteho eli työ [kW].

#### 4.3.6 Kylmäaineet

Teollisuuslämpöpumppu teknologian viimeaikaisessa kehityksessä on edistytty erilaisten kylmäaineiden, kuten R-134a, R-245fa, R-717, R-744 ja hiilivetyjen käytössä (IEA-Industry, 2014, s. 11). Erityisesti R-744 ja luonnolliset kylmäaineet, kuten R-717 sekä hiilivedyt, erottuvat edukseen huomattavasti alhaisen ilmaston lämpenemispotentiaalinsa eli

Global Warming Potential (GWP) ansiosta, mikä vastaa ympäristövaikutusten minimoimisen vaatimusten mukaista tasoa. R-134a ilmenee myös eräänlaisena freonina, jolla on negatiivisia ympäristövaikutuksia, kuten kasvihuoneilmion voimakas lisääntyminen (Bell ja muut, 2019, s. 1–4). Lisäksi Freon R-134a:ssa on inerttejä molekyylejä, joita puolijohdekaasuanturien on vaikea havaita, mikä lisää ympäristöriskiä vuotojen sattuessa.

Tällä hetkellä R-1234yf ja R-1234ze (E) ovat lupaavia R-134a:n korvaajia, kun taas R-1234ze (Z) on potentiaalinen R-245fa:n korvaaja. R-365mfc, jota pidetään sopivana kylmäaineena hukkalämmöstä höyryä tuottaviin lämpöpumppuihin, on kuitenkin GWP-arvoltaan poikkeuksellisen korkea (IEA-Industry, 2014, s. 11). Näin ollen R-365mfc:n korvaavien aineiden kehittämistä on välttämätöntä jatkaa. Alla olevassa taulukossa 3 esitetään sekä nykyisten että tulevien teollisuuslämpöpumppujen kylmäaineiden perusominaisuudet lueteltuna.

**Taulukko 3.** Teollisuuslämpöpumppujen kylmäaineiden perusominaisuudet (mukaillen, IEA-Industry, 2014, s. 11–12).

Kylmäaine	Kemiallinen kaava	GWP	Syttyvyys	$T$ [°C]	$P_c$ [MPa]	$NBP$ [°C]
R -290	CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>3</sub>	~20	kyllä	96,7	4,25	-42,1
R -601	CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>3</sub>	~20	kyllä	196,6	3,37	36,1
R -717	NH <sub>3</sub>	0	kyllä	132,25	11,33	-33,33
R -744	CO <sub>2</sub>	1	ei	30,98	7,3773	-78,4
R-1234yf	CF <sub>3</sub> CF=CH <sub>2</sub>	<1	heikko	94,7	3,382	-29,48
R -134a	CF <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> F	1,430	ei	101,06	4,0593	-26,07
R -1234ze(E)	CFH=CHCF <sub>3</sub>	6	heikko	109,37	3,636	-18,96
R -1234ze(Z)	CFH=CHCF <sub>3</sub>	<10	heikko	153,7	3,97	9,76
R -245fa	CF <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CHF <sub>2</sub>	1,030	ei	154,01	3,651	15,14
R -1233zd	–	6	ei	165,6	3,5709	n. a.
R -1336 mzz	–	9	ei	171	n. a.	n. a.
R -365mfc	CF <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CF <sub>2</sub> CH <sub>3</sub>	794	heikko	186,85	3,266	40,19

## 5 Energiatehokkuuden parantaminen teollisuusympäristössä

Energiatehokkuus ja digitalisaatio teollisuusympäristöissä ovat nousseet keskeisiksi käsitteiksi, jotka muovaavat yritysten toimintaa ja vaikuttavat merkittävästi kilpailukykyyn. IEA:n (2017) Global Efficiency Report mukaan energiatehokkuus on noussut yhä tärkeämmäksi strategiseksi painopisteeksi ympäristöhuolen sekä kustannusten optimoinnin näkökulmasta. Etenkin viime aikoina ilmastonmuutos toimenpiteisiin vastaaminen ja tehokkuusetiin linkittyminen ovat nostaneet osuuttaan energiatehokkuuden kehittämisessä globaaleissa teollisuusympäristöissä (Lian ja muut, 2022, s. 1–2). Samanaikaisesti digitalisaatio tarjoaa erilaisia linkitettyjä välineitä, joilla yritykset voivat tehostaa toimintaansa, parantaa energiatehokkuutta ja tehdä parempia päätöksiä ympäristön hyväksi kohti ”vihreää” keskittymää.

Energiatehokkuuteen liittyvät kriteerit vaihtelevat toimialoittain ja alueittain. Usein yrityksiltä edellytetään tarkkaa seuranta ja raportointia energiankulutuksestaan, asetettujen tavoitteiden saavuttamista sekä jatkuvaa parantamista. Kriteereihin kuuluu myös energiatehokkaiden teknologioiden ja prosessien käyttöönotto sekä henkilöstön koulutus energiatehokkuuden parantamiseksi. Näin ollen digitalisaatio tarjoaa monipuolisia mahdollisuuksia parantaa energiatehokkuutta teollisuudessa. Älykkäät sensorit ja IoT-ratkaisut mahdollistavat reaaliaikaisen datan keräämisen ja analysoinnin, joka puolestaan auttaa yrityksiä tunnistamaan energiankulutuksen kohteita entistä tehokkaammin (Lian ja muut, 2022, s. 3–4).

Teollisen tuotannon digitalisaatiolla, joka tunnetaan myös nimellä ”Teollisuus 4.0”, voi olla merkittäviä ympäristövaikutuksia, jotka herättävät sekä toiveita että pelkoja valmistusprosessien ja tuotantoprosessien ympäristöystävällisyydestä sekä energiatehokkuudesta (Beier, Dachrodt, Kunkel & Matthess, 2023, s. 1–2). Digitaalisen teknologian nopean kehityksen ja yleistymisen myötä teollisen ketjun digitaalisesta transformaatiosta on tullut eri teollisuudenalojen yhteinen tavoite. Se viittaa teollisen ketjun kaikkien linkkien digitalisointiin ja älykkyyteen integroimalla uusia tietoteknologioita, kuten big dataa, IoT:ta, tekoälyä, lohkoketjua ja pilvilaskentaa. Yhdessä nämä varmistavat, että kaikki

teollisuusketjun kokonaisuudet voidaan luottaa reaaliaikaiseen kolmiulotteiseen datatietoon tehokkaamman johtamisjärjestelmän muodostamiseksi (Lin & Teng, 2023, s. 1–2).

Teollisuusketjun digitalisoitumistaso vaikuttaa useisiin näkökohtiin, kuten tuotantoon, toimitusketjun hallintaan, myyntiin ja palveluihin. Digitaalisen teknologian avulla teollisuusketjut voivat saavuttaa tuotantoprosessin automatisoinnin, älykkyyden ja visualisoinnin, yhdistää ja verkottaa tuotteita sekä toteuttaa tuotantoprosessin reaaliaikaisen seurannan ja ohjauksen. Se voi auttaa yrityksiä saavuttamaan tehokkaampia, joustavampia ja älykkäämpiä toimintatapoja teollisen ketjun hallintavaiheessa kilpailukyvyyn sekä markkina-aseman parantamiseksi (Lin & Teng, 2023, s. 3–4).

Empiiriset tutkimukset ovat osoittaneet, että digitaalisen teknologian innovaatioilla on positiivinen vaikutus energiatehokkuuden parantamisessa. Digitaalinen innovaatio kuvastaa prosessia, jossa digitaalitekniikkaa integroidaan teollisuuteen. Tämä innovaatio kiihdyttää digitaalista taloutta ja edustaa teknologista kehitystä sekä arvonluonnin tapaa. Sen vaikutus on edistänyt digitaalisen teknologian laajaa ja syvällistä soveltamista, tukenut teknologista kehitystä ja parantanut energia-alan tehokkuutta, joka toimii digitalisaation liikkeellepanevana voimana (Lian ja muut, 2022, s. 14–15).

Digitaalinen innovaatio nopeuttaa perinteisten toimialojen digitaalista ja informatiivista luonnetta, samalla edistäen tuotannon ja toiminnan automaatiota sekä älykkyyttä. Se synnyttää uusia prosesseja, tuotteita ja palveluita sekä muovaa uusia liiketoimintamalleja. Digitaaliset innovaatiot ovat yleensä tiiviimpiä, tehokkaampia ja tarkempia. Niiden myönteinen vaikutus energiatehokkuuteen ilmenee energian tuotanto- ja kulutuspäätteisissä. Tuotantopuolella ne voivat optimoida energiarakennetta ja edistää uusiutuvan energian käyttöä. Kuluttajat voivat edistää energiankulutuksen muutosta vähentämällä yksikköenergian kulutusta ja parantamalla energiatehokkuutta (Lian ja muut, 2022, s. 15–16). Erityisesti digitaalinen innovaatio avaa mahdollisuuksia energijärjestelmän muutokseen. Energijärjestelmän digitaalinen muutos on teollisuudessa tapahtuva

kehitys, jota ajavat nousevat digitaaliset teknologiat. Se vaatii kuitenkin digitaalisen teknologian innovaatiojärjestelmän tukea (Lian ja muut, 2022, s. 16).

Tehtaiden automaatiojärjestelmä voi optimoida hukkalämmön talteenottojärjestelmän lämpöpumppujen käyntiaikoja ja energiankulutusta automaattisesti (Lin & Teng, 2023, s. 1–2). Lisäksi älykkäät järjestelmät voivat havaita häiriöitä ja ennakoida huoltoja, mikä vähentää tuotannon seisokkeja ja parantaa laitteiden käyttöikää. Pilvipalveluiden hyödyntäminen mahdollistaa teollisuuden yrityksille etävalvonnan ja -ohjauksen sekä tiedon datapankin, mikä säästää resursseja ja vähentää tarvetta fyysiselle läsnäololle (Lin & Teng, 2023, s. 1–2). Näin ollen energiatehokkuuteen viittaavat määräykset ja standardit luovat säännöt vastuulliselle toiminnalle, kun taas digitalisaatio tarjoaa konkreettisia työkaluja näiden tavoitteiden saavuttamiseksi (Lin & Teng, 2023, s. 1–2).

IEA:n (2017, s. 29–31) tutkimuksen mukaan on arvioitu, että digitalisaatio voi vähentää energian kokonaiskulutusta asuin- ja liiketiloissa noin 10 % vuoteen 2040 mennessä. Nämä tehokkuuden lisäykset ovat suurimmat lämmityksen ja jäähdytyksen osalta, erityisesti älykkäiden termostaattien ja anturien avulla. Älykäs valaistus mahdollistaa merkittäviä leikkauksia valaistusenergian tarpeesta. Teollisuus käyttää digitaalisia teknologioita parantaakseen turvallisuutta ja tuottavuutta. Näiden tekijöiden ansiosta digitalisaatio voi johtaa merkittäviin energiansäästöihin lyhyillä takaisinmaksuajoilla parannetun prosessin ansiosta teollisuuslaitoksissa. Digitalisaatio voi olla siis tehokas keino lisätä tehokkuutta, tuottavuutta ja energiansäästöjä asuinrakennuksissa sekä teollisuudessa.

## **5.1 ISO 50001 energiatehokkuuden johtamisjärjestelmä**

SFS-EN ISO 50001 -standardi on kansainvälisen ISO 50001 -standardin kansallinen toteutus Suomessa. Standardin päätarkoituksena on tukea organisaatioita rakentamaan järjestelmiä ja prosesseja, jotka luovat perustan energiatehokkuuden parantamiselle. Näihin sisältyvät muun muassa energiatehokkuus, energiankäyttö ja -kulutus. Standardin toimeenpanon keskeisenä päämääränä on systemaattisen energianhallinnan avulla

vähentää kasvihuonekaasupäästöjä, muita ympäristövaikutuksia ja energiakustannuksia (SFS, 2018).

ISO 50001 -standardi soveltuu kaiken kokoisille ja tyyppisille organisaatioille, ottaen huomioon kaikki maantieteelliset, yhteiskunnalliset ja kulttuuriset olosuhteet (SFS-EN ISO 50001, 2011, s. 8–10). Standardin määrittämien järjestelmien ja prosessien toteutus edellyttää sitoutumista kaikilla organisaation tasoilla, erityisesti organisaation ylimmältä johdolta. Standardi perustuu jatkuvan parantamisen malliin, joka noudattaa niin sanottua *suunnittele, toteuta, arvioi ja toimi* periaatetta eli *plan, do, check and act* (PDCA). ISO 50001 -standardia voidaan käyttää sertifiointi- ja rekisteröintitarkoituksiin sekä organisaation antamissa energianhallintajärjestelmään liittyvissä vakuutuksissa. Tärkeää on huomata, että standardi ei aseta ehdottomia energiatehokkuus tasovaatimuksia, jotka ylittäisivät organisaation energiapolitiikkaan sisältyvät sitoumukset tai velvoitteen noudattaa lainsäädäntöä sekä täyttää muita vaatimuksia (SFS-EN ISO 50001, 2011, s. 8–10).

## 5.2 Energiatehokkuusdirektiivi (EED)

Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2012/27/EU käsittelee energiatehokkuutta, sen edistämistä sekä aiempien direktiivien muuttamista ja kumoamista (Motiva, 2023). Jokaiselle jäsenvaltiolle on asetettu energiatehokkuustavoite, joka perustuu primääri- tai loppuenergian kulutukseen sekä säästöihin tai energiaintensiteettiin (Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2012/27/EU, 2012). Tämän direktiivin mukaisesti primäärienergian kulutuksella tarkoitetaan kotimaista BKT:n kulutusta, eikä muuta energiankäyttöä oteta laskennassa huomioon. Energian loppukulutuksella puolestaan viitataan siihen kaikkeen energiaan, joka on toimitettu esimerkiksi teollisuudelle, maataloudelle, liikenteelle palveluille ja kotitalouksille. Energian loppukulutuksesta ei huomioida kuitenkaan energiateollisuudelle ja energian muuntamisen alalle toimitettua energiaa (Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2012/27/EU, 2012).

## 6 Hukkalämmön hyödyntäminen MM-rakennuksessa

Tämän työn tarkoituksena oli selvittää, millainen merkitys hukkalämmön talteenottojärjestelmän käyttöönotolla on MM-rakennuksen energiatehokkuuteen. Energiatehokkuuden tutkimisessa pääpaino on hukkalämmön energiatehokkaassa hyödyntämisessä rakennuksen ja teollisuuden prosessien lämmitys- ja viilentämistarpeiden optimaaliseen täyttämiseen. Työn ohella käytiin läpi MM-rakennuksen hukkalämmön todelliset käyttökohteet, joissa hukkalämpöä olisi energiatehokasta hyödyntää. Lisäksi selvitettiin hukkalämmön todellinen potentiaali kuukausitasolla saadun mittausdatan perusteella. Tulokset sisälsivät herkkyyss- ja virhetarkastelun. ABB Oy, IEC LV Motors hyödynsi älykästä kaksisuuntaista kaukolämpömallia hukkalämmön talteenottojärjestelmässään. Talteen otettu hukkalämpö pumpattiin ABB:n omaan aluelämpöverkkoon, joka on yhteydessä Vaasan kaukolämpöverkoston kanssa. Aluelämpöverkosta lämpöä pumpataan MM-rakennuksen toimistotiloihin, tuotantotiloihin, teollisuusuunien ja erilaisten prosessien viilennys- sekä lämmitysenergia-tarpeiden täyttämiseksi.

Työ toteutettiin hyödyntämällä toimintatutkimusmenetelmää, liittyen järjestelmän energiatehokkuuden parantumisen tutkimiseen hukkalämmön talteenottojärjestelmän käyttöönoton avulla. Energiatehokkuuden parantamisessa tutkittiin erityisesti MM-rakennuksen kaukolämmön kulutuksen kumulatiivisen trendin muuttumista pitkällä aikavälillä ja tätä tulosta verrattiin käyttöönoton jälkeiseen aikaan, kun hukkalämmön talteenottojärjestelmä oli käytössä. Tulokset ottivat myös kantaa teollisuusuunien ja Chiller-jäähdytysjärjestelmän energiatehokkaaseen hyödyntämiseen hukkalämmöllä. Kaukolämmön kulutuksessa oli huomioitu teollisuusuunien vaatima vakio lämpöenergian tarve. Tarkemmat tiedot on esitetty kappaleen 6.2 taulukossa 5. Lisäksi tutkittiin viilennysenergian trendien suhdetta MARX 1–3 sulatusuunien jäähdytyslaitteissa, jotka ovat niin ikään esitetty taulukossa 5.

Työssä haluttiin yllä mainittujen seikkojen lisäksi tutkia Strömberg Parkin alueen kaukolämpöverkon paluuveden lämpötilan optimoinnin mahdollisuutta suhteessa ulkolämpötilaan, ja tässä tehtiin yhteistyötä Granlund Oy:n kanssa. Tarkoituksena oli tutkia, kuinka

optimointi vaikuttaisi talteenottojärjestelmän energiatehokkuuteen ja vallitsevan lämpöenergian määrään. Lisäksi haluttiin selvittää talteenottojärjestelmän kannattavuus eri kuukausina, jotka olivat tässä työssä elokuu-maaliskuu välinen aikaikkuna. Kannattavuudessa otettiin kantaa sähkön ja kaukolämmön muuttuvaan hintatasoon, jotka määritettiin vuosien 2016–2023 hintatasojen perusteella. Tarkoituksena oli siis selvittää, milloin talteenottojärjestelmää on järkevää hyödyntää sähkön eri hintatasoilla.

## 6.1 Hukkalämmön lähteet

MM-rakennuksen hukkalämmön lähteet on tunnistettu Granlund Oy:n (Parkkamäki, 2021) suorittaman energia-analyysin pohjalta. Energia-analyysin tulokset osoittavat, että hukkalämmön lähteistä peräisin oleva arvioitu potentiaali on merkittävä vuositasona katsottuna ja sen hyödyntäminen on taloudellisesti kannattavaa. Energia-analyysin antamat tulokset on esitetty taulukossa 4.

**Taulukko 4.** Hukkalämmön lähteet ja arvioitu potentiaali (Parkkamäki, 2021).

Hukkalämmön lähde	MWh/a
Erillispoistopuhaltimet	6900
Paineilmakompressorit	1400
Porakaivovesi	800
Moottoreiden testaustilat	800
MARX 1-3 sulatusuunien jäähditys (VJK-401 ja VJK-402)	750
<b>Kokonaispotentiaali</b>	<b>10650</b>

## 6.2 Hukkalämmön käyttökohteet

MM-rakennuksessa toimii kolme teollisuusuunia: AL1A teollisuusuuni, AL2 pohjamaalaus- ja pintamaalaus-uunit. Uuneilla kovetetaan maalattujen moottoreiden vastamaalattu pohjamaali ja pintamaali. Maalaamoiden teollisuusuuneja on suunniteltu esilämmitettävän lämpöpumppujen avulla hyödyntämällä energiatehokkaita lämmönvaihtimia, joita esitettiin luvussa 4.1 (ABB, 2024c; Parkkamäki, 2021). Tämän avulla pyrittiin eliminoimaan tarve sähköenergialle lämmityksessä ja teollisuusuunit muodostivat keskeisen osan tässä järjestelmässä. Teollisuusuunien lämpöenergian tarpeessa huomioitiin

todellinen käyttöaika, joka on 16 tuntia viitenä päivänä viikossa. Lisäksi rakennuksessa on MARX 1–3 sulatusuunit, joiden jäähdytysveden viilentämiseen tarvitaan jäähdytyslaitteistoa. Jäähdyttämiseen käytetään Chiller-jäähdytyslaitteistoa, jonka tehtävänä on laskea jäähdytysveden lämpötilaa kiertoprosessin aikana. Tavoitteena oli käyttää energiatehokkaita lämmönvaihtimia MARX 1–3 sulatusuunien jäähdytysveden jäähdyttämiseen, jolloin sulatusuunien jäähdytysvettä jäähdyttävän Chiller-jäähdytyslaitteiston sähkökulutus voitiin poistaa kokonaan, kiertovesipumppua lukuun ottamatta (ABB, 2024c; Parkkamäki, 2021). Jäähdytyskäytössä huomioitiin niin ikään todellinen käyttöaika, joka on 24 tuntia vuorokaudessa seitsemänä päivänä viikossa.

Viimeisenä käyttökohteena oli MM-rakennuksen kiinteistön lämmitys, joka kattoi suurimman osan lämmitystarpeesta. Rakennuksen lämmitys vaatii huomattavaa lämpöenergian määrää, ja kulutus on jatkuvaa, mikä teki kohteesta merkittävän hukkalämmön käyttökohteen tässä konseptissa (Parkkamäki, 2021). Lisäksi hukkalämmön talteenottojärjestelmässä oleellista on tasainen ja jatkuva kulutus, kuten todettiin luvussa 4. Alla olevassa taulukossa 5 on eritelty yllä mainitut MM-rakennuksen hukkalämmön talteenottojärjestelmän käyttökohteet. Täten taulukon 5 yhteenlasketun tehon tarpeen ollessa 9392 MWh/a todetaan riittävän tässä konseptissa, kun tulosta verrataan taulukon 4 hukkalämpöpotentiaalin, joka on 10650 MWh/a.

**Taulukko 5.** Hukkalämmön käyttökohteet (ABB, 2024c).

Hukkalämmön käyttökohteet	Mitattu tehonkulutus [MWh/kk]	Mitattu tehonkulutus [MWh/a]
Chiller-jäähdytysjärjestelmä MARX 1-2 sulatusuuneille (VJK-401)	20,3	243
Chiller-jäähdytysjärjestelmä MARX 3 sulatusuuneille (VJK-402)	6,8	81
AL1A Teollisuusuuni	17,3	207
AL2 Teollisuusuuni (pintamaalaus)	35,8	429
AL2 Teollisuusuuni (pohjamaalaus)	35,8	429
MM-rakennuksen lämmitys	666,9	8003
<b>Yhteenlaskettu</b>	<b>782,7</b>	<b>9392</b>

### 6.3 Hukkalämmön talteenottojärjestelmä

MM-rakennuksen energianhallintajärjestelmään liitetty hukkalämmön talteenottojärjestelmä koostuu Oilonin lämpöpumppuyksiköstä sekä kylmä- ja lämmitysvaraajista, jotka

varastoivat hetkellisesti tuotetun kylmä- ja lämpöenergian (Parkkamäki, 2021). Talteenottojärjestelmä hyödyntää kolmea sarjaan kytkettyä Oilonin teollisuuslämpöpumppua, ja tätä havainnollistetaan kuvan 6 oikeassa laidassa (Koskimäki & Niemelä, 2022, s. 5–6; Alpuu, 2022, s. 26–35). Kylmä- ja lämmitysvaraajat on suunniteltu varastoimaan tuotettu kylmä- ja lämpöenergia tilapäisesti silloin, kun lämpöpumput eivät ole aktiivisina. Lämpöpumppujen mitoitettu maksimi lämpöteho on  $Q_{\text{heat}} = 1202 \text{ kW}$ , kylmäteho  $Q_{\text{cold}} = 727 \text{ kW}$  ja sähköteho  $P_{\text{elect}} = 489 \text{ kW}$ .

Jokainen lämpöpumppu nostaa lämpötilaa, kunnes saavutetaan toivottu lämmityspuolen tuottolämpötila  $T_{\text{out}} = 75\text{--}90 \text{ °C}$ , joka seuraa lämpötilamittauksen 100-TE41.400 asetusarvoa lauhdutinpiirissä (Koskimäki & Niemelä, 2022, s. 8–12). Tässä luku 100 viittaa lämmityspiirin lämpötilamittauksen asetusarvoon, joka tässä työssä on  $T_{\text{asetusarvo}} = 75 \text{ °C}$  ja vastaavasti luku 400 viittaa jäähdytyspiirin höyrystimen tuottolämpötilaan, joka seuraa alarajan arvoa  $T_{\text{alaraja}} = 1 \text{ °C}$ . TE41 viittaa lauhdutinpuolen lämpötilamittaukseen. (Koskimäki & Niemelä, 2022, s. 8–12). Mikäli lämpötilamittauksen asetusarvoa 100-TE41.400 ei saavuteta, seuraa hälytys  $+5 \text{ °C}$  asetusarvon poikkeamasta. Lämpöpumppujärjestelmän toimintaa ohjataan lämmöntarpeen mukaisesti siten, että lämmitys- ja jäähdytysverkostojen lämpötilat pysyvät lämpötilakäyrästäön mukaisesti annetuissa asetusarvoissa (Koskimäki & Niemelä, 2022, s. 12). Liitteessä 2 on esitetty lämpöpumppuyksikön tekniset tiedot.

### 6.3.1 Lämmityspiiri

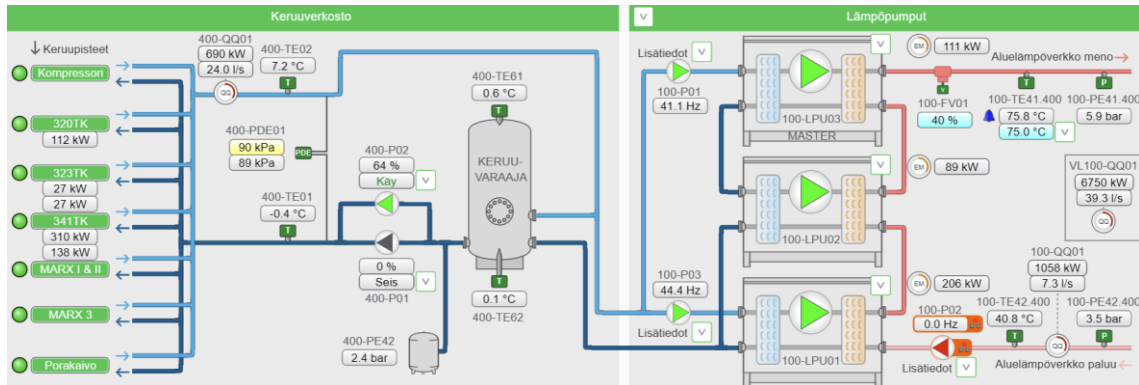
Hukkalämmön talteenottojärjestelmä koostuu kuvan 6 mukaisesti lämmityspiiristä, jonka avulla hukkalämmön lämpötilatasoa kasvatetaan. Kuvan vasemmassa laidassa keruuverkosto -osiossa on talteenottojärjestelmän keruupisteet, joista lämpöä kerätään talteen. Hukkalämpötehon määrä nähdään mittarilta 400-Q01 ja verkostossa vallitseva paine mittarilta 400-PDE01, jonka avulla virtaus säilytetään haluttujen raja-arvojen välillä. Keruupisteitä ovat paineilmakompressorit, 320 TK (MM-alahallin moottoreiden testaus-tilat), 323 TK (MM-alahallin maalaustilat ja maalausunit), 341 TK (MM-keskihallin valimon tulo- ja poistoilmavirrat) ja MARX 1–3 (sulatusuunien jäähdytyksen

poistoilmavirrat). Keruupisteiden lämpöenergia vietään keruuvaraajaan, joka toimii järjestelmän puskurina, kun lämpöpuolelle saapuva lämpöenergia vietään lämpöpumpuille.

Kuvan 6 oikealla puolella lämpöpumput -osiossa keruuvaraajasta saapuva lämpöenergia kulkee lämpöpumpuille. Toinen pumpuista 100P01 tai 100P02 käy aina, kun keruuverkoston ensimmäinen tehoporras saa käyntiluvan (Koskimäki & Niemelä, 2022, s. 6–7). Käyntivuoron saanutta pumppua ohjataan keruuverkoston paine-eromittauksen 100-PDE01 mukaisesti. Lisäksi lämpöpumppujen taajuusmuuttajat 100-P01 ja 100-P03 saavat säätöviestin lämpöpumpuilta ja ne tarkkailevat tehoa, lämpötilaa, painetta ja virtaamaa, jonka mukaan lämpöpumppujen parametrit asettuvat. Vastaavasti lämpöpumppuihin integroidut taajuusmuuttajat säätelevät ruvikompressorien taajuutta  $f$  ja tehoa  $Q_{\text{heat}}$ . Kolmen lämpöpumpun 100-LPU01–03 avulla tapahtuu portaallinen lämmitys, jossa jokainen lämpöpumppu nostaa lämpötilaa asetettujen parametrien verran ylöspäin. 100-LPU01 asetusarvo on 65 °C, 100-LPU02 asetusarvo 70 °C astetta ja 100-LPU03 asetusarvo 75–90 °C astetta, riippuen ulkolämpötilajakaumasta ja lopullisesta lämpötilan asetusarvosta (S. Mattila, henkilökohtainen keskustelu, 2.2.2024). Lämpöpumput 100-LPU01–03 pumppaavat lämpöenergiaa kaukolämpöverkkoon. Lämpöpumppujen sähköenergian kulutusta seurataan energiamittarien (EM) avulla (Koskimäki & Niemelä, 2022, s. 7–10).

Kuvan 6 mukaan 100-FV01 venttiili on auki 40 % kyseisellä ajanhetkellä, ja tämä kuristaa eli rajoittaa aluelämpöverkkoon menevää lämpöenergian määrää talteenottojärjestelmältä. 100-FV01 venttiili saa 100 % avautumiskäskyn, jos ensiöpuolen lämpötilanmittaus ylittää keruuverkoston lämpötilan +5 °C eli lämpöä on saatavilla ja keruuvaraajan tehoporrasmääritelmän mukaan keruukohteella on avautumislupa (Koskimäki & Niemelä, 2022, s. 7–8). 100-FV01 venttiilillä säädellään näin ollen myös keruutehoa siten, että ensiöpuolen lämpötilanmittaus säilyy asetusarvossaan +22 °C. Mikäli ensiöpuolelta ei kyetä siirtämään keruuverkoston lämpöä, tulee 100-FV01 venttiilin sulkeutua. Lisäksi anturi 100-TE41.400 seuraa lämpötilaa ja anturi 100-PE41.400 seuraa painetta. Kaukolämpöverkon menoveden asetusarvo 75 °C kyseisellä ajanhetkellä, mutta todellinen lämpötila

on 75,8 °C. Aluelämpöverkon paluupuolelle saapuu kyseisellä ajanhetkellä mittarin 100-QQ01 mukaan 1058 kW tehoa takaisin. Paluupumppu 100-P02 on taajuusmuuttajalla toimiva, joka keskustelee aluelämpöverkon kanssa ja toimii vakiotaajuudella (Koskimäki & Niemelä, 2022, s. 7–10).



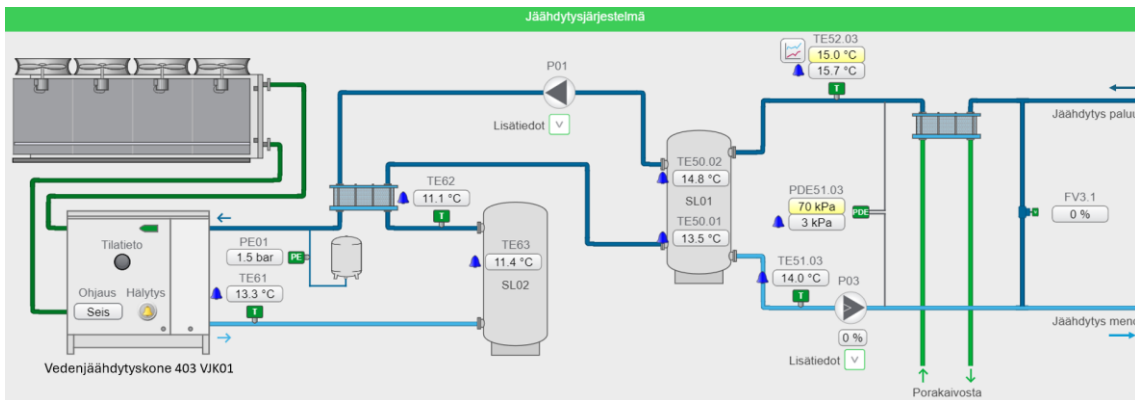
**Kuva 6.** Hukkalämmön talteenottojärjestelmän lämmityspuolen pääkuva (Schneider Electric, 2024a).

### 6.3.2 Jäähdytyspiiri

Hukkalämmön talteenottojärjestelmä koostuu myös kuvan 7 mukaisesti jäähdytyspiiristä, jonka avulla hukkalämmöstä voidaan muodostaa jäähdytysenergiaa. Periaate on samankaltainen kuin lämmityspiirin puolella. Kuvan 7 oikealla puolella on nähtävillä jäähdytysjärjestelmä -osiossa talteenottojärjestelmän keruupisteet, joista kylmäenergiaa kerätään talteen. Hukkalämpötehon määrä nähdään kuvan 6 mukaisesti mittarilta 400-Q01 ja verkostossa vallitseva verkon kokonaispaine kuvan 7 mukaisesti mittarilta PE01, jonka avulla virtaus säilytetään haluttujen raja-arvojen puitteissa oikeana (Granlund, 2022). Jäähdytyspuolella keruupisteenä toimii tässä tapauksessa porakaivo. Keruupisteiden jäähdytysenergia vietään keruuvaraajaan SL01, joka toimii järjestelmän puskurina, kun jäähdytystarvetta ei ole.

Jäähdytysjärjestelmä siis tuottaa ja syöttää jäähdytysverkostoihin jäähdytettyä nestettä. Normaalitilanteessa jäähdytetty neste tuotetaan porakaivojärjestelmän pumpulla (404)

P01 ja varastoidaan keruuvaraajaan SL01, mutta tarvittaessa koneellisesti vedenjäähdytyskoneella 403 VJK01, joka on esitetty kuvan 7 vasemmassa alalaidassa (Granlund, 2024). Vedenjäähdytyskone 403 VJK01 ollessa käynnissä, se tuottaa jäähdytysenergiaa keruuvaraajalle SL02, joka on lämmönvaihtimen välityksellä yhteydessä keruuvaraajaan SL01. Mikäli keruuvaraajan SL01 jäähdytyskapasiteetti ei riitä tarvittavalle kuormalle, ottaa se jäähdytystarvetta keruuvaraajasta SL02 lämmönvaihtimen välityksellä. Tämä tarkoittaa sitä, että pumppu (403) P03 käy, mikäli verkostoissa on jäähdytystarvetta. Vedenjäähdytyskone 403 VJK01 pitää automaatio-ohjauksen avulla nesteen lämpötilan asetusarvossaan, joka on kyseisellä ajanhetkellä 13,3 °C (Granlund, 2022).



**Kuva 7.** Hukkalämmön talteenottojärjestelmän jäähdytyspuolen ja MM403 VJK01 vedenjäähdytyskoneen pääkuva (Schneider Electric, 2024a).

## 7 Tulokset ja tarkastelu

Tässä osiossa tarkastellaan diplomityön tuloksia. Hukkalämmön talteenottojärjestelmän käyttöönoton tuloksista oli saatavilla rajatusti vertailukelpoista materiaalia elokuusta maaliskuuhun, koska järjestelmän käyttöönotto oli juuri saatu mallinnettua valmiiksi. Toukokuusta heinäkuuhun ulottuvat tulokset olivat säröytyneet, koska järjestelmän alkuvaiheen käynnistäminen ja ylösajo osoittautuivat haasteellisiksi. Näin ollen toukokuu–heinäkuu välistä dataa ei voitu hyödyntää tässä diplomityössä aikataulullisten haasteiden puitteissa. Tästä syystä diplomityössä analysoidaan elokuu 2023–maaliskuu 2024 välisenä aikana kerättyä materiaalia, joka osoittautui vertailukelpoiseksi tutkittaessa hukkalämmön talteenottojärjestelmän tuomaa energiatehokkuuden parantumista case-kohteelle.

Työn tuloksien kulku seuraa järjestystä: luvussa 7.1 esitellään tuloksien herkkyys- ja virhetarkastelu, joka sisältää energiankulutuksen eli tässä tapauksessa MM-rakennuksen kaukolämmön kulutuksen normitukseen. Luvussa 7.2 esitellään kaukolämmönkulutus ennen talteenottojärjestelmää ja luvussa 7.3 esitellään talteenottojärjestelmän lämpö- ja jäähdytysenergioiden tuloksia elokuu–maaliskuu aikaikkunalta. Luvussa 7.3.1 ja 7.3.2 kerrotaan energiatehokkuuden parantumisesta talteenottojärjestelmän lämmitys- ja jäähdytyspiirien avulla. Luvussa 7.4 kerrotaan kaukolämpöverkon paluuveden optimointien vaikutuksista lämpöenergian määrään ja sitä kautta energiatehokkuuden mahdolliseen parantumiseen. Luvussa 7.5 tulkitaan talteenottojärjestelmän energiatehokkuuden toteutumista. Luvussa 7.6 kerrotaan talteenottojärjestelmän kannattavuudesta muuttuvilla sähkön- ja kaukolämmön hinnoilla elokuu–maaliskuu aikaikkunalta tarkasteltuna. Lopuksi luvussa 7.7 kerrotaan lämmityksen epäsuorasta sähköistymisestä ja sen tuomista vaikutuksista MM-rakennuksen energiatehokkuudelle vuosien 2019–2026 aikana.

### 7.1 Herkkyys- ja virhetarkastelu – energiankulutuksen normitus

Laskelmissa otettiin huomioon kaukolämmön lämmitysenergian kulutuksen normeeraus ennen talteenottojärjestelmää ja talteenottojärjestelmän jälkeen, jotta voitiin verrata

saman rakennuksen eri kuukausien ja vuosien lämmitysenergian kulutuksia vertailukelpoisesti. Kun rakennuksen lämmitysenergian kulutus normitetaan, niin tulos on vertailukelpoinen riippumatta rakennuksen sijainnista tai sääolosuhteista. Lisäksi normitetun lämmitysenergian kulutuksen seuranta on tehokkaan käytön lähtökohta ja voidaankin yleisesti toteuttaa rakennuksen automaatiojärjestelmän avulla (Motiva, 2024a).

Lämmitysenergian kulutuksen normitukseen tarvitaan lämmitysenergian kulutustiedot ja vastaavana ajankohtana vallinnut ulko- ja sisälämpötila, jotta voidaan laskea mittaus- tuloksien ajanjaksolle lämmitystarveluvut päivä- tai kuukausikohtaisesti. Lämmitysenergian kulutuksen normituksessa käytetään Motivan (2024a) tarjoamia laskentakaavoja ja lämmitysenergian kuntakerroin Vaasassa vuosina 1991–2020 on noudettu Motivan sivuilta (Motiva, 2024b). Lämmitystarveluvut Vaasassa vuosina 2018–2024 (ilmatieteenlaitos, 2024) on esitetty liitteessä 3. Saman rakennuksen lämmitysenergian kulutuksen normeeraus vertailukelpoiseksi eri ajankohtina lasketaan kaavan (10) avulla seuraavasti:

$$Q_{\text{norm}} = \frac{S_{N \text{ vpkunta}}}{S_{\text{toteutunut vpkunta}}} \cdot Q_{\text{toteutunut}} + Q_{\text{lämmin käyttövesi}}, \quad (10)$$

missä

$Q_{\text{norm}}$  = Rakennuksen normitettu lämmitysenergiankulutus [kW]

$Q_{\text{toteutunut}}$  = Rakennuksen tilojen lämmittämiseen kuluva energia [kW]

$Q_{\text{lämmin käyttövesi}}$  = Käyttöveden lämmittämisen vaatima energia [kW]

$S_{N \text{ vpkunta}}$  = Normaaliavuoden tai -kuukauden (1991–2020) lämmitystarveluku vertailupaikkakunnalla [°Cvirk]

$S_{\text{toteutunut vpkunta}}$  = toteutunut lämmitystarveluku vuosi- tai kuukausitasolla vertailupaikkakunnalla [°Cvirk].

Säästä riippumaton käyttöveden lämmittämiseen kuluva energia on poistettava rakennuksen kokonaislämmitysenergian kulutuksesta kaavan (11) avulla, jotta tulos saadaan vertailukelpoiseksi:

$$Q_{\text{toteutunut}} = Q_{\text{kok}} - Q_{\text{lämmin käyttövesi}}, \quad (11)$$

missä

$Q_{\text{kok}}$  = Rakennuksen kokonaislämmitysenergiankulutus [kW].

## 7.2 Kaukolämmön kulutus ennen LTO-järjestelmän käyttöönottoa

Kaukolämmön kulutus on merkittävin tekijä MM-rakennuksen energiankulutuksessa monien seurantatietojen pohjalta (Schneider Electric, 2024b). Tarkastellessa kuvion 9 MM-rakennuksen normitettua kaukolämmön kulutusta vuosien 2018–2024 välillä, voidaan havaita merkittävää kaukolämmön kulutusta rakennustasolla. Kuvion 9 perusteella havaitaan myös selkeää kaukolämmön kulutuksen laskua vuosien 2018–2024 välillä. Tämä lasku kuvastaa monia tekijöitä, kuten energiatehokkuuden parantumista, rakennusteknologian kehitystä, energiatehokkaiden järjestelmien käyttöönottoa ja kunnossapidon roolin saumatonta toimintaa. Näiden tekijöiden yhdistelmä on auttanut vähentämään kokonaisvaltaisesti lämmitystarvetta ja siten myös kaukolämmön kulutusta MM-rakennuksessa.

Kuviosta 9 nähdään, että vuoden 2023 puolella välissä vihreällä värillä merkatut kaukolämmön kulutustiedot loppuvat heinäkuuhun, jonka jälkeen kulutustiedot on merkattu punaisella värillä. Nämä punaisella värillä merkatut kaukolämmön kulutustiedot elokuusta 2023 maaliskuuhun 2024 kuvastavat hukkalämmön talteenottojärjestelmän käyttöönoton aikaista ajanjaksoa. Talteenottojärjestelmä oli käyttöönotettu elokuusta lähtien toimimaan lähes täydellä teholla ilman merkittäviä alasajoja ja käynnistysongelmia. Selkeyden vuoksi kuviossa 9 ei ole vielä huomioitu talteenottojärjestelmän tuomaa lämpöenergiaa MM-rakennukselle.

Kuviossa 9 on huomioitu myös lämpimän käyttöveden kulutus MM-rakennuksessa. Lämpimän käyttöveden kulutus oli kuitenkin vähäinen, koska lämmintä käyttövettä kului ainoastaan suihkuissa ja WC-tiloissa. Lämpimän käyttöveden kokonaiskulutus oli arvioitu olevan noin  $296,7 \text{ m}^3$  vuodessa (Kalander, 2024b) ja veden lämmittämiseen kuluva

energia oli arvioitu Motivan (2024a) ilmoittaman laskentamallin, kaavan (12) mukaan. Lämmin käyttövesi on laskettu taulukon 6 parametrien perusteella.

$$Q_{\text{lämmin käyttövesi}} = \frac{\rho_{\text{vesi}} \cdot c_{p,\text{vesi}} \cdot V_k \cdot (T_2 - T_1)}{3600 \frac{\text{s}}{\text{h}}}, \quad (12)$$

missä

$Q_{\text{lämmin käyttövesi}}$  = Veden lämmittämiseen kuluva energia [kWh]

$\rho_{\text{vesi}}$  = Veden tiheys [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$c_{p,\text{vesi}}$  = Veden ominaislämpökapasiteetti [ $\text{kJ}/\text{kg}^\circ\text{C}$ ]

$V_k$  = Vedenkulutus [ $\text{m}^3$ ]

$T_2$  = Lämmitetyn veden lämpötila [K]

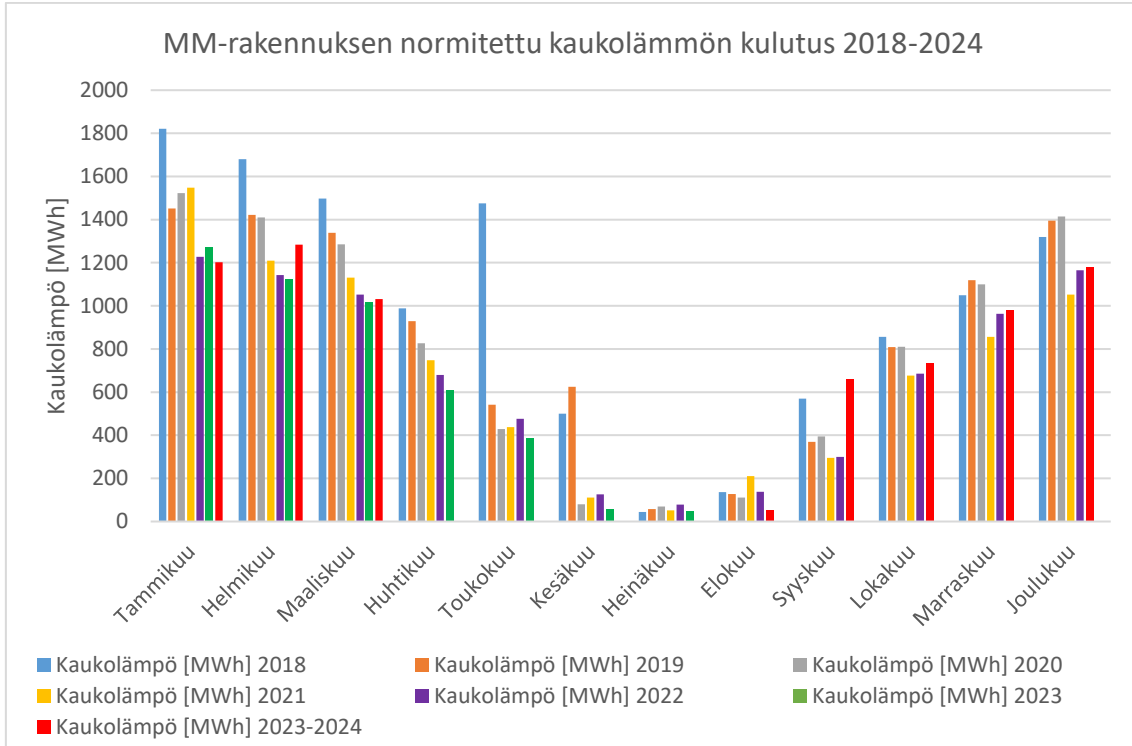
$T_1$  = Lämmitettävän veden lämpötila [K]

$3600 \frac{\text{s}}{\text{h}}$  = Yksikkömuunnoskerroin.

**Taulukko 6.** Lämpimän käyttöveden laskennassa käytetyt parametrit (Mäkelä ja muut, 2022, s. 178; Kalander, 2024b).

Parametri	Tunnus	Arvo
Veden tiheys	$\rho_{\text{vesi}}$	998 $\text{kg}/\text{m}^3$
Veden ominaislämpökapasiteetti	$c_{p,\text{vesi}}$	4,19 $\text{kJ}/\text{kg}^\circ\text{C}$
Vedenkulutus	$V_k$	296,7 $\text{m}^3$
Lämmitetyn veden lämpötila	$T_1$	10 $^\circ\text{C}$
Lämmitettävän veden lämpötila	$T_2$	55 $^\circ\text{C}$
Yksikkömuunnoskerroin	–	3600 $\text{s}/\text{h}$

Taulukon 6 veden tiheys ja ominaislämpökapasiteetti todettiin riittäväksi kyseisillä arvoilla, koska lämpimän käyttöveden lämmitysenergia todettiin hyvin vähäiseksi ja kyseisillä arvoilla päästiin riittävään tarkkuuteen (Kalander, 2024b; Mäkelä ja muut, 2022, s. 178). Kaavan (12) ja taulukon 6 parametrien ja avulla saadaan MM-rakennuksen veden lämmittämiseen kuluva energiaksi  $Q_{\text{lämmin käyttövesi/a}} = 15,51$  MWh vuodessa eli kuukautta kohden  $Q_{\text{lämmin käyttövesi/kk}} = 1,29$  MWh.



**Kuvio 9.** MM-rakennuksen normitettu kaukolämmön kulutus vuosilta 2018–2024 (EnerKey, 2024).

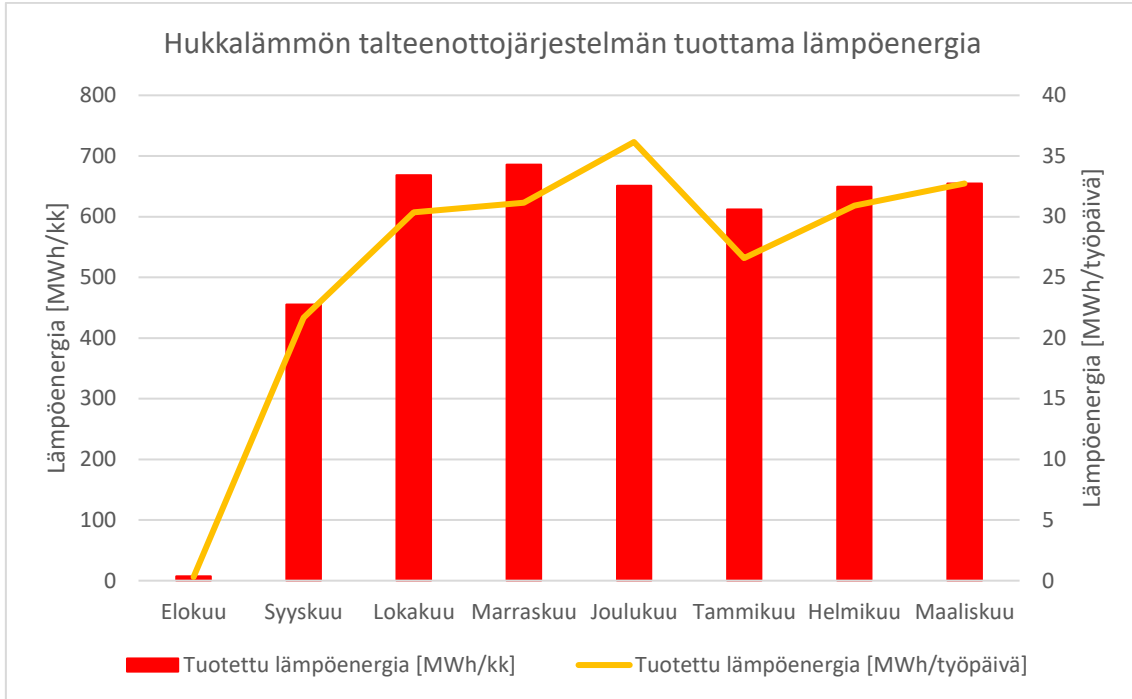
### 7.3 LTO-järjestelmän käyttöönoton tulokset

MM-rakennuksen hukkalämmön talteenottojärjestelmä otettiin virallisesti käyttöön vuonna 2023 elokuussa, jolloin laitteisto saatiin ylösajettua ilman isompia ongelmia. Kuviossa 10 on esitetty hukkalämmön talteenottojärjestelmän lämpöenergian tuoton vaihtelevuus kuukausitasolla elokuu-maaliskuu väliltä. Vastaavasti kuviossa 11 on esitetty jäähdytysenergian tuoton vaihtelevuus samalta aikaikkunalta. Hukkalämmön talteenottojärjestelmän tuottaman lämpö- ja jäähdytysenergian avulla elokuu-maaliskuu väliltä, kyetään määrittämään talteenottojärjestelmän tuoma energiatehokkuuden kokonaisvaltainen parantuminen MM-rakennuksessa.

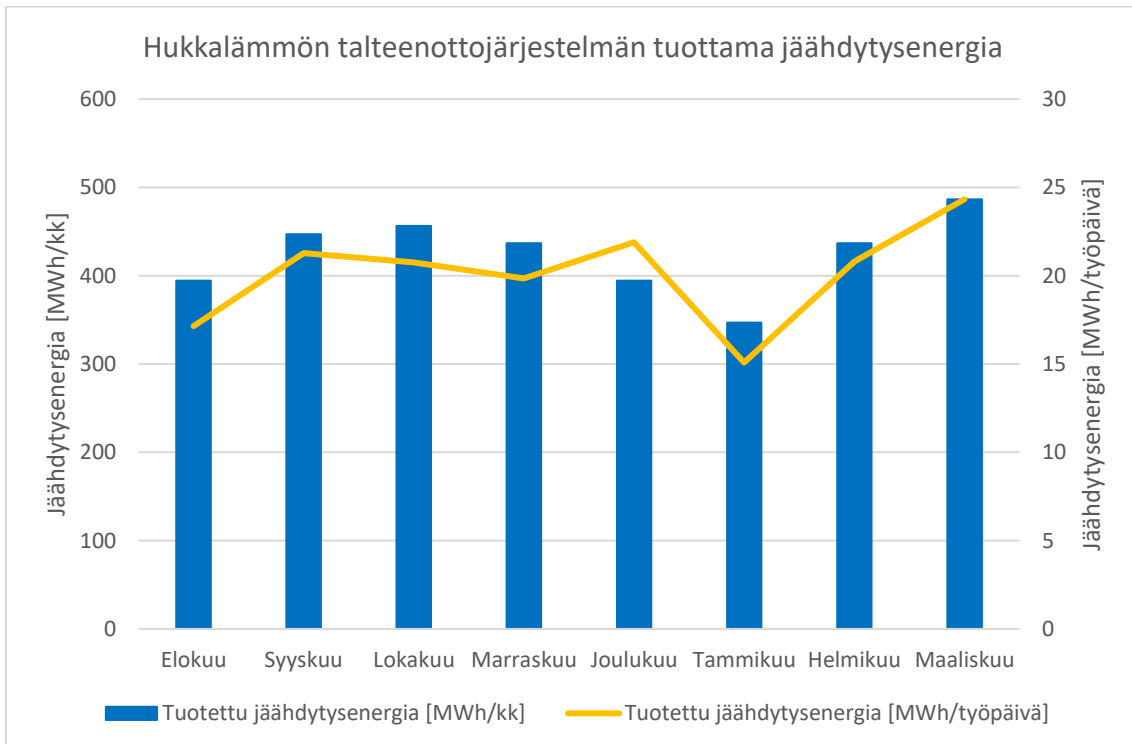
Kuvion 10 perusteella huomataan, että elokuussa ja syyskuussa talteenottojärjestelmän lämpöenergian tuotto jäi huomattavasti vähäisemmäksi, kun tuloksia verrataan lokakuu-maaliskuu välillä tuotettuihin lämpöenergioihin. Elokuussa lämpöenergian tuotto oli vain 7 MWh/kk ja työpäivää kohden 0,30 MWh. Vastaavasti syyskuussa saavutettiin hieman

korkeampi lämpöenergian tuotto 455 MWh/kk ja työpäivää kohden 22 MWh. Tämä huomattava ero johtui käytännössä siitä, että talteenottojärjestelmä oli elokuussa juuri saatu ajettua ylös. Epävarmuustekijänä oli alkuvaiheen sisältämä testivaihe, jonka takia järjestelmä oli poissa käytöstä satunnaisesti, eikä tehoja voitu nostaa määritettyjen asetusarvojen yläpuolelle. Lisäksi kaukolämpöverkkoon ei saa pumpata liian kylmää eikä liian kuumaa vettä, jonka takia testivaihe tuli suorittaa osakuormalla virhemarginaalin minimoimiseksi (Granlund, 2024b). Tutkittavan aikavälin muina kuukausina lokakuu-maaliskuu välillä lämpöenergian tuotto oli hyvin tasaista, keskiarvallisesti noin 650 MWh/kk ja työpäivää kohden noin 30 MWh. Kuviosta 10 havaitaan, että tuotetun lämpöenergian määrä työpäivää kohden suhteessa tuotettuun lämpöenergiaan kuukautta kohden on lähes vakio. Tällöin lämpöenergia jakautuu työpäiviä kohden tasaisemmin ja on paremmin hyödynnettävissä eri lämmityskohteissa, vaikka lämpöenergian tuotto kuukautta kohden olisi epätasaista.

Vastaavasti tuloksista poiketen kuvion 11 mukaisesti, talteenottojärjestelmän tuottama jäähdytysenergian määrä oli merkittävä jo elokuusta lähtien. Esimerkiksi elokuussa saavutettiin 394 MWh/kk jäähdytysenergian tuotto, joka oli työpäivää kohden 17 MWh. Jäähdytysjärjestelmä ei ole yhteydessä Strömberg Parkin kaukolämpöverkkoon, joten siihen suuntaan ei liittynyt rajoitteita. Näin ollen tuotettua jäähdytysenergiaa voitiin pumpata MARX 1–3 sulatusuuneille jo käyttöönoton alkuvaiheessa lähes täydellä kuormalla. Kuvion 3 perusteella havaitaan, että jäähdytysenergian tuotto on keskiarvallisesti noin 425 MWh/kk ja työpäivää kohden noin 20 MWh. Ainoastaan tammikuussa tulos poikkesi huomattavasti muiden kuukausien tuotosta, jäähdytysenergian tuoton ollessa vain 347 MWh/kk ja työpäivää kohden 15 MWh. Lisäksi kuviosta 11 havaitaan, että tuotetun jäähdytysenergian määrä työpäivää kohden suhteessa tuotettuun jäähdytysenergiaan kuukautta kohden on myös hyvin vakio. Tällöin jäähdytysenergia jakautuu työpäiviä kohden tasaisemmin ja on paremmin hyödynnettävissä tarvittavissa kohteissa, vaikka jäähdytysenergian tuotto ei olisi täysin vakaata.



**Kuvio 10.** Hukkalämmön talteenottojärjestelmän lämpöenergian tuotto elokuu-maaliskuu väliltä vuosina 2023–2024 (Schneider Electric, 2024b).

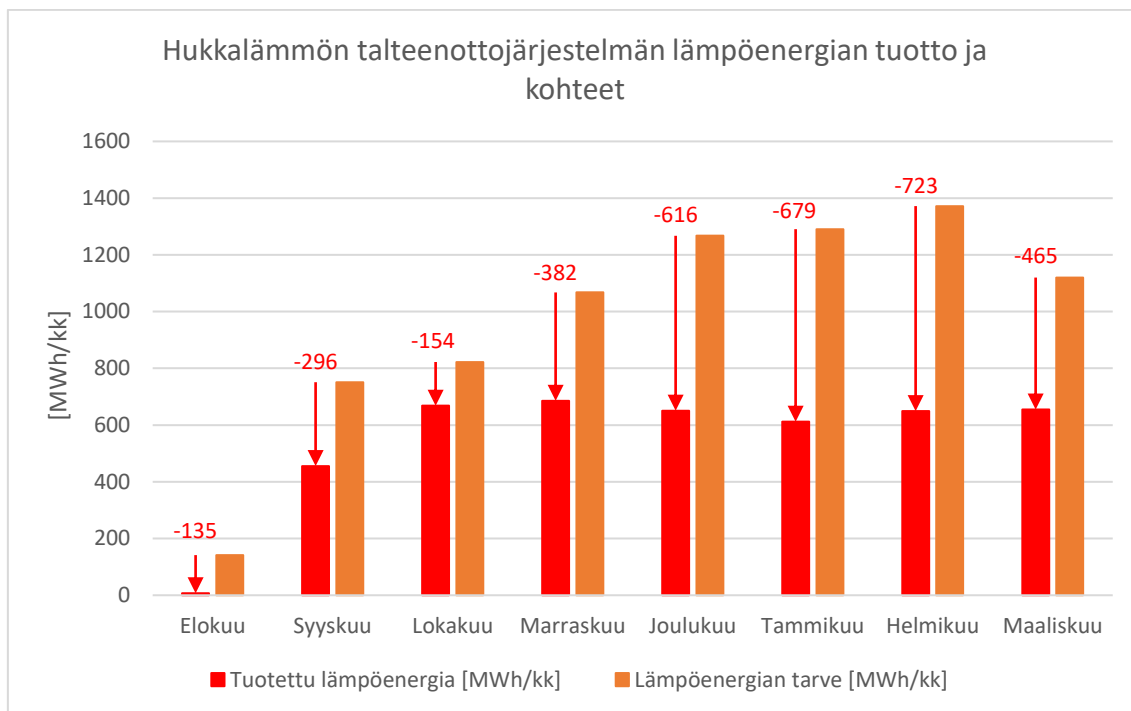


**Kuvio 11.** Hukkalämmön talteenottojärjestelmän jäähdytysenergian tuotto elokuu-maaliskuu väliltä vuosina 2023–2024 (Schneider Electric, 2024b).

### 7.3.1 Lämmityspiirin tuoma energiankulutuksen vähentyminen

MM-rakennuksen hukkalämmön talteenottojärjestelmän lämmityspiirin avulla oli tarkoitus lämmittää rakennusta ja esilämmittää AL1A teollisuusuunia sekä AL2 pohjamaalaus- ja pintamaalaus-uuneja. Analyysissa oli huomioitu MM-rakennuksen kaukolämmön muuttuva tarve vuodenajan ja kuukausien mukaan kuvion 9 tietojen pohjalta sekä teollisuusuunien lämpöenergian vakiotarve, joka on esitetty taulukossa 5. Kuvion 12 perusteella nähdään, että rakennuksen ja teollisuusuunien kokonaislämmön tarve oli elokuussa 142 MWh/kk, jolloin talteenottojärjestelmän lämpöenergian tuotto oli vain 7 MWh/kk. Tällöin lämpöenergian tarve jäi vajaaksi -135 MWh/kk, jota kuvastetaan kuviossa 12 punaisella värillä merkatulla nuolella. Tämä poikkeama johtui aiemmin mainitusta käyttöönoton alkuvaiheen tehorajoituksesta, eikä järjestelmä kyennyt toimimaan toivotulla teholla (Granlund, 2024b). Vastaavasti syyskuussa lämpöenergian tarve oli 751 MWh/kk ja lämpöenergian tuotto oli 455 MWh/kk, jolloin lämpöenergian tarve jäi vajaaksi -296 MWh/kk, eikä järjestelmä kyennyt tuottamaan kaikkea tarvittavaa lämpöenergiaa kohteille.

Lokakuussa lämpöenergian tarve jäi hieman vajaaksi, -154 MWh/kk, koska lämpöenergian tarve oli 822 MWh/kk ja tuotto vain 668 MWh/kk. Marraskuussa lämpöenergian tarve oli hieman korkeampi, 1067 MWh/kk ja tuotto 685 MWh/kk, jolloin lämpöenergian tarve jäi vajaaksi -382 MWh/kk. Joulukuussa lämpöenergian tarpeen ollessa 1267 MWh/kk lämpöenergian tuotto oli 651 MWh/kk, jolloin lämpöenergian tarve jäi vajaaksi -616 MWh/kk. Tammikuussa lämpöenergian tarve oli lähes samaa suuruusluokkaa 1291 MWh/kk ja tuotto 612 MWh/kk, jolloin lämpöenergian tarve jäi vajaaksi -679 MWh/kk. Helmikuussa saavutettiin työn kannalta huonoin tilanne, koska lämpöenergian tarve oli korkeimmillaan jopa 1372 MWh/kk, jolloin lämpöenergian tuotto oli vain 649 MWh/kk eli lämpöenergian tarve jäi vajaaksi peräti -723 MWh/kk. Vastaavasti maaliskuussa lämpöenergian tarve laski 1120 MWh/kk tienoille lämpöenergian tuoton ollessa 655 MWh/kk eli lämpöenergian tarve jäi vajaaksi -465 MWh/kk. Lämpöenergian tuotto pysyi tästä huolimatta suhteellisen vakaana lämpöenergian tarpeen kasvaessa lähes lineaarisesti lokakuusta maaliskuuhun.



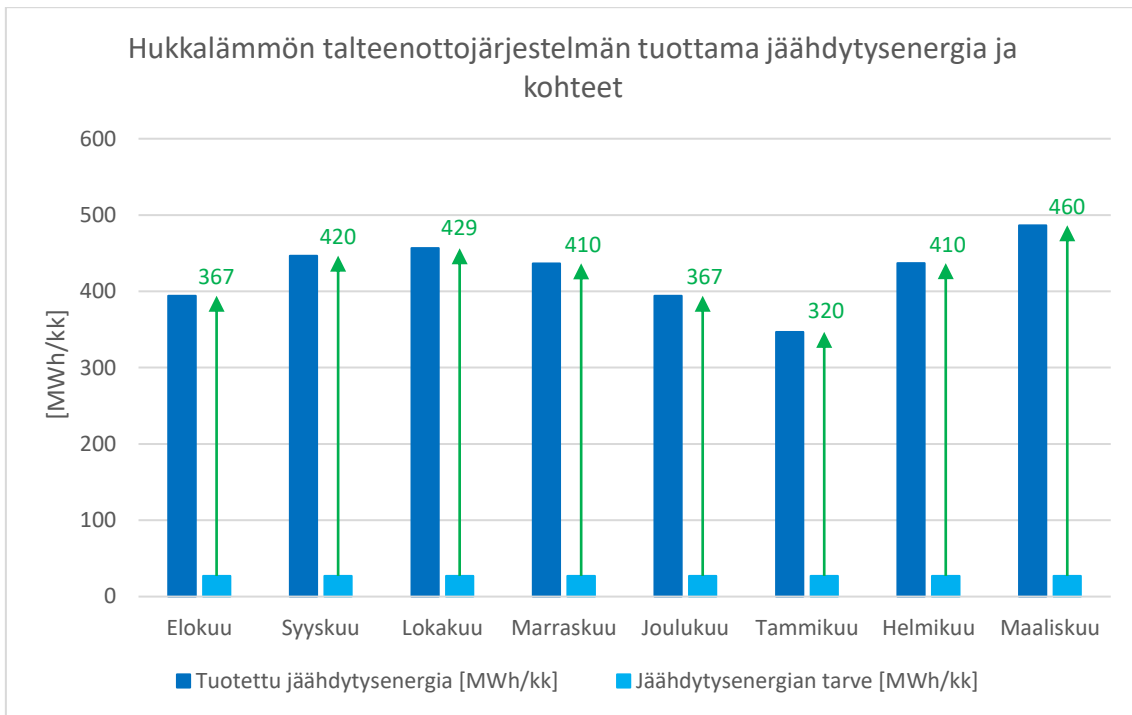
**Kuvio 12.** Hukkalämmön talteenottojärjestelmän lämpöenergian tuotto ja kohteet sekä vajaaksi jäänyt lämpöenergian määrä elokuu-maaliskuu väliltä vuosina 2023–2024.

### 7.3.2 Jäähdytyspiirin tuoma energiankulutuksen vähentyminen

MM-rakennuksen hukkalämmön talteenottojärjestelmän jäähdytyspiirin avulla oli tarkoitus jäähdyttää MARX 1–3 sulatusuunien jäähdytysvettä, jotta Chiller-jäähdytysjärjestelmien (VJK-401 ja VJK-402) sähkönkulutus saataisiin alas. Analyysissa oli huomioitu MM-rakennuksen jäähdytysenergian vakiotarve, joka on esitetty taulukossa 5. Kuviosta 13 nähdään, että Chiller-jäähdytysjärjestelmien kokonaisjäähdytysenergian tarve oli vakio 27 MWh/kk, jolloin elokuu-maaliskuu aikaikkunalla jäähdytysenergian määrä riitti joko kuukautena ja sähkönkulutus saatiin kokonaan alas. Esimerkiksi elokuussa jäähdytysenergian tuotto oli 394 MWh/kk, jolloin tarve oli vakio 27 MWh/kk. Ainoastaan Chiller-jäähdytysjärjestelmän kiertovesipumput kuluttivat sähkötehoa yhteensä 3,14 MWh/kk ja vuodessa 37,68 MWh/a (ABB Ability, 2024a).

Jäähdytysenergiaa jäi tässä tapauksessa yli merkittävästi, jonka takia järjestelmää ei ole kannattavaa ajaa täydellä teholla, koska kulutuskohteita ei ole riittävästi liitettynä

järjestelmään. Esimerkiksi elokuussa jäähdytysenergiaa jäi yli peräti 367 MWh/kk. Vastaavasti syyskuussa noin 420 MWh/kk, lokakuussa noin 429 MWh/kk, marraskuussa noin 410 MWh/kk, joulukuussa noin 367 MWh/kk, tammikuussa noin 320 MWh/kk, helmikuussa noin 410 MWh/kk ja maaliskuussa noin 460 MWh/kk. Tätä on kuvastettu kuviossa 13 vihreällä värillä merkatuilla nuolilla. Jäähdytysenergian tuotto ja tarve pysyi kuitenkin suhteellisen vakaana jokaisena tutkittavana kuukautena.



**Kuvio 13.** Hukkalämmön talteenottojärjestelmän jäähdytysenergian tuotto ja kohteet sekä yli jäänyt jäähdytysenergian määrä elokuu-maaliskuu väliltä vuosina 2023–2024.

#### 7.4 Kaukolämpöverkon paluveden lämpötilan optimointi – skenaario

Vaasan ABB Oy, IEC LV Motorsin aluelämpöverkon paluveden lämpötilan vaihteluvälin heilahdella ääripäiden 35–65 °C välillä asettaa haasteita järjestelmän tehokkaalle hallinnalle (Granlund, 2024c). Granlund Oy:n asiantuntijoiden perusteella eräs tekijä, joka nostaa paluveden lämpötilaa, on ABB Oy:n lähellä sijaitsevan Vaasan kaukolämpöverkoyhtiön lämpölaitoksen käynnistäminen kovien pakkasien aikaan, kun lisäkapasiteettia tarvitaan. Tämä nostaa kaukolämpöverkon paluveden lämpötilaa, ja sen vaikutus tulisi

minimoida mahdollisuuksien mukaan (Granlund, 2024c). Toinen tärkeä näkökulma paluueden lämpötilan optimoinnissa on viereisten kiinteistöjen lämmönjakokeskusten toiminta. Erityisesti vanhempien teollisuuskiinteistöjen lämmitysjärjestelmät, jotka on mitoitettu korkeammille lämpötiloille, kuten 90/50 °C, voivat aiheuttaa paluueden lämpötilan merkittävää kasvua koko kaukolämpöverkostossa. Tässä 90 °C viitta menoveden- ja 50 °C paluueden lämpötilaan. Uusimpien kaukolämpövaatimusten ja määräysten K1 ollessa 60/30 °C, on tärkeää, että erityisesti vanhemmat järjestelmät päivitetään uusien kriteereiden puitteissa vastaamaan yhteneväistä tasoa (Energiateollisuus, 2022). Tässä vastaavasti 60 °C viitta menoveden- ja 30 °C paluueden lämpötilaan.

Yllä mainittujen tietojen pohjalta on laadittu Vaasan ABB Oy:n ja Granlund Oy:n toimesta ehdotus paluueden lämpötilan optimoinnille ulkolämpötilan funktiona. Optimointi noudattaisi ennalta määritettyä mitoitusperiaatetta, joka mukailisi vallitsevaa ulkolämpötilaa. Kesäaikaan ulkolämpötilan noustessa, paluueden lämpötilaa laskettaisiin ja talviaikaan ulkolämpötilan laskiessa, paluueden lämpötilaa nostettaisiin. Ennalta määritetty mitoitus toteutetaan lämpötilan pysyvyyskäyrän tietojen pohjalta. Tässä mitoituksessa huomioitaisiin talteenottojärjestelmän käyttökuukaudet eli elokuu-maaliskuu välinen aikaikkuna. Schneider Electric Oy:n rakennusautomaatiosta saatujen tietojen pohjalta voitiin määrittää optimaaliset paluueden lämpötilat kuukausitason tarkkuudella (Schneider Electric, 2024b). Tiedot ovat esitetty taulukossa 8. Granlund Oy:n ilmoittamien tietojen pohjalta, paras paluueden lämpötilan optimoinnin skenaario saavutetaan, kun kaukolämpöverkon paluueden lämpötilaa kyetään pudottamaan 5 °C alaspäin jo olemassa olevasta lämpötilasta (Granlund, 2024c). Tämä vaatii aiemmin mainittuja toimenpiteitä lämmönjakokeskuksiin ja lämmönvaihtimiin. Schneider Electric Oy painottaa, että optimoinnissa ensisijaisen tärkeäksi nousee lämmönjakokeskusten huoltojen ja kunnossapidon toteutettavuus, jotta paluueden lämpötilan laskeminen saavutetaan teknisten seikkojen puitteissa (V. Kinnunen, henkilökohtainen keskustelu, 15.3.2024).

Samalla mitoitettiin menoveden lämpötila vastaamaan lämpöpumppujen mitoitusarvoja, jotka on todettu kokemukseräisen tiedon ja vastaavien projektien perusteella parhaaksi

optioiden 1 ja 2 mukaisesti (Granlund, 2024c). Optio 1 viittaa menoveden lämpötilan asetusarvoon 75 °C ja optio 2 vastaavasti menoveden lämpötilan asetusarvoon 80 °C. Optiot 1 ja 2 antavat viitteitä siitä, kuinka tarkoituksenmukaista paluuveden optimoinnissa on tutkia myös menoveden lämpötilaa, joka on linkitettyä paluuveden lämpötilan asetusarvoon. Alla olevassa taulukossa 7 on esitettyä paluuveden lämpötilan optimoinnin mitoitusarvot sekä menoveden lämpötilat optioilla 1 ja 2.

**Taulukko 7.** Meno- ja paluuveden lämpötilan optimoinnin mitoitusarvot.

Ajankohta (2023-2024)	Menoveden lämpötila optio 1 $T_{\text{meno 1}}$ [°C]	Menoveden lämpötila optio 2 $T_{\text{meno 2}}$ [°C]	Paluuveden lämpötila $T_{\text{paluu}}$ [°C]
Elokuu	75	80	36,31
Syyskuu	75	80	40,11
Lokakuu	75	80	45,65
Marraskuu	75	80	40,95
Joulukuu	75	80	37,28
Tammikuu	75	80	33,74
Helmikuu	75	80	29,84
Maaliskuu	75	80	29,32

Hukkalämmön talteenottojärjestelmästä saadun materiaalin perusteella voidaan antaa seuraavat arvot, joilla saadaan laskettua kokonaislämpöenergia optioilla 1 ja 2. Tämä lämpöenergia on teoriassa hyödynnettävissä kaukolämpöverkosta kyseisillä mitoitusarvoilla. Hukkalämmön talteenottojärjestelmästä saadut tilavuusvirrat elokuu-maaliskuu väliltä on esitetty taulukossa 8.

**Taulukko 8.** Kuukausittaiset keskiarvot tilavuusvirrasta lämmityspuolella (Schneider Electric, 2024b).

Ajankohta (2023-2024)	$\dot{V}$ [m <sup>3</sup> /h]
Elokuu	23,29
Syyskuu	30,28
Lokakuu	31,53
Marraskuu	28,10
Joulukuu	24,67
Tammikuu	23,51
Helmikuu	27,37
Maaliskuu	24,46

Hyödynnettävissä oleva teoreettinen lämpöenergia optioilla 1 ja 2 saadaan laskettua taulukon 7 ja 8 tuloksien perusteella sekä taulukon 6 veden tiheydellä ja

ominaislämpökapasiteetilla, mukaillen luvussa 7.2 esitettyä kaava (12). Tulokset ovat esitettynä alla olevassa taulukossa 9.

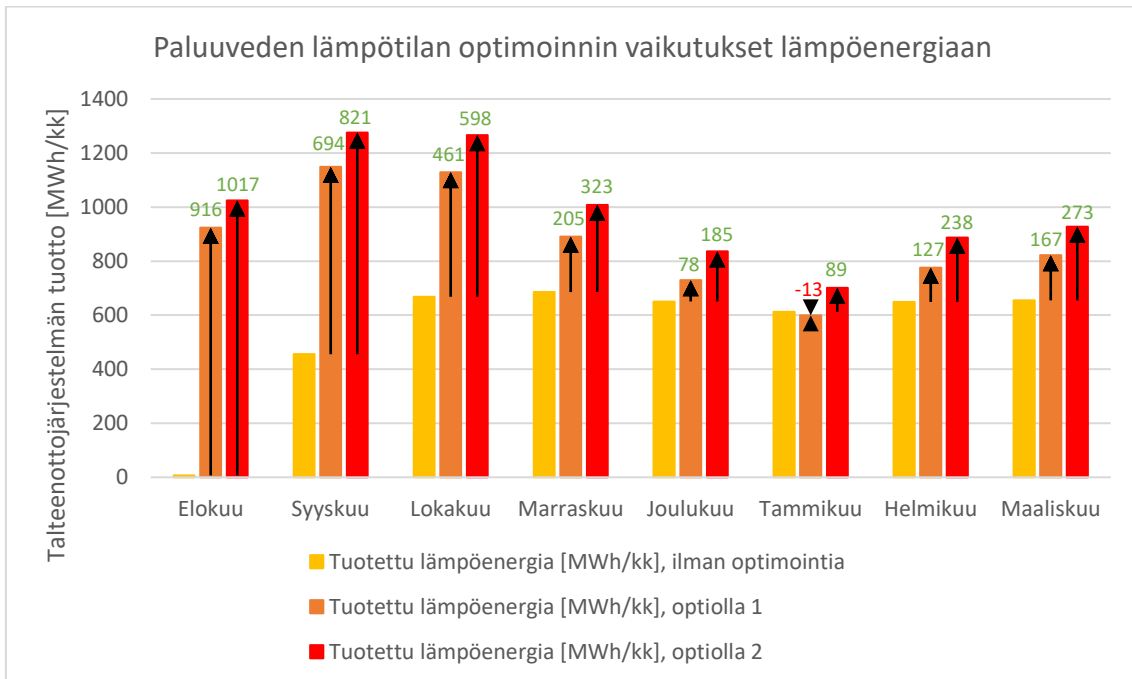
**Taulukko 9.** Hyödynnettävissä olevat lämpöenergian määrät optioilla 1 ja 2.

Ajankohta (2023-2024)	Lämpöenergia $Q_{\text{optio 1}}$ [MWh/kk]	Lämpöenergia $Q_{\text{optio 2}}$ [MWh/kk]
Elokuu	923	1024
Syyskuu	1149	1276
Lokakuu	1129	1266
Marraskuu	890	1008
Joulukuu	729	836
Tammikuu	599	701
Helmikuu	776	887
Maaliskuu	822	928

Taulukon 9 tuloksista on laadittu kuvion 14 mukainen graafinen havainnollistus, jossa ilmenee paluuveden lämpötilan optimoinnin tulokset optioilla 1 ja 2, ja niitä verrataan lämpöenergian tuottoon ilman optimointia. Mustalla värillä merkatut nuolet kuvastavat lämpöenergian määrän kasvua tai vähentymistä optioilla 1 ja 2. Kuvion 14 perusteella havaitaan, että erityisesti elokuussa ja syyskuussa saavutettiin merkittävät lämpöenergian tuottojen parantumiset optioilla 1 ja 2. Elokuussa optiolla 1 onnistuttiin parantamaan lämpöenergian määrää noin 916 MWh/kk ja optiolla 2 noin 1017 MWh/kk. Merkittävä ero johtui alkuvaiheen käyttöönoton tuomasta tehonrajoituksesta elokuussa, jonka takia tulos näyttäytyy korkeampana lämpöenergiana (Granlund, 2024b). Tämän takia elokuun tulosta ei huomioida lopullisissa laskuissa, jotta lopputulos ei vääristyisi ja tulos vastaisi tavoitetta paremmin. Vastaavasti syyskuussa lämpöenergian määrä kasvoi optiolla 1 noin 694 MWh/kk ja optiolla 2 noin 821 MWh/kk. Lokakuussa optiolla 1 saavutettiin 461 MWh/kk parempi lämpöenergian määrä ja vastaavasti optiolla 2 saavutettiin 598 MWh/kk parempi lämpöenergian määrä. Marraskuussa lämpöenergian määrä optiolla 1 oli noin 205 MWh/kk korkeampi ja optiolla 2 noin 323 MWh/kk korkeampi.

Kuviosta 14 on havaittavissa, että erityisesti talviaikaan joulukuu-helmikuu ajanjaksolla, optimoinnin tuomat lämpöenergian määrät tasoittuvat. Tämä johtuu siitä, että talvikausien aikana on kovia pakkasjaksoja, jolloin menoveden lämpötila voi olla paikoittain

huippukulutuksen aikaan jopa 115 °C. Tällöin paluuveden lämpötila on hetkittäin jopa 60–65 °C (Granlund, 2024c), ja tämä vaikuttaa lämpöenergian määrään huomattavasti. Kuitenkin paluuveden optimoinnilla saavutettiin joulukuussa optiolla 1 noin 78 MWh/kk korkeampi lämpöenergian määrä ja optiolla 2 noin 185 MWh/kk korkeampi lämpöenergian määrä. Tammikuussa optiolla 1 saavutettiin noin -13 MWh/kk huonompi lämpöenergian määrä ja optiolla 2 noin 89 MWh/kk parempi lämpöenergian määrä. Helmikuussa vastaavasti saavutettiin optiolla 1 noin 127 MWh/kk ja optiolla 2 noin 238 MWh/kk parempi lämpöenergian määrä. Maaliskuussa optiolla 1 noin 167 MWh/kk ja optiolla 2 noin 273 MWh/kk parempi lämpöenergian määrä. Näin ollen keskiarvallisesti optio 1 tuotti syyskuu-maaliskuu välillä 245,57 MWh/kk korkeamman lämpöenergian määrän ja optiolla 2 tulos oli 361 MWh/kk korkeampi lämpöenergian määrän verrattuna ilman optimointia. Tuloksien pohjalta voidaan todeta, että erityisesti syyskuu-marraskuu välillä optiolla 2 saavutetaan selkeät edut lämpöenergian määrän suhteen.



**Kuvio 14.** Paluuveden lämpötilan optimoinnin vaikutukset LTO-järjestelmälle lämpöenergian kasvun suhteen elokuu-maaliskuu välillä vuosina 2023–2024.

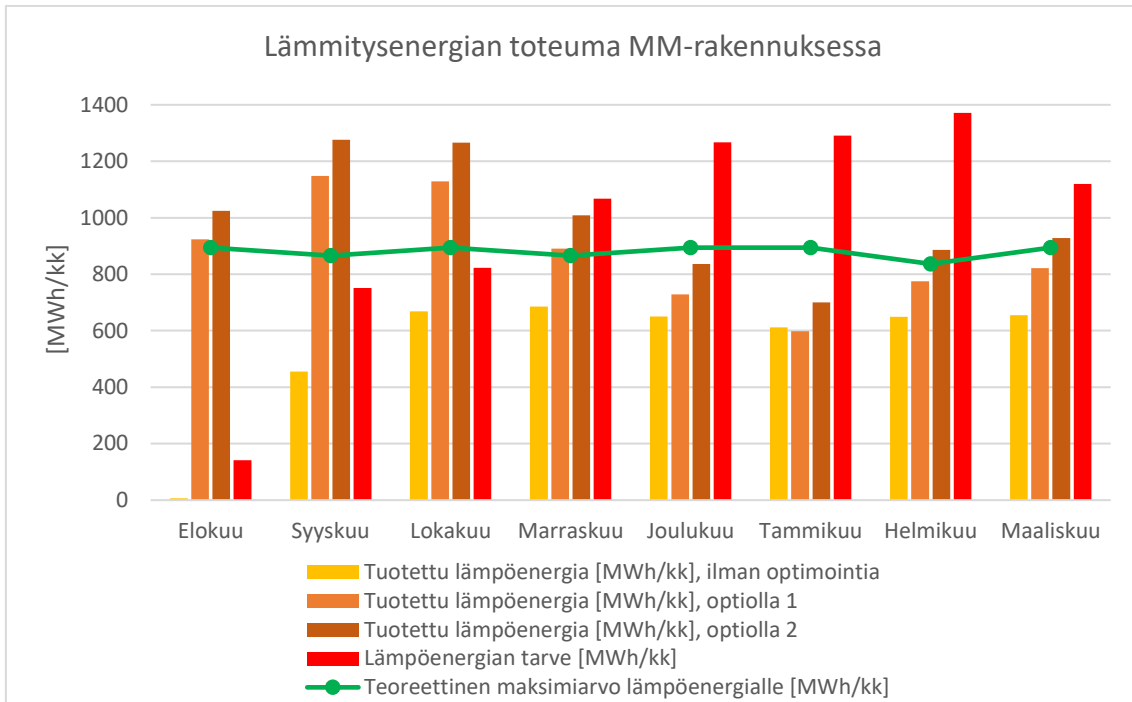
## 7.5 LTO-järjestelmän energiatehokkuuden toteuman analysointi

Hukkalämmön talteenottojärjestelmän energiatehokkuuden toteuma on esitettyä kuvioissa 15 ja 16. Kuviossa 15 on toteuma lämmityskäytössä ja kuviossa 16 jäähdytyskäytössä. Toteuma huomioi kuviossa 15 talteenottojärjestelmän tuotetun lämpöenergian määrän ilman optimointia, optimoinnilla optioilla 1 ja 2 sekä teoreettisen maksimiarvon lämpöenergialle, joka voidaan ottaa järjestelmästä ulos. Teoreettinen maksimiarvo lämpöenergialle on laskettu luvussa 6.3 esitetyn maksimi lämpötehon  $Q_{\text{heat}} = 1202 \text{ kW}$  ja todellisten käyttötuntien avulla (Schneider Electric, 2024b). Tuloksia verrataan lämpöenergian kokonaistarpeeseen MM-rakennuksessa ja se huomioi kaukolämmön tarpeen ja teollisuusuunien lämmityksen. Tämän lisäksi kuviossa 16 otetaan kantaa jäähdytysenergian tuottoon ja teoreettiseen maksimiarvoon jäähdytysenergian tuotossa. Teoreettinen maksimiarvo jäähdytysenergialle on niin ikään laskettu luvussa 6.3 esitetyn maksimi jäähdytystehon  $Q_{\text{cold}} = 727 \text{ kW}$  ja todellisten käyttötuntien avulla (Schneider Electric, 2024b). Tätä tulosta verrataan jäähdytysenergian tarpeeseen MM-rakennuksessa.

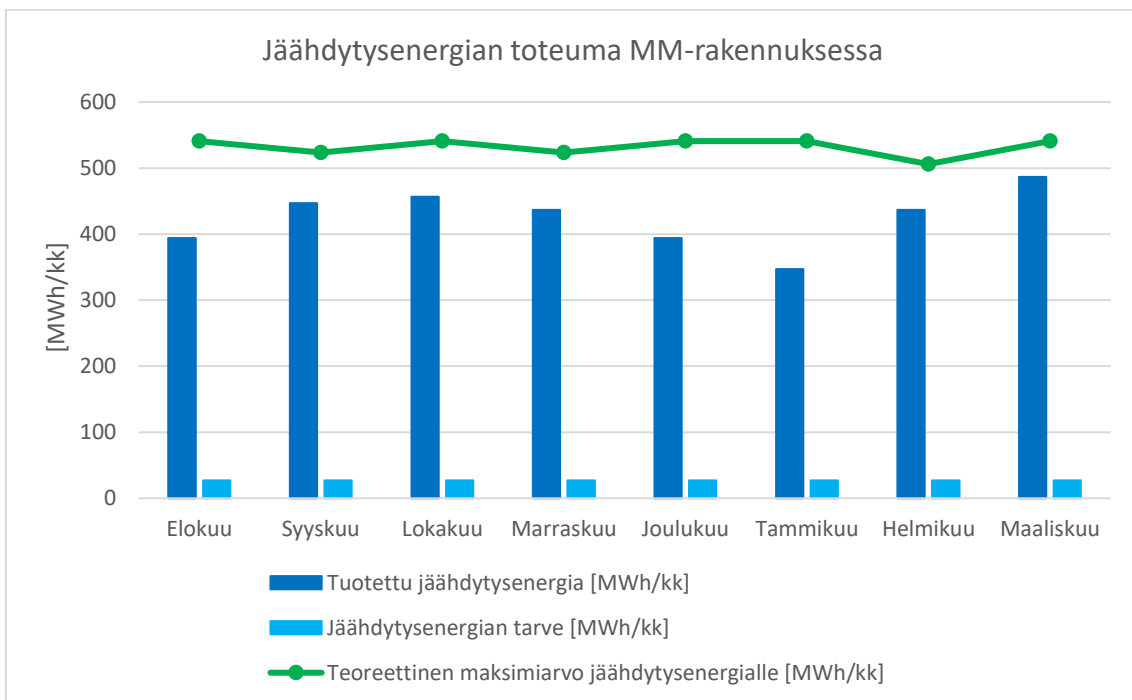
Kuviosta 15 havaitaan, että talteenottojärjestelmän lämpöenergian tuotto ei kykene elokuu-maaliskuu välillä saavuttamaan täydellistä lämpöenergian tarvetta. Elokuussa lämpöenergian tarve jäi käytännössä kokonaan saavuttamatta, koska lämpöenergian tarve kykeni kattamaan 7 MWh eli 5 % koko lämmitysenergian tarpeesta. Talteenottojärjestelmän käyttöönoton alkuvaiheen sisältämä testivaihe rajoitti tehoja, eikä järjestelmä kyennyt toimimaan normaalissa tilassa (Granlund, 2024b). Tästä syystä tulosta ei huomioida myöhemmissä tuloksissa, jotta lopputulos vastaisi tavoitetta mahdollisimman tarkasti. Talteenottojärjestelmä kykeni kuitenkin kattamaan syyskuu-maaliskuu ajanjaksolla lämpöenergian tarpeesta keskiarvallisesti peräti 625 MWh/kk, joka vastasi 43 % koko rakennuksen lämmitysenergian tarpeesta. Lisäksi kuvion 15 perusteella voidaan sanoa, että teoreettinen maksimiarvo lämpöenergialle poikkesi todellisesta lämpöenergian tuotosta ilman optimointia esimerkiksi syyskuussa 410 MWh/kk eli 47 %. Keskiarvollinen poikkeama syyskuu-maaliskuu ajanjaksolla vastasi noin 252,57 MWh/kk eli 29 % eroa.

Kun huomioitiin talteenottojärjestelmän paluuveden optimointi, havaittiin, että järjestelmä kykeni parantamaan lämmitysenergian tuottoa esimerkiksi syyskuussa optiolla 1 noin 1149 MWh/kk eli 60 % ja optiolla 2 noin 1276 MWh/kk eli 64 % sekä lokakuussa optiolla 1 noin 1129 MWh/kk eli 41 % ja optiolla 2 noin 1226 MWh/kk eli 46 % suhteessa ilman optimointia. Marraskuu-maaliskuu ajanjaksolla tulokset tasoittuivat ja maaliskuussa optiolla 1 saavutettiin noin 822 MWh/kk eli 20 % ja optiolla 2 noin 928 MWh/kk eli 29 % parempi lämpöenergian tuotto kuin ilman optimointia. Näin ollen optiolla 1 saavutettiin tuloksien mukaan keskiarvallisesti 870,57 MWh/kk lämpöenergiaa, joka oli noin 28,21 % parempi kuin ilman optimointia. Vastaavasti optiolla 2 saavutettiin niin ikään keskiarvallisesti 986 MWh/kk lämpöenergiaa, joka oli noin 36,61 % parempi kuin ilman optimointia.

Kuvion 16 mukaan jäähdytysjärjestelmä kykeni kattamaan kokonaisuudessaan jäähdytysenergiaa vaativat kohteet. Jäähdytysenergian tarve täyttyi jokaisena kuukautena ja jäähdytysenergiaa jäi yli merkittävästi. Voidaankin todeta, että talteenottojärjestelmä kykeni kattamaan jäähdytysenergian tarpeen keskiarvallisesti 424,88 MWh/kk, joka vastasi peräti yli 15-kertaista jäähdytysenergian tarvetta. Teoreettinen maksimiarvo jäähdytysenergialle poikkesi todellisesta jäähdytysenergiasta tuotosta elokuussa 147 MWh/kk eli 27 %, syyskuussa 76 MWh/kk eli 15 %, lokakuussa 85 MWh/kk eli 16 %, marraskuussa 86 MWh/kk eli 16 %, joulukuussa 147 MWh/kk eli 27 %, tammikuussa 194 MWh/kk eli 36 %, helmikuussa 69 MWh/kk eli 14 % ja lopuksi marraskuussa 54 MWh/kk eli 10 %. Näin ollen poikkeama oli keskiarvallisesti noin 107,25 MWh/kk eli vastasi 20,13 % eroa.



**Kuvio 15.** Hukkalämmön talteenottojärjestelmän lämpöenergian energiatehokkuuden toteuma suhteessa teoreettisen maksimiarvon lämpöenergiaan.



**Kuvio 16.** Hukkalämmön talteenottojärjestelmän jäähdytysenergian energiatehokkuuden toteuma suhteessa teoreettisen maksimiarvon jäähdytysenergiaan.

## 7.6 LTO-järjestelmän kannattavuus

Hukkalämmön talteenottojärjestelmän käyttökustannuksien avulla voidaan arvioida lämpöpumppujen tuomaa kannattavuutta. Kannattavuus käyttökustannuksien osalta ottaa kantaa muuttuvaan sähkön- ja kaukolämmön hintaan. Tämän työn kannattavuuslaskelmissa käytettiin ABB Oy:n energiatehokkuus raportin antamia kaukolämmön hintoja, jotka vaihtelivat vuosien 2016–2023 aikana välillä 46,58–65,00 €/MWh (ABB, 2024d). Kaukolämmön hintaan on sisällytetty perusmaksu taulukon 11 mukaisesti. Kaukolämmön todelliset hinnat vuosien 2016–2023 aikana on esitetty taulukossa 13. Tässä työssä sähkön hinnan oletetaan vaihtelevan välillä 5–200 €/MWh riittävän tutkintavälin ja siirtymäalueen kartoittamiseksi. Todellisuudessa ABB Oy:n energiatehokkuus raportin mukaan sähkön hinta vaihteli kuitenkin välillä 62,31–91,25 €/MWh vuosien 2016–2023 aikana (ABB, 2024d). Myös tähän on sisällytetty taulukon 11 mukaisesti sähkön hintaan vaikuttavat tekijät.

Laskelmat on toteutettu taulukon 10 perusteella, johon on laskettu elokuu-maaliskuu väliseltä ajalta keskimääräinen lämpöenergian tuotto, keskimääräinen kulutettu sähköenergia ja keskimääräinen COP kerroin. Sähkön ja kaukolämmön hinnoissa huomioitiin muuttujat, jotta kannattavuuslaskelmat sähkön ja lämmön suhteen olisivat vertailukelpoisia keskenään. Sähkön hinnassa huomioitiin siirtomaksu, perusmaksu, tehomaksu ja sähkövero. Kaukolämmön osalta huomioitiin niin ikään perusmaksu. Nämä muuttujat ovat myös esitettynä alla olevassa taulukossa 11.

**Taulukko 10.** Keskimääräiset lämpö- ja sähköenergiat sekä keskimääräiset COP kertoimet (Schneider Electric, 2024b).

Ajankohta (2023-2024)	$Q_{\text{heat, avg}}$ [MWh/kk]	$P_{\text{elect, avg}}$ [MWh/kk]	$COP_{\text{avg}}$
Elokuu	7,00	76,76	0,09
Syyskuu	455,41	227,10	2,01
Lokakuu	668,10	248,05	2,69
Marraskuu	685,50	272,47	2,52
Joulukuu	650,69	255,25	2,55
Tammikuu	611,70	235,29	2,60
Helmikuu	649,11	267,69	2,42
Maaliskuu	676,48	284,28	2,38

**Taulukko 11.** Sähkön ja kaukolämmön hintaan vaikuttavat muuttujat (ABB, 2024d; Vaasan Sähkö, 2024; Vaasan Sähköverkko, 2024).

	Hinta [€/MWh]	Siirtomaksu [€/MWh]	Veroluokka 1 [€/MWh]	Perusmaksu [€/kk]	Tehomaksu [€/kk]
Sähkö	5-200	19,7	22,53	70,52	669,74
Kaukolämpö	46,58-65,00	-	-	1156,75	-

Taulukon 10 ja 11 tietojen pohjalta on toteutettu laskennallinen analyysi sähköllä tuotetulle lämmön hinnalle, joka noudattaa alla olevaa kaavaa (13) ja sen tulokset ovat esitetty taulukossa 12.

$$A = \frac{(B+C+D) \cdot P_{\text{elect,avg}} + (E+F)}{Q_{\text{heat,avg}}}, \quad (13)$$

missä

$A$  = Sähköllä tuotetun lämmön todellinen hinta [€/MWh]

$B$  = Sähkön muuttuva hinta kyseisellä ajanhetkellä [€/MWh]

$C$  = Veroluokka 1 [€/MWh]

$D$  = Sähkön siirtomaksu [€/MWh]

$P_{\text{elect,avg}}$  = Keskimääräinen kulutettu sähköenergia [MWh]

$E$  = Perusmaksu [€/kk]

$F$  = Tehomaksu [€/kW]

$Q_{\text{heat,avg}}$  = Keskimääräinen tuotettu lämpöenergia [MWh].

Taulukoiden 12 ja 13 perusteella havaitaan, että tutkittavalla aikavälillä kaukolämmön ja sähkön muuttuvat hinnat risteävät eri kuukausina erilaisissa kohdissa. Taulukon 12 mukaan elokuussa kannattavuuden rajapistettä ei saavutettu millään sähkön hinnalla, koska sähköenergian kulutus oli 76,76 MWh/kk ja saatu lämpöenergia vain 7 MWh/kk, jolloin jopa 5 €/MWh sähkön hinnalla, sähköllä tuotetun lämmön todelliseksi hinnaksi saatiin 623,2 €/MWh. Poikkeama johtui käyttöönoton alkuvaiheen testivaiheesta, jonka takia järjestelmä oli pois käytöstä satunnaisia aikoja (Granlund, 2024b). Tämän takia elokuun kannattavuutta ei voitu huomioida lopputuloksessa.

Taulukon 12 mukaan syyskuussa kannattavuuden rajapiste kulkee sähkön hinnalla 45 €/MWh, jolloin sähköllä tuotetun lämmön todellinen hinta on 45,12 €/MWh. Tällöin sähkö on vielä halvempaa kuin taulukon 13 todellinen kaukolämmön alarajan 46,58 €/MWh mukainen hinta. Lokakuussa sähkön hinnan ollessa 80 €/MWh sähköllä tuotettu lämmön todellinen hinta on 46,49 €/MWh. Marraskuussa sähkön hinnan ollessa 70 €/MWh sähköllä tuotetun lämmön todellinen hinta osuu välille 45,69 €/MWh. Joulukuussa sähkön hinnalla ollessa 70 €/MWh, todellinen sähköllä tuotetun lämmön hinta on 45,16 €/MWh ja vastaavasti tammikuussa sähkön hinnan ollessa 75 €/MWh todellinen sähköllä tuotetun lämmön hinta on 46,30 €/MWh. Helmikuussa 65 €/MWh sähkön hinnalla todellinen sähköllä tuotetun lämmön hinta on 45,36 €/MWh ja lopuksi maaliskuussa sähkön hinnalla 65 €/MWh todellinen sähköllä tuotettu lämmön hinta on 46,16 €/MWh. Kaikki edellä mainitut tulokset ovat alle taulukon 13 kaukolämmön todellisen hinnan alarajan 46,58 €/MWh, jolloin laskennallisen analyysin mukaisesti on kannattavaa hyödyntää lämpöpumpuilla tuotettua lämpöenergiaa.

Kun otetaan huomioon kaukolämmön todellisen hinnan yläraja 65,00 €/MWh, taulukon 12 tulokset poikkeavat aiemmista. Syyskuussa sähkön hinnan ollessa 85 €/MWh sähköllä tuotetun lämmön todellinen hinta on 65,07 €/MWh. Vastaavasti lokakuussa sähkön hinnalla 130 €/MWh saadaan lämmön todelliseksi hinnaksi 65,05 €/MWh. Marraskuussa sähkön hinnalla 115 €/MWh saadaan lämmön todelliseksi hinnaksi 63,58 €/MWh. Joulukuussa sähkön hinnalla 120 €/MWh saadaan lämmön todelliseksi hinnaksi niin edelleen 64,78 €/MWh ja tammikuussa saadaan lämmön todelliseksi hinnaksi 63,61 €/MWh. Helmikuussa sähkön hinnan ollessa 110 €/MWh saadaan lämmön todelliseksi hinnaksi 63,92 €/MWh ja maaliskuussa 65,07 €/MWh. Täten taulukon 13 kaukolämmön todellisen hinnan vaihteluväli 46,58–65,00 €/MWh asettaa taulukon 12 todelliselle sähköllä tuotetulle lämmön hinnalle poikkeuksellisen laajan siirtymäalueen. Siirtymäaluetta on kuvattu taulukossa keltaisella sävyllä. Vihreä siirtymäalue kuvastaa erittäin kannattavaa talteenottojärjestelmän käyttöä ja punainen alue kannattamatonta järjestelmän käyttöä, kun tarkastellaan sähkön muuttuvia hintatasoja. Täten talteenottojärjestelmä mahdollistaa sen, että lämpöä voidaan tuottaa korkeillakin sähkön hinnoilla, koska COP kerroin on

yli 1. Taulukon 12 keltaisella siirtymäalueella sähköllä tuotetun lämmön todellinen hinta pysyy alhaisempana kuin sähkön hinta. Vihreällä siirtymäalueella sähkön hinta on osittain alhaisempi, koska muuttuvat kustannukset muodostavat merkittävän osan kuluista.

**Taulukko 12.** Sähkön hinta suhteessa sähköllä tuotetun lämmön todelliseen hintaan.

Sähkön hinta [€/MWh]	Sähköllä tuotetun lämmön todellinen hinta [€/MWh]							
	Elokuu	Syyskuu	Lokakuu	Marraskuu	Joulukuu	Tammikuu	Helmi- kuu	Maaliskuu
5	623,2	25,18	18,64	19,85	19,66	19,38	20,62	20,94
10	678	27,67	20,50	21,84	21,63	21,30	22,68	23,04
15	732,8	30,16	22,36	23,83	23,59	23,22	24,74	25,14
20	787,6	32,66	24,21	25,82	25,55	25,15	26,80	27,25
25	842,4	35,15	26,07	27,80	27,51	27,07	28,87	29,35
30	897,2	37,64	27,92	29,79	29,47	28,99	30,93	31,45
35	951,9	40,14	29,78	31,78	31,43	30,92	32,99	33,55
40	1007	42,63	31,64	33,76	33,39	32,84	35,05	35,65
45	1062	45,12	33,49	35,75	35,36	34,76	37,11	37,75
50	1116	47,62	35,35	37,74	37,32	36,69	39,18	39,85
55	1171	50,11	37,21	39,73	39,28	38,61	41,24	41,95
60	1226	52,60	39,06	41,71	41,24	40,53	43,30	44,06
65	1281	55,10	40,92	43,70	43,20	42,46	45,36	46,16
70	1335	57,59	42,78	45,69	45,16	44,38	47,42	48,26
75	1390	60,08	44,63	47,68	47,12	46,30	49,49	50,36
80	1445	62,58	46,49	49,66	49,09	48,23	51,55	52,46
85	1500	65,07	48,34	51,65	51,05	50,15	53,61	54,56
90	1555	67,56	50,20	53,64	53,01	52,07	55,67	56,66
95	1609	70,06	52,06	55,63	54,97	54,00	57,73	58,76
100	1664	72,55	53,91	57,61	56,93	55,92	59,79	60,87
105	1719	75,04	55,77	59,60	58,89	57,84	61,86	62,97
110	1774	77,54	57,63	61,59	60,85	59,77	63,92	65,07
115	1829	80,03	59,48	63,58	62,81	61,69	65,98	67,17
120	1883	82,52	61,34	65,56	64,78	63,61	68,04	69,27
125	1938	85,02	63,20	67,55	66,74	65,54	70,10	71,37
130	1993	87,51	65,05	69,54	68,70	67,46	72,17	73,47
135	2048	90,00	66,91	71,53	70,66	69,38	74,23	75,57
140	2103	92,50	68,76	73,51	72,62	71,31	76,29	77,67
145	2157	94,99	70,62	75,50	74,58	73,23	78,35	79,78
150	2212	97,48	72,48	77,49	76,54	75,15	80,41	81,88
155	2267	99,98	74,33	79,48	78,51	77,08	82,48	83,98
160	2322	102,47	76,19	81,46	80,47	79,00	84,54	86,08
165	2376	104,96	78,05	83,45	82,43	80,92	86,60	88,18
170	2431	107,46	79,90	85,44	84,39	82,85	88,66	90,28
175	2486	109,95	81,76	87,43	86,35	84,77	90,72	92,38
180	2541	112,44	83,62	89,41	88,31	86,69	92,79	94,48
185	2596	114,94	85,47	91,40	90,27	88,62	94,85	96,59
190	2650	117,43	87,33	93,39	92,24	90,54	96,91	98,69
195	2705	119,93	89,18	95,37	94,20	92,46	98,97	100,79
200	2760	122,42	91,04	97,36	96,16	94,38	101,03	102,89

**Taulukko 13.** Kaukolämmön todelliset hinnat vuosien 2016–2023 aikana (ABB, 2024d).

Kaukolämmön todellinen hinta [€/MWh]
46,58-65,00

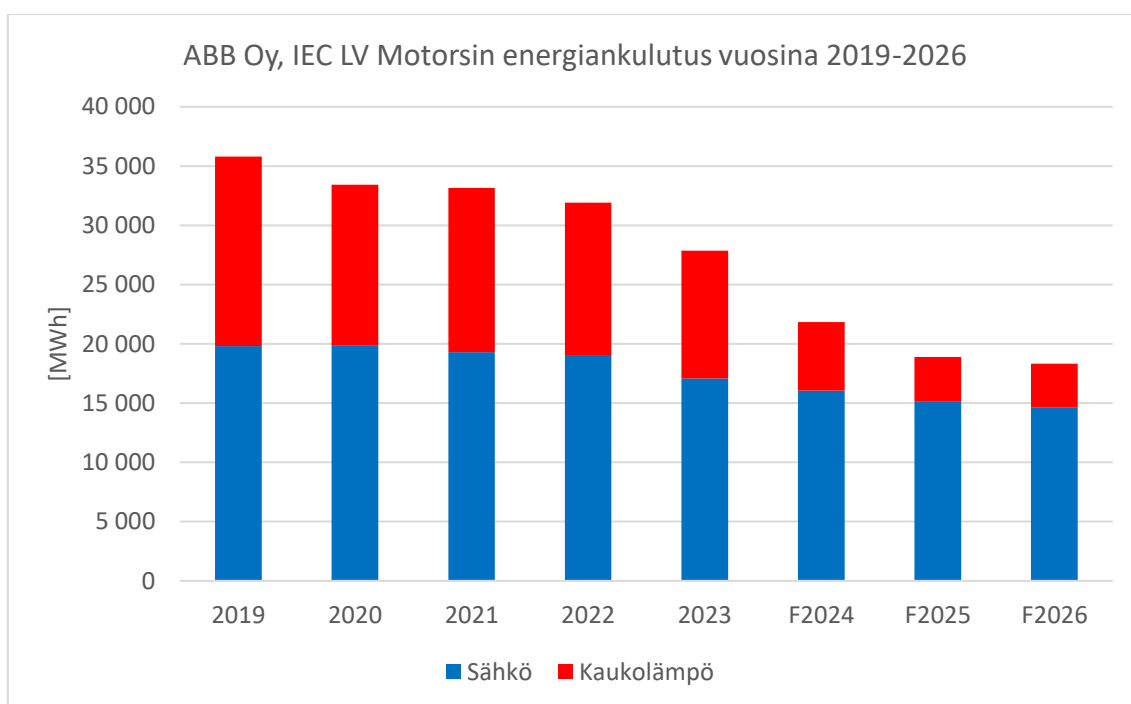
## 7.7 Lämmityksen epäsuora sähköistäminen – vaikutukset

ABB Oy, IEC LV Motorsin kuvion 17 energiankulutuksen kehitys vuosina 2019–2026 kertoo selkeästä ja tasaisesta siirtymästä sähköistettyyn energiankäyttöön ja samanaikaisesti kaukolämmön osuuden merkittävästä pienenemisestä (ABB Ability, 2024b). Kun tarkastellaan sähkön ja kaukolämmön osuuksia kokonaisenergian kulutuksesta, voidaan huomata, että sähköenergian osuus pysyy suhteellisen vakiona vuosina 2019–2022, lasien hieman vuosien 2023–F2026 aikana. Kuviossa 17 tunnus F vuosiluvun edessä viittaa tulevaisuuteen eli kyseessä on ennustelaskelma. Sähkön käytön tasaisuus perustuu siihen, että teollisuuden prosessit vaativat aina tasaisen ja saman potentiaalisen sähköenergiaa ja luokitellaan näin ollen kiinteäksi kustannukseksi.

Kaukolämmön osuus lähtee kuvion 17 mukaan tasaiseen laskuun vuoden 2023 jälkeen, kun talteenottojärjestelmä on käyttöönotettu elokuussa. Verrattaessa vuosien 2023–F2024 kaukolämmön kulutuksia, vuoden F2024 kaukolämmön kulutus peräti puolittuu. Tämä laskee ostettavan kaukolämmön tarvetta merkittävästi, joten myös muuttuvat kustannukset  $V$  laskevat. Vuonna 2019 sähkön osuus oli 55 % kokonaisenergiasta (19,80 GWh) ja kaukolämmön osuus 45 % (15,98 GWh). Kuitenkin vuonna F2026 näiden osuuk-sien ennustetaan muuttuvan 79 % (14,65 GWh) sähkölle ja 21 % (3,67 GWh) kaukolämmölle (ABB Ability, 2024b). Tämä viittaa selkeään sähköisen energiankulutuksen siirtymään, jolloin myös järjestelmän kokonaisenergiatehokkuus kasvaa huomattavasti.

Pääsyyt ja tekijöitä muutokseen ovat teknologian edistyminen sekä energiatehokkaamman laitteiston käyttöönotto (Koskimäki & Niemelä, 2022). Lisäksi kaukolämmön osuuden pieneneminen viittaa energianlähteiden monipuolistamiseen ja vähäpäästöisten vaihtoehtojen hyödyntämiseen lämmöntuotannossa. Hukkalämmön talteenottojärjestelmän lämpöpumpuilla sähkön avulla tuotettu lämmitysenergia hukkalämmöstä on

energiatehokkaampaa tuottaa kuin ostettu kaukolämpö tai suora sähkölämmitys. Energiatehokkaasti tuotetulla lämpöenergialla on järkevää esilämmittää ja lämmittää rakennusta sekä teollisuusuneja verrattuna suoralla sähköllä lämmittämiseen tai ostetulla kaukolämmöllä, kun sähköllä tuotetun lämmön todellinen hinta on luvussa 7.6 esitetyn siirtymäalueen raja-arvojen välimaastossa. Kokonaisenergiatehokkuuden kasvu sähköistymisen seurauksena voidaan nähdä energian käytön hienosäätönä ja optimointina kuviossa 17 vuonna F2026. Sähköenergian käytön lisääminen mahdollistaa tehokkaamman energian hallinnan, joka linkittyy parempaan hallintaan, automaatioon ja ennen kaikkea vallitsevien resurssien optimointiin.



**Kuvio 17.** ABB Oy, IEC LV Motorsin energiankulutus käyttäytymisen arvioidut muutokset vuosina 2019–2026 (mukaihen, ABB Ability, 2024b).

## 8 Pohdinta

Hukkalämmön talteenottojärjestelmän energiatehokkuuden tutkimisen laskennassa käytettiin pyöristämättömiä lukuarvoja, mutta saatu lopputulos pyöristettiin [MWh] luokan tarkkuuteen, joten mahdollinen pyöristyksestä johtuva virhe oli vähäinen järjestelmän kokonaispotentiaali huomioiden. Tämä metodi oli oleellinen, koska kaukolämmön kulutus ja muut kulutuskohteet olivat ilmoitettu [MWh] luokan tarkkuudella, ja tarkkuus todettiin Granlund Oy:n kanssa riittäväksi (Granlund, 2024b). Lisäksi kannattavuuden laskennassa käytettiin niin ikään hyvin tarkkoja lukuarvoja ja lämpöpumppujen kuluttaman sähköenergian euromääräinen kannattavuus mitattiin 5 € tarkkuudella 5–200 €/MWh väliltä. Kaukolämmön osalta hinta vaihteli välillä 46,58–65,00 €/MWh.

### 8.1 MM-rakennuksen energiatehokkuuden parantuminen

Työssä tutkittiin, millainen merkitys hukkalämmön talteenottojärjestelmän käyttöön otolla on case-yrityksen energiatehokkuuteen. MM-rakennuksen energiatehokkuuden parantumisessa havaittiin merkittäviä lainalaisuuksia lämmitys- ja jäähdytyspuolilla. Työn tuloksien perusteella voidaankin todeta, että erityisesti lämmityspuolella saavutetut tulokset olivat huomattavia järjestelmän kokonaispotentiaali ja lämmityskohteiden lämmityskapasiteetti huomioiden. Kuvion 15 mukaan hukkalämmön talteenottojärjestelmä ei kyennyt tuottamaan kaikkea tarvittavaa lämmitysenergiaa elokuussa, jolloin lämpöenergian tarve jäi vajaaksi -135 MWh/kk. Teoriassa syyskuussakin olisi saavutettu optimaalinen lämmitysenergian tarpeen täytyminen, mikäli testivaiheen tehonrajoitukset eivät olisi vaikuttaneet kaukolämpöverkkoon päin (Granlund, 2024b). Syyskuussa lämmitysenergian tarve jäi kuitenkin tässä tapauksessa vajaaksi -296 MWh/kk. Lokakuussa lämpöenergian tarve jäi tavoitearvosta -154 MWh/kk, marraskuussa -382 MWh/kk, joulukuussa -616 MWh/kk, tammikuussa -679 MWh/kk, helmikuussa -723 MWh/kk ja maaliskuussa -465 MWh/kk. Kuitenkin kuvioon 15 perustuen, järjestelmä kasvatti lämmityspuolen energiatehokkuutta keskiarvallisesti noin 625 MWh/kk, joka kattoi peräti 43 % lämmitysenergian tarpeesta kuukautta kohden syyskuu-maaliskuu väliltä tarkasteltuna.

Teoreettinen maksimiarvo lämpöenergialle poikkesi todellisesta lämpöenergian määrästä keskiarvillisesti noin 252,57 MWh/kk. Tuloksen perusteella teoreettinen maksimiarvo lämpöenergialle ja todellinen lämpöenergian määrä poikkesivat toisistaan siis prosentuaalisesti peräti 29 %. On kuitenkin todennäköistä, että lyhyen käyttöönottovälin tutkiminen vaikutti tuloksiin negatiivisesti ja pidemmällä aikavälillä voitaisiin saavuttaa tarkemmat tulokset. Hukkalämmön talteenottojärjestelmän parhaat energiatehokkuus-hyödyt osuvat talvikuukausien aikaan joulukuu-helmikuu välille, vaikka järjestelmä ei kykenekään tuottamaan tarvittavaa lämmitysenergiaa MM-rakennuksen tarpeisiin nähden, joka todettiin kuvion 15 perusteella. Etenkin talvikuukausien aikaan talteenottojärjestelmän tuottama lämmitysenergia tasaa MM-rakennuksen kaukolämmön kulutusta kokonaisvaltaisesti ja vähentää kysyntäpiikkien aiheuttamaa lämmitysenergian tarpeen kuormaa kovien pakkasjaksojen aikana. Tällä on positiivisia vaikutuksia Strömberg Parkin lähialueen lämmönjakokeskuksien toimintaan, joka vaikuttaa niin ikään lähialueen lämmön riittävyteen.

Jäähdytyspuolella havaittiin, että jäähdytysenergia riitti erittäin hyvin tutkittavalla elokuu-maaliskuu välillä, koska jäähdytysenergian tarve oli suhteellisen pieni verrattuna jäähdytysenergian tuottoon. Kuvion 16 mukaan jäähdytysenergiaa jäi keskiarvillisesti yli noin 397,88 MWh/kk, joka on merkittävä ylijäämä. MM-rakennuksessa havaittiin, että jäähdytysenergian tarve on vakio, koska Chiller-jäähdytysjärjestelmä kuluttaa vakio määrän 27 MWh/kk jäähdytysenergiaa joka kuukausi. Näin ollen hukkalämmön talteenottojärjestelmä kykeni parantamaan MM-rakennuksen jäähdytysenergian tarvetta peräti 424,88 MWh/kk, mikä on yli 15-kertaisesti tarvittava jäähdytysenergian tarve, jos ei huomioitu Chiller-jäähdytyslaitteiston vaatimaa kiertovesipumppujen vakio sähköenergian kulutusta. Kuviosta 16 havaittiin myös, että teoreettinen maksimiarvo jäähdytysenergian määrälle poikkesi todellisesta jäähdytysenergian määrästä keskiarvillisesti noin 107,25 MWh/kk eli 20,13 %. Työn jäähdytyspuolen vähäisten kohteiden nojalla, on kannattavaa laajentaa jäähdytysenergiaa tarvitsevia kohteita esimerkiksi MM-rakennuksen valettujen roottorirunkojen jäähdytystunnelien viilentämiseen (ABB, 2024e). Jäähdytystunnelien potentiaali on vielä tuntematon, mutta hyötyjen arvellaan olevan ilmeisiä, koska

talteenottojärjestelmän jäähdytyskapasiteetti todettiin riittäväksi mahdollisten lisäkohteiden laajentamiselle.

## 8.2 Kaukolämpöverkon paluueden lämpötilan optimoinnin vaikutukset

Kaukolämpöverkon paluueden lämpötilan optimointi osoitti huomattavaa lämpöenergian määrän kasvua järjestelmälle. Paluueden lämpötilan optimointi saavutti tukittavalla syyskuu-maaliskuu välillä keskiarvollisesti kuvion 14 mukaan optiolla 1 noin 245,57 MWh/kk eli 28,21 % paremman lämpöenergian määrän ja vastaavasti optiolla 2 noin 361 MWh/kk eli 36,61 % paremman lämpöenergian määrän kuukautta kohden hukkalämmön talteenottojärjestelmän käytölle, kuin ilman paluueden optimointia. Lisäksi kuvion 14 perusteella lämpöenergian määrän havaittiin olevan suurimmillaan erityisesti syyskuu-marraskuu aikavälillä, jonka jälkeen tulokset tasoittuivat. Optimoinnin tuloksissa tulee huomioida kuitenkin se, että paluueden lämpötilan optimointi toteutettiin skenaariopohjaisena, joten todelliset tulokset voivat vaihdella suuntaan tai toiseen. Tähän vaikuttaa valitut lämmönvaihtimet ja paluueden lämpötilojen asetusarvojen määrittäminen optioiden 1 ja 2 mukaisesti. Kuitenkin Granlund Oy:n tekemän arvion pohjalta, tuloksien odotetaan silti olevan vertailukelpoisia tutkittaessa optimoinnin tuomaa lämpöenergian kasvua (Granlund, 2024c).

Optimoinnissa huomioitiin kokemusperäisen havainnoinnin ja aiemmin toteutettujen projektien kautta parhaaksi todetut menoveden lämpötilat  $T_{optio1} = 75 \text{ °C}$  ja  $T_{optio2} = 80 \text{ °C}$ , mutta todellisuudessa lämpötila voi hetkittäin kysyntäpiikkien heilahdella nousta jopa  $T_{tod,1} = 115 \text{ °C}$ :een tai paikoittain laskea  $T_{tod,2} = 70 \text{ °C}$ :een, joka saattaa vaikuttaa tutkittavan kohteen tuloksiin (Koskimäki & Niemelä, 2022, s. 8–12; Granlund, 2024c). Tästä huolimatta kaukolämpöverkon paluueden optimointi vaikuttaa koko kaukolämpöverkon ja hukkalämmön talteenottojärjestelmän toimintaan positiivisesti. Täten työn tuloksien perusteella on kannattavaa tutkia paluueden optimoinnin vaatimia toimenpiteitä.

### 8.3 LTO-järjestelmän hyödyntämisen kannattavuus

MM-rakennuksen hukkalämmön talteenottojärjestelmän kannattavuuslaskelmien perusteella järjestelmää on kannattavaa hyödyntää, kun sähkön hinta vaihtelee syyskuu-maaliskuu aikana välillä 5–80 €/MWh, jolloin sähköllä tuotetun lämmön todellinen hinta osuu välille 18,64–46,49 €/MWh. Tällöin sähköllä tuotetun lämmön todellinen hinta ei ylitä kaukolämmön todellisen hinnan alarajan arvoa 46,58 €/MWh. Mikäli huomioitiin kaukolämmön todellisen hinnan yläraja 65,00 €/MWh, syyskuu-maaliskuu välillä sähkön hinta kykeni vaihtelemaan jopa 5–130 €/MWh, ylittämättä käytännössä kaukolämmön todellisen hinnan ylärajaa. Täten sähkön hinnan siirtymäalueeksi saatiin 5–130 €/MWh, joka kuvasti sähköllä tuotetun lämmön todellisen hinnan siirtymäaluetta 18,64–65,05 €/MWh. Elokuun epälooginen tulos jätettiin huomiotta, koska tämä olisi vääristänyt tulosta merkittävästi. Yllä mainittua tulosta korkeammilla hinnoilla lämpöpumppujen hyödyntäminen ei ole taloudellisesta näkökulmasta katsottuna järkevää kaukolämmön todellisen hinnan vaihdellessa välillä 46,58–65,00 €/MWh. Todettakoon vielä, että MM-rakennuksen sähkön pitkäaikainen hinta vaihteli välillä 62,31–91,25 €/MWh, jolloin hintataso osuu hyvin tuloksien siirtymäalueen välille, jonka perusteella voitiin todeta järjestelmän käytön olevan taloudellisesti kannattavaa ja merkityksellistä (ABB, 2024d).

Kannattavuutta ei voida kuitenkaan määritellä pelkästään rahallisesta näkökulmasta, vaan järjestelmän tuoma lämpöenergian määrä kasvattaa myös ABB Oy:n Strömberg Park alueen energiaturvallisuutta (European Commission, n.d.). Lisäksi lämpölaitoksien näkökulmasta tarkasteltuna hukkalämmön energiatehokas hyödyntäminen vähentää erityisesti talviaikaan kysyntäpiikkien tuomaa lämpökuorman heilahtelua ja painetta vastata kysyntäpiikkeihin nopealla aikaikkunalla, joka on usein vain muutamia minuutteja. Tämä vastaavasti voi vähentää nopeasti käynnistyvien varavoimanlähteiden määrää, jotka useimmiten käyttävät fossiilisia polttoaineita energianlähteenään. Lisäksi voidaan todeta, että lämpöpumpuilla sähkön avulla tuotettu lämpöenergia ei kykene vielä täysin kilpailemaan puun tai turpeen rinnalla hintatasoltaan. Onkin odotettavissa, että tulevaisuudessa tilanne tulee muuttumaan, jos esimerkiksi lämpöpumppujen sähköveroluokkaa muutetaan lämpöpumppuja käyttäville asiakkaille kannattavammaksi.

## 8.4 Hyödyntämismahdollisuudet alueen muissa kohteissa

Tässä työssä tutkittiin hukkalämmön talteenottojärjestelmän tuomaa energiatehokkuuden parantumista MM-rakennuksessa. Diplomityön tuloksien perusteella voi olla perusteltua laajentaa hukkalämmön talteenottojärjestelmän hyödyntämismahdollisuuksia alueen muihin kohteisiin, koska potentiaalia on vielä hyödynnettävissä erityisesti jäähdytyspuolella. Granlund Oy:n laatimien energia-analyysien perusteella on arvioitu, että potentiaaliset vaihtoehdot kaukolämmön kulutukseen perustuen voivat olla seuraavat rakennukset: FF-rakennus, KK-rakennus, KT-rakennus, LP-rakennus ja NP-halli. Kaikki rakennukset sijaitsevat Vaasassa Strömberg Parkissa, lähellä MM-rakennusta. Näistä merkittävin kohde on FF-rakennus, jonka kaukolämmön kulutus oli vuonna 2020 noin 7613 MWh/a (Parkkamäki, 2023, s. 5–6). Kulutuksen perusteella talteenottojärjestelmän tuoma energiankulutuksen vähentyminen olisi täten huomattava.

Lisäksi alueen LP-rakennukseen on suunnitteilla lämpöpumppulaitos, jonka on tarkoitus toimia yhtäläisellä periaatteella kuin MM-rakennuksen talteenottojärjestelmä (Parkkamäki, 2023, s. 5–6). Talteen otetun hukkalämmön lämpötilatasoa nostetaan lämpöpumppujen avulla korkeammalle tasolle ja pumpataan alueen kaukolämpöverkkoon. Lämpöpumppulaitoksen tuoma lisäkapasiteetti mahdollistaa myös alueen muiden rakennuksien energiankulutuksen ja energiatehokkuuden kokonaisvaltaisen parantumisen. Tavoitteena on saada hyödynnettyä kaikki alueen hukkalämpö maksimaalisesti alueen tehtaille, kiinteistöille ja rakennuksille. Alueella toimiva aluelämpöverkko mahdollistaa energiatehokkaan ja pienihäviöisen energiansiirron, koska kaikki kohteet sijaitsevat Strömbergin puistotiellä lyhyen matkan päästä toisistaan.

## 8.5 Jatkotoimenpiteet ja suositukset tulevaisuudessa

Työssä havaittiin merkittäviä lainalaisuuksia, joita olisi hyvä tutkia tulevaisuudessa. Työtä voitaisiin jatkaa luvussa 7.4 tutkitun paluuveden lämpötilan optimoinnin skenaarion käyttöönotolla ja sen vaatimilla toimenpiteillä. Käytännössä toimenpiteet vaativat alueen kaukolämpöverkon lämmönjakokeskuksien ja alajakokeskuksien sekä

lämmönvaihtimien mitoituksien laajamittaista analysointia. Vanhat lämmönvaihtimet tulisi vaihtaa energiatehokkaampiin, jotta paluuveden lämpötilan optimoinnista saataisiin paras hyöty. Tämä vaatii myös yksittäisten lämpöpiirien tarkan mitoituksen siten, että lämpöenergia tulee hyödynnettyä mahdollisimman hyvin virtauskertoimen ollessa optimaalinen.

Työn kannalta tärkeää olisi tutkia yllä mainitun lisäksi, miten tekoälyn hyödyntäminen hukkalämmön talteenottojärjestelmässä vaikuttaisi energiatehokkuuteen tai järjestelmän toimintaan positiivisesti. Hukkalämmön talteenottojärjestelmään keskittyvien tutkimuksien perusteella on löydetty sovelluksia, joissa voitaisiin hyödyntää tekoälyä parametrien valinnassa ja optimoinnin tulosten ennustamiseen (Bannwart, Ngcukayitobi & Tartibu, 2024, s. 238–238). Hukkalämmön talteenoton asteittaiseksi parantamiseksi on esitetty tekoälyn hyödyntämistä erityisesti ohjausjärjestelmän osalta. Hukkalämmön talteenottojärjestelmän yhteyteen integroidun kaksisuuntaisen kaukolämpöverkon älykäs aikajako- ja kaavoitussäätö voidaan asettaa käyttäjien tarpeiden mukaan, mikä mahdollistaa lämmitysjärjestelmän säätämisen reaaliajassa lämmitysveden ulostulon lämpötilan ulkoilmaston dynaamisen muutoksen mukaan (Aixue, Hongnian & Huijuan 2023).

Tekoäly kykenee analysoimaan monimutkaista dataa eri lähteistä, kuten prosessilaitteista ja järjestelmistä sekä havaitsee niissä tiettyjä lainalaisuuksia. Automaattinen kartointi ja tunnistus tekoälyn avulla voivat tarkasti paikantaa potentiaaliset hukkalämmön lähteet teollisuusympäristöissä. Lisäksi tekoäly voi auttaa valitsemaan sopivimman lämmönvaihtimen eri hukkalämmön lähteille lämpötilatason, fluidin koostumuksen ja potentiaalilin mukaan. Koneoppiminen voi analysoida tietoja datapankista ja ympäristömuuttujia määrittääkseen optimaalisen lämmönvaihtimen tiettyyn kohteeseen sopivaksi (Aixue, Hongnian & Huijuan, 2023; Heikkilä & Kiuru, 2014, s. 10–13). Käyttämällä tekoälypohjaisia ennustemalleja, voidaan arvioida, miten hukkalämmön talteenotto vaikuttaa yleiseen energiatehokkuuteen nyt ja tulevaisuudessa ns. digitaalisen kaksosen (Digital Twin) avulla.

## 9 Johtopäätökset

Tässä diplomityössä tutkittiin hukkalämmön talteenottojärjestelmää ja sen vaikutuksia Vaasassa sijaitsevaan ABB Oy, IEC LV Motors case-kohteeseen eli MM-rakennukseen. Työn tavoitteena oli selvittää, millainen merkitys hukkalämmön talteenottojärjestelmän käyttöönotolla on case-kohteen energiatehokkuuteen. Pääpaino oli hukkalämmön energiatehokkaassa hyödyntämisessä rakennuksen ja teollisuuden prosessien lämmitys- ja viilennystarpeiden optimaaliseen täyttämiseen. Lisäksi työssä haluttiin selvittää kaukolämpöverkon paluuveden lämpötilan optimoinnin mahdollisuus suhteessa ulkolämpötilaan sekä vaihtelevan sähkön- ja kaukolämmön hinnoittelujen vaikutukset järjestelmän kustannuksiin ja kannattavuuteen.

Työn tuloksien perusteella voidaan tehdä seuraavat johtopäätökset:

- Talteenottojärjestelmän lämmityspiiri kasvatti MM-rakennuksen energiatehokkuutta keskiarvallisesti 625 MWh/kk, joka kattoi 43 % lämmitysenergian tarpeesta kuukautta kohden syyskuu-maaliskuu aikavälillä.
- Talteenottojärjestelmän jäähdytyspiiri kasvatti MM-rakennuksen energiatehokkuutta keskiarvallisesti 424,88 MWh/kk, mikä vastasi yli 15-kertaista jäähdytysenergian tarpeen täyttymistä.
- Lämmityspiirin lämpöteho ei riitä kattamaan kaikkia lämmitysenergiaa vaativia kohteita elokuu-maaliskuu välillä, mutta tuottaa silti huomattavat energiatehokkuus hyödyt MM-rakennukselle.
- Jäähdytyspiirin teho riittää kattamaan kaikki jäähdytysenergiaa vaativat kohteet elokuu-maaliskuu aikavälillä. Jäähdytysenergiaa jäi yli noin 397,88 MWh/kk, joten on suositeltavaa laajentaa jäähdytysenergiaa vaativia kohteita valettujen roottorirunkojen jäähdytystunnelien viilentämiseen.
- Talteenottojärjestelmän teoreettinen maksimiarvo lämpöenergian määrälle poikkesi todellisesta lämpöenergian määrästä keskiarvallisesti 252,57 MWh/kk, joka vastasi 29,00 % eroa. Teoreettinen maksimiarvo jäähdytysenergian määrälle

poikkesi todellisesta jäähdytysenergian määrästä keskiarvallisesti 107,25 MWh/kk, joka vastasi 20,13 % eroa.

- Paluuveden lämpötilan optimointi saavuttaisi keskiarvallisesti optiolla 1 noin 245,57 MWh/kk eli 28,21 % ja optiolla 2 noin 361 MWh/kk eli 36,61 % paremmat lämpöenergian määrät kuukautta kohden, kuin ilman paluuveden optimointia.
- Kannattavuuslaskelmien perusteella järjestelmää on kannattavaa hyödyntää, kun sähkön hinta vaihtelee syyskuu-maaliskuu aikana välillä 5–130 €/MWh, jolloin sähköllä tuotetun lämmön todellinen hinta osuu välille 18,64–65,05 €/MWh.

Työn tuloksien perusteella tätä työtä voitaisiin jatkaa tulevaisuudessa laajentamalla tutkimusaluetta kaukolämpöverkon paluuveden lämpötilan optimoinnin suuntaan ja sen tuomien etujen tarkkailuun. Keskeistä olisi tutkia, kuinka tarkasti kaukolämpöverkon paluuveden lämpötila voidaan asettaa suhteessa ulkolämpötilan funktioon. Kun paluuveden lämpötila saadaan asettumaan oikein parametrien puitteissa, se tuottaa työn tuloksien ja pohdintaosuuden perusteella oleellisia vaikutuksia lämpöenergian määrälle. Esimerkiksi talviaikaan ideaalitulanteessa optimointi tuo merkittävästi paremman lämpöenergian määrän, kuin ilman optimointia.

Kaukolämpöverkon paluuveden optimoinnissa tulisi tutkia tämän lisäksi menoveden lämpötilan asettumista eri kuukausina. Tällä hetkellä Granlund Oy:n laatiman kaukolämpöverkon menoveden toimintamallin mukaan menoveden lämpötila asettuu parhaiten välille  $T = 75\text{--}80\text{ °C}$  (Koskimäki & Niemelä, 2022, s. 8–12; Granlund, 2024c). Työn tuloksien perusteella menoveden ja paluuveden lämpötilan muutosjakaumalle voisi suorittaa laskennallisen mallinnuksen, joka huomioisi vallitsevan ulkolämpötilan, lämpötehon kuorman ja ajankohdan päivän tarkkuudella. Näiden parametrien puitteissa malli laskisi menoveden lämpötilan  $T = 75\text{--}80\text{ °C}$  välillä ja paluuveden lämpötilan siten, että järjestelmä toimii toivotusti myös Strömberg Parkin muissa kohteissa ilman lämmönjakokeskuksien käytöngelmia paluuveden lämpötilaan liittyen.

## 10 Yhteenveto

Tämän työn tavoitteena oli selvittää, millainen merkitys hukkalämmön talteenottojärjestelmän käyttöönotolla oli case-kohteen eli MM-rakennuksen energiatehokkuuteen lämpöpumpputeknologiaa hyödyntäen. Työssä tutkittiin lämmitys- ja viilennystarpeiden täyttymistä sekä niiden tuoma energiatehokkuuden parantumista kokonaisvaltaisesti. Työssä tutkittiin myös kaukolämpöverkon paluuveden lämpötilan optimoinnin mahdollisuutta suhteessa ulkolämpötilaan. Tässä tavoitteena oli saavuttaa korkeampi lämpöenergian määrä lämpöpumppujen avulla kaukolämpöverkoston hyödynnettäväksi Strömberg Parkin kohteille. Lopuksi tavoitteena oli selvittää hukkalämmön talteenottojärjestelmän kannattavuus, tutkimalla sähkön muuttuvaa hintaa välillä 5–200 €/MWh ja kaukolämmön muuttuvaa hintaa välillä 46,58–65,00 €/MWh.

2000-luvun globaalit haasteet, kuten energiamuodon turvaaminen ja ilmastonmuutoksen torjunta ovat nostaneet yritysten energiaturvallisuuden ja energiankäytön keskiöön. Energiatehokkuuden parantaminen on keskeinen askel energiapolitiikan tavoitteiden saavuttamisessa. Vaikka merkittäviä tehokkuushyötyjä on saavutettu viime vuosikymmeninä, teollisuuden energiankulutusta ja päästöjä voidaan edelleen vähentää. Hukkalämmön talteenotto tarjoaa lupaavan mahdollisuuden energiankulutuksen ja tuotantokustannusten vähentämiseen teollisuusprosesseissa, vähentäen samalla ympäristövaikutuksia. Lisäksi kestävien ratkaisujen merkitys korostuu ilmastonmuutoksen torjunnassa, ja teollisuuden panos on korvaamaton. Euroopan komission asettamat vaatimukset rakennusten energiatehokkuudesta teollisuudessa kannustavat uusien innovaatioiden käyttöönottoon, edistäen tasapuolista kilpailukykyä ja talouskasvua. Energiatehokkuus on näin ollen keskeinen parametri, joka heijastaa teollisuuden vaikutusta ympäristöön.

Työssä käytiin läpi MM-rakennuksen hukkalämmön käyttökohteet, joissa hukkalämpöä olisi järkevää ja energiatehokasta hyödyntää. ABB Oy, IEC LV Motors hyödynsi kaksisuuntaista kaukolämpömallia hukkalämmön talteenottojärjestelmässään. Työ toteutettiin hyödyntämällä toimintatutkimusmenetelmää, liittyen järjestelmän energiatehokkuuden parantamisen tutkimiseen hukkalämmön talteenottojärjestelmän käyttöönoton avulla.

Työn ohella tutkittiin energiamuotojen sähköistymistä vuosien 2019–2026 aikana. Työn tulosten perusteella hukkalämmön talteenottojärjestelmä oli keskeisessä roolissa energiankulutuksen vähentymisessä MM-rakennuksessa. Tutkittavalla elokuu-maaliskuu välillä talteenottojärjestelmän lämmityspiiri ei kyennyt tuottamaan tarvittavaa määrää lämpöenergiaa koko rakennuksen kohteille, mutta paransi silti energiatehokkuutta keskiarvallisesti 625 MWh/kk, kattaen 43 % lämmitysenergian tarpeesta. Vastaavasti talteenottojärjestelmän jäähdytysenergia riitti jokaisena tutkittavan elokuu-maaliskuu aikavälin ajanhetkenä täyttämään jäähdytysenergiaa vaativat kohteet, ja jäähdytysenergiaa jäi yli 397,88 MWh/kk. Kaukolämpöverkon paluuveden optimointi osoittautui merkittäväksi parannuskohteeksi järjestelmän toiminnalle tulevaisuudessa. Optimointi kasvatti talteenottojärjestelmän lämpöpumppujen tuottamaa lämpöenergian määrää merkittävästi. Syyskuu-marraskuu välillä lämpöenergian määrä oli huomattava, ja tuloksiin perustuen optimointi kasvattikin lämpöenergian määrää keskiarvallisesti optiolla 1 noin 245,57 MWh/kk ja optiolla 2 noin 361 MWh/kk verrattuna tuloksia ilman optimointia.

Kannattavuuslaskelmien perusteella hukkalämmön talteenottojärjestelmää oli kannattavaa käyttää sähkön hinnan vaihdellessa syyskuu-maaliskuu aikana välillä 5–130 €/MWh, jolloin sähköllä tuotetun lämmön todellinen hinta osui hyvin välille 18,64–65,05 €/MWh. Tätä korkeammilla hinnoilla lämpöpumppujen hyödyntäminen ei ollut enää taloudellisesta näkökulmasta katsottuna järkevää kaukolämmön todellisen hinnan ollessa 46,58–65,00 €/MWh. MM-rakennuksen sähkön pitkäaikainen hinta vaihteli välillä 62,31–91,25 €/MWh, jonka perusteella voitiin todeta järjestelmän käytön olevan taloudellisesti kannattavaa ja merkityksellistä (ABB, 2024d). Tulevaisuudessa hukkalämmön talteenottojärjestelmän tuoman energiatehokkuuden maksimoimiseksi olisi järkevää selvittää erilaisia ratkaisuja, jotka mahdollistavat hukkalämpöjen hyödyntämisen laajemmissa kohteissa Strömberg Parkin alueella. Lisäksi voisi olla kannattavaa tehdä selvitys kaukolämpöjärjestelmän sopivasta kausivarastointiratkaisusta Strömberg Parkin alueella. Näin voitaisiin hyödyntää kesällä talteenottojärjestelmällä ylijäänyt lämpöenergia talviaikaan, kun lämpöenergian tarve on suurempi, koska muuten tavoite jäisi vajaaksi lämmitysenergian tarpeesta.

## Lähteet

- ABB Ability. (2024a). Energy Manager. *ABB Oy, IEC LV Motors, MM-rakennuksen sähköenergian kulutustiedot*. [Rajattu pääsy]. Noudettu 22.2.2024 osoitteesta <https://sitemanager.ability.abb/#/>
- ABB Ability. (2024b). Energy Manager. *ABB Oy, IEC LV Motors energiankulutus käyttäytymisen 2019–2026*. [Rajattu pääsy]. Noudettu 22.2.2024 osoitteesta <https://sitemanager.ability.abb/#/>
- ABB. (2024a). *ABB lyhyesti*. Noudettu 6.2.2024 osoitteesta <https://new.abb.com/fi/abb-lyhyesti>
- ABB. (2024b). *Pienjännitemoottoreita Vaasasta jo vuodesta 1944*. ABB Oy, IEC LV Motors. Noudettu 1.1.2024 osoitteesta <https://new.abb.com/fi/abb-lyhyesti/suomessa/liiketoiminnat/iec-lv-motors>
- ABB. (2024c). *ABB Oy, IEC LV Motors, MM-rakennuksen hukkalämmön talteenottojärjestelmän käyttökohteet*. [Rajattu pääsy]. Viitattu 1.2.2024.
- ABB. (2024d). *Energy Efficiency and Unit-Cost. Raportti*. [Rajattu pääsy]. Viitattu 18.4.2024.
- ABB. (2024e). *ABB Oy, IEC LV Motors, MM-rakennuksen hukkalämmön talteenottojärjestelmän jäähdytystehoa vaativien kohteiden määrittäminen*. [Rajattu pääsy]. Viitattu 1.4.2024.
- Agathokleous, R., Argyrou, M., Aresti, L., Bianchi, G., Christodoulides, P., Georgiou, G., Florides, G.A., Kalogirou, S.A., Panayiotou, G.P., Tassou, S.A., & Tsamos, K. (2017). Preliminary assessment of waste heat potential in major European industries. *Energy Procedia*, 123, 335-345. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.263>
- Aixue, X., Hongnian, W., & Huijuan, Q. (2023). Artificial intelligence control system of heat recovery in thermal power plant. *Thermal Science*, 27(2), 1241-1247. <https://doi.org/10.2298/TSCI2302241Q>
- Alberta. (2024). *How demand and supply determine market price*. [Verkköjulkaisu]. Noudettu 10.3.2024 osoitteesta <https://www.alberta.ca/how-demand-and-supply-determine-market-price>

- Alfalaval. (2024). *How does a plate heat exchanger work*. Noudettu 5.1.2024 osoitteesta <https://www.alfalaval.my/products/heat-transfer/plate-heat-exchangers/gasketed-plate-and-frame-heat-exchangers/heat-exchanger/how-plate-heat-exchanger-work/>
- Almahmoud, S., Chauhan, A., Delpech, B., Jouhara, H., Khordehgah, N., & Tassou, S.A. (2018). Waste heat recovery technologies and applications. *Thermal Science and Engineering Progress*. ScienceDirect. Tutkimus. Vol.6, p.268–289. ISSN 2451-9049. Noudettu 31.1.2024 osoitteesta <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2018.04.017>
- Almomani, F., Asim, M., Kalam, M.A., Kanwal, A., Khan, A.A., Mohammad, S., Mujtaba, M.A., Uddin, G.M., & Veza, I. (2023). Comparative study of the parameters affecting the performance of microchannels' heat exchangers: Latest advances review. *Energy science & engineering*, 11(10), 3869-3887. <https://doi.org/10.1002/ese3.1522>
- Alpua, J. (2022). *Oilon lämpöpumppujen 100-LPU01 –03 tekniset tiedot*. [Rajattu pääsy]. Viitattu 25.3.2024.
- Amat-Albuixech, M., Mateu-Royo, C., Navarro-Esbrí, J., Mota-Babiloni, A., & Molés, F. (2018). Theoretical evaluation of different high-temperature heat pump configurations for low-grade waste heat recovery. *International Journal of Refrigeration*, 90, 229-237. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2018.04.017>
- Andreasen, J., Kærn, M., Pierobon, L., Larsen, U., & Haglind, F. (2016). Multi-Objective Optimization of Organic Rankine Cycle Power Plants Using Pure and Mixed Working Fluids. *Energies (Basel)*, 9(5), 322. <https://doi.org/10.3390/en9050322>
- Arpagaus, C., Bertsch, S.S., Mateu-Royo, C., Mota-Babiloni, A., & Navarro-Esbrí, J. (2021). Advanced high temperature heat pump configurations using low GWP refrigerants for industrial waste heat recovery: A comprehensive study. *Energy conversion and management*, 229, 113752. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113752>
- Bannwart, F., Ngcukayitobi, M., & Tartibu, L. K. (2024). *Enhancing Thermo-Acoustic Waste Heat Recovery through Machine Learning: A Comparative Analysis of Artificial Neural Network–Particle Swarm Optimization, Adaptive Neuro Fuzzy*

- Inference System, and Artificial Neural Network Models. *AI (Basel)*, 5(1), 237-258. <https://doi.org/10.3390/ai5010013>
- Beier, G., Dachrodt, M.F., Kunkel, S., & Matthess, M. (2023). The impact of digitalization on energy intensity in manufacturing sectors – A panel data analysis for Europe. *Journal of cleaner production*, 397, 136598. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136598>
- Bell, I. H., Domanski, P. A., McLinden, M. O., & Linteris, G. T. (2019). The hunt for non-flammable refrigerant blends to replace R-134a. *International journal of refrigeration*, 104, 484-495. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2019.05.035>
- Bröckl, M., Immonen, I., & Vanhanen, J. (2014) *Lämmön pientuotannon ja pienimuotoisen ylijäämälämmön hyödyntäminen kaukolämpötoiminnassa*. Loppuraportti. Gaia Consulting Oy. Noudettu 1.1.2024 osoitteesta <https://energia.fi/julkaisut/lammon-pientuotannon-ja-pienimuotoisen-ylijaamalammon-hyodyntaminen-kaukolammossa/>
- Brückner, S., Liu, S., Miro, L., Radspieler, M., Cabeza, L.F., & Lävemann, E. (2015). Industrial waste heat recovery technologies: An economic analysis of heat transformation technologies. *Applied energy*, 151, 157-167. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.147>
- Brueckner, S., Cabeza, L.F., Laevemann, E., Miró, L., Pehnt, M. (2014). Methods to estimate the industrial waste heat potential of regions – A categorization and literature review. *Renewable & sustainable energy reviews*, 38, 164-171. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.04.078>
- Cengel Y. A., & Ghajar A. J. (2011). *Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications*. 4th edition in SI units. New York: McGraw-Hill. Viitattu 8.1.2024.
- Chalermisinsuwana, B., Kamsuwana, C., Otarawannaf, S., Piemjaiswangd, R., Piumsomboona, P., Pratumwalf, Y., Sengc, L.P., Wangb, X., & Xianc, C.K. (2022). Simulation of nanofluid micro-channel heat exchanger using computational fluid dynamics integrated with artificial neural network. *Energy reports*, 9, 239-247. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.10.412>

- Danfoss. (2024). *Spiraalilämmönsiirtimet*. [verkkojulkaisu]. Noudettu 15.1.2024 osoitteesta <https://www.danfoss.com/fi-fi/products/dhs/heat-exchangers/welded-heat-exchangers/spiral-heat-exchangers/#tab-overview>
- Das, D., Devassy, D., Harikrishnan, K., Sharath, G. K., Sreejith, K., & Varghese, B. (2008). Design and Cost Optimization of Plate Heat Exchanger. *International Journal Of Engineering And Science*. India. Research. ISSN 2278-4721. Viitattu 4.2.2024.
- Dhirgham, A., & Mustafa, M. G. (2021). Comprehensive Review on Double Pipe Heat Exchanger Techniques. *Journal of Physics: Conference Series*, 1973(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1973/1/012013>
- Energiäteollisuus. (n.d.). *Lämmitysmarkkinat*. [Verkkojulkaisu]. Noudettu 30.1.2024 osoitteesta <https://energia.fi/energiatietoa/energiamarkkinat/lammitysmarkkinat/>
- Energiäteollisuus. (2016). *Kaksisuuntainen kaukolämpö*. Tutkimustiedote. Energia. Noudettu 16.2.2024 osoitteesta [https://energia.fi/wp-content/uploads/2023/08/Kaksisuuntainen\\_KL\\_Tutkimustiedote\\_20160817.pdf](https://energia.fi/wp-content/uploads/2023/08/Kaksisuuntainen_KL_Tutkimustiedote_20160817.pdf)
- Energiäteollisuus. (2022). *Rakennusten kaukolämmitys, määräykset ja ohjeet*. Raportti. Noudettu 14.3.2024 osoitteesta <https://energia.fi/julkaisut/rakennusten-kaukolammitys-maaraykset-ja-ohjeet-julkaisu-k1-2021/>
- Energy. European Commission. (2019). *Energy performance of buildings directive*. Noudettu 2.2.2024 osoitteesta [https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/energy-performance-buildings-directive\\_en](https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/energy-performance-buildings-directive_en)
- Energy. European Commission. (n.d.). *Energiaturvallisuus*. [Verkkojulkaisu]. Noudettu 1.4.2024 osoitteesta [https://commission.europa.eu/energy-climate-change-environment/topics/energy\\_fi](https://commission.europa.eu/energy-climate-change-environment/topics/energy_fi)
- EnerKey. (2024). *MM-rakennuksen kaukolämmön kulutustiedot 2018–2024*. [Rajattu pääsy]. Noudettu 15.3.2024 osoitteesta <https://identity.enerkey.com/Identity/Account/Login?lang=fi-FI>
- Entrain. (2021). *Waste Heat and Heat Pumps for District Heating*. Annex to D. T2.2. Planning Guidelines for Small District Heating. Version 1. Raportti. Interreg Central Europe. Noudettu 8.1.2023 osoitteesta <https://programme2014-20.interreg->

[central.eu/Content.Node/ENTRAIN/Annex-Waste-Heat-and-Heat-Pumps-for-DH-2.pdf](https://central.eu/Content.Node/ENTRAIN/Annex-Waste-Heat-and-Heat-Pumps-for-DH-2.pdf)

Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2012/27/EU. (2012). Noudettu 19.1.2024 osoitteesta <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:32012L0027>

GNF. (2020). *Hukkalämpökuormien hyödyntäminen, varastointi ja kysyntäjouaston tehostaminen*. Hukaton-hankkeen loppuraportti. Green Net Finland. Loppuraportti. [Verkkajulkaisu]. Noudettu 30.1.2024 osoitteesta [https://gnf.fi/wp-content/uploads/2020/12/Hukaton\\_loppuraportti\\_Web.pdf](https://gnf.fi/wp-content/uploads/2020/12/Hukaton_loppuraportti_Web.pdf)

Granlund. (2024a). *Kohti kestävä ja älykästä tulevaisuutta. Yhdessä*. Noudettu 6.2.2024 osoitteesta <https://www.granlund.fi/>

Granlund. (2024b). *ABB Oy, IEC LV Motors, MM-rakennus*. Hukkalämmön talteenottojärjestelmän ylösajo ja käyttöönoton tehonrajoitukset. [Rajattu pääsy]. Viitattu 15.3.2024.

Granlund. (2024c). *ABB Oy, IEC LV Motors, MM-rakennus*. Kaukolämpöverkon paluuvien optimointi ja sen vaikutukset talteenottojärjestelmään. [Rajattu pääsy]. Viitattu 14.3.2024.

He, Y. L., Tao, W. Q., Zhang, H. H., & Zhang, J. (2016). A comprehensive review on advances and applications of industrial heat pumps based on the practices in China. *Applied energy*, 178, 800-825. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.06.049>

Heikkilä, I. & Kiuru, T. (2014). *Ylijäämlämmön taloudellinen hyödyntäminen. Ylijäämlämpöenergia-analyytit*. Motiva Oy, Helsinki. Noudettu 2.1.2024 osoitteesta [https://www.motiva.fi/files/10216/Ylijaamalammon\\_taloudellinen\\_hyodyntaminen\\_Ylijaamalamponenergia-analyytit.pdf](https://www.motiva.fi/files/10216/Ylijaamalammon_taloudellinen_hyodyntaminen_Ylijaamalamponenergia-analyytit.pdf)

IEA. (2012). *World energy outlook 2012*. International Energy Agency. IEA Publications, Paris. Noudettu 30.1.2024 osoitteesta <https://www.oecd-ilibrary.org/deliver/weo-2004-en.pdf?itemId=/content/publication/weo-2004-en&mimeType=application/pdf>

IEA. (2017). *Energy Efficiency 2017*. Raportti. Noudettu 25.1.2024 osoitteesta <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2017>

- IEA-Industry. (2014). *Application of Industrial Heat Pumps*. IEA Industrial Energy-related Systems and Technologies Annex 13. IEA Heat Pump Programme Annex 35. Part 1. Loppuraportti. Noudettu 1.1.2024 osoitteesta <https://iea-industry.org/app/uploads/annex-xiii-part-a.pdf>
- Ilmatieteenlaitos. (2024). *Lämmitystarveluku eli aste päiväluku*. [verkkajulkaisu]. Noudettu 19.2.2024 osoitteesta [https://www.ilmatieteenlaitos.fi/lammitystarveluvut?6Q0hW0Ue3EKANmx4TUFVNx\\_q=y%253D2024](https://www.ilmatieteenlaitos.fi/lammitystarveluvut?6Q0hW0Ue3EKANmx4TUFVNx_q=y%253D2024)
- Johnson, I., Choate, W. T, & Davidson, A. (2008). Waste Heat Recovery. Technology and Opportunities in U.S. Industry. *United States*, 1218716. <https://doi.org/10.2172/1218716>
- Jyväskylän yliopisto. (2015). *Tutkimusstrategiat: Toimintatutkimus*. [verkkajulkaisu]. Noudettu 23.1.2024 osoitteesta <https://koppa.jyu.fi/avoimet/hum/menetelmapolkuja/menetelmapolku/tutkimusstrategiat/toimintatutkimus>
- Kalander, J. (2024a). *MM-rakennuksen maanalaisen kaukolämpövaraston hankesuunnitelu*. [Rajattu pääsy]. Viitattu 24.2.2024.
- Kalander, J. (2024b). *MM-rakennuksen lämpimän käyttöveden kulutus*. [Rajattu pääsy]. Viitattu 22.2.2024.
- Kiiski, J., Niemelä, T., & Paasalo, V. (2021). ABB Oy, Asennustuotteet, energiankierrätys ja geoenergia. *Lämmityksen ja jäähdytyksen toimintaselostus*. Porvoon ABB. Granlund Oy. [Rajattu pääsy]. Viitattu 7.2.2024.
- Koljonen, T., & Sipilä, K. (1998) *Uudemman absorptiojäähdytystekniikan soveltaminen kaukojäähdytyksessä*. Raportti. Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT), Espoo. Noudettu 2.2.2024 osoitteesta <https://publications.vtt.fi/pdf/tiedotteet/1998/T1926.pdf>
- Koskimäki, T., & Niemelä, T. (2022). *Lämpöpumppujärjestelmän toimintaselostus*. ABB Vaasa MM-rakennus. Granlund Oy. [Rajattu pääsy]. Viitattu 2.2.2024.
- Lian, Y., Lin, X., Luo, H., Niu, Y., & Zhang, J. (2022). Effects of Digitalization on Energy Efficiency: Evidence From Zhejiang Province in China. *Frontiers in energy research*, 10, . <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.847339>

- Lin, B., & Teng, Y. (2023). *Digital revolution: Does industrial chain digitalization lead the energy-saving wave? Sustainable energy technologies and assessments*, 60, 103516. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103516>
- Lund, H., Werner, S., Wiltshire, R., Svendsen, S., Thorsen, J. E., Hvelplund, F., & Mathiesen, B. V. (2014). 4th Generation District Heating (4GDH). Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems. *Energy (Oxford)*, 68, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.02.089>
- Majstorović, D. M., Kijevčanin, M. K., Živković, E.M., Zlatković, N. R. (2017). *Plate heat exchanger design software for industrial and educational applications. Hemijska industrija*, 71(5), 439-449. <https://doi.org/10.2298/HEMIND161021007Z>
- Motiva. (2017). *Energiatehokas lämmönsiirto*. Energiatehokas lämmönsiirto opas. Raportti. Noudettu 7.1.2024 osoitteesta [https://www.motiva.fi/yritykset/ohjeita\\_ ja\\_vinkeja\\_tehokkaaseen\\_energian\\_ ja\\_materiaalien\\_kayttoon/lammonsiirto](https://www.motiva.fi/yritykset/ohjeita_ja_vinkeja_tehokkaaseen_energian_ ja_materiaalien_kayttoon/lammonsiirto)
- Motiva. (2019). *Esiselvitys – Ylijäämälämmön potentiaali teollisuudessa*. [Verkkajulkaisu]. Noudettu 29.1.2024 osoitteesta [https://www.motiva.fi/files/16214/Esiselvitys\\_-\\_Ylijaamalammon\\_potentiaali\\_teollisuudessa.pdf](https://www.motiva.fi/files/16214/Esiselvitys_-_Ylijaamalammon_potentiaali_teollisuudessa.pdf)
- Motiva. (2021). *Suomen teollisuuden sähköistyminen ja sen vaikutus energiatehokkuuteen ja hukkalämpöjen hyödyntämiseen*. [Verkkajulkaisu]. Noudettu 29.1.2024 osoitteesta [https://www.motiva.fi/files/19644/Suomen\\_teollisuuden\\_sahkoistuminen\\_ ja\\_sen\\_vaikutus\\_energiatehokkuuteen\\_ ja\\_hukkalampojen\\_hyodyntamiseen\\_-\\_raportti\\_2021.pdf](https://www.motiva.fi/files/19644/Suomen_teollisuuden_sahkoistuminen_ ja_sen_vaikutus_energiatehokkuuteen_ ja_hukkalampojen_hyodyntamiseen_-_raportti_2021.pdf)
- Motiva. (2023). *Rakennusten energiatehokkuusdirektiivi (EED)*. [verkkajulkaisu]. Motiva Oy. Noudettu 19.1.2024 osoitteesta [https://www.motiva.fi/ratkaisut/ohjauskeinot/direktiivit/energiatehokkuusdirektiivi\\_%28eed%29](https://www.motiva.fi/ratkaisut/ohjauskeinot/direktiivit/energiatehokkuusdirektiivi_%28eed%29)
- Motiva. (2024a). *Kulutuksen normitus*. [verkkajulkaisu]. Helsinki. Motiva Oy. Noudettu 7.2.2024 osoitteesta [https://www.motiva.fi/julkinen\\_sektori/kiinteiston\\_energian\\_kaytto/kulutuksen\\_normitus](https://www.motiva.fi/julkinen_sektori/kiinteiston_energian_kaytto/kulutuksen_normitus)

- Motiva. (2024b). *Lämmitysenergiankulutuksen kuntakertoimet 1991–2020*. Noudettu 19.2.2024 osoitteesta [https://www.motiva.fi/julkinen\\_sektori/kiinteiston\\_energiankaytto/kulutuksen\\_normitus](https://www.motiva.fi/julkinen_sektori/kiinteiston_energiankaytto/kulutuksen_normitus)
- Mäkelä, M., Soininen, L., Tuomola, S., & Öistämö, J. (2022). *Tekniikan kaavasto*. Matemaatiikan, fysiikan, kemian ja lujuusopin peruskaavoja sekä SI-järjestelmä. 23 painos. Bookwell Oy, Porvoo.
- Parkkamäki, J. (2021). *Energiatehokkuushankkeiden ja uusiutuvan energian tuotantoratkaisujen hankesuunnittelu*. MM-rakennus. Granlund Oy. Raportti. [Rajattu pääsy]. Viitattu 5.2.2024.
- Parkkamäki, J. (2023). *Energiatehokkuushankkeiden ja uusiutuvan energian tuotantoratkaisujen hankesuunnittelu*. FF-rakennus. Granlund Oy. Raportti. [Rajattu pääsy]. Viitattu 12.3.2024.
- Pöyry. (2016). *Kaksisuuntaisen kaukolämmön liiketoimintamallit*. Vantaa. Pöyry Management Consulting Oy. Raportti. Noudettu 10.2.2024 osoitteesta [https://www.sitra.fi/app/uploads/2017/02/Kaksisuuntaisen\\_kaukolammon\\_liiketoimintamallit-2.pdf](https://www.sitra.fi/app/uploads/2017/02/Kaksisuuntaisen_kaukolammon_liiketoimintamallit-2.pdf)
- Rämä, M., & Klobut, K. (2020). *Hukkalämpö Kaukolämpöjärjestelmissä*. Raportti. VTT. Helsinki. Noudettu 4.2.2024 osoitteesta <https://cris.vtt.fi/en/publications/hukkal%C3%A4mp%C3%B6-kaukol%C3%A4mp%C3%B6j%C3%A4rjestelmiss%C3%A4>
- Reddy, C., & Naidu, S. (2013). Waste Heat Recovery Methods And Technologies. *Chemical Engineering*, 120(1), 28-38. Noudettu 6.1.2024 osoitteesta <https://www.chemengonline.com/waste-heat-recovery-methods-and-technologies/?print-mode=1>
- Schneider Electric Finland. (2024). *Palvelut kiinteistölle*. Innovaatioita joka tasolla. Noudettu 4.2.2024 osoitteesta <https://www.se.com/fi/fi/>
- Schneider Electric. (2024a). *Hukkalämmön talteenottojärjestelmän lämmityspuolen- ja jäähdytyspuolen pääkuvat*. [Rajattu pääsy.] Viitattu 15.3.2024).
- Schneider Electric. (2024b). *Hukkalämmön talteenottojärjestelmän lämpö- ja jäähdytysenergiat sekä tilavuusvirrat*. [Rajattu pääsy]. Viitattu 25.3.2024.

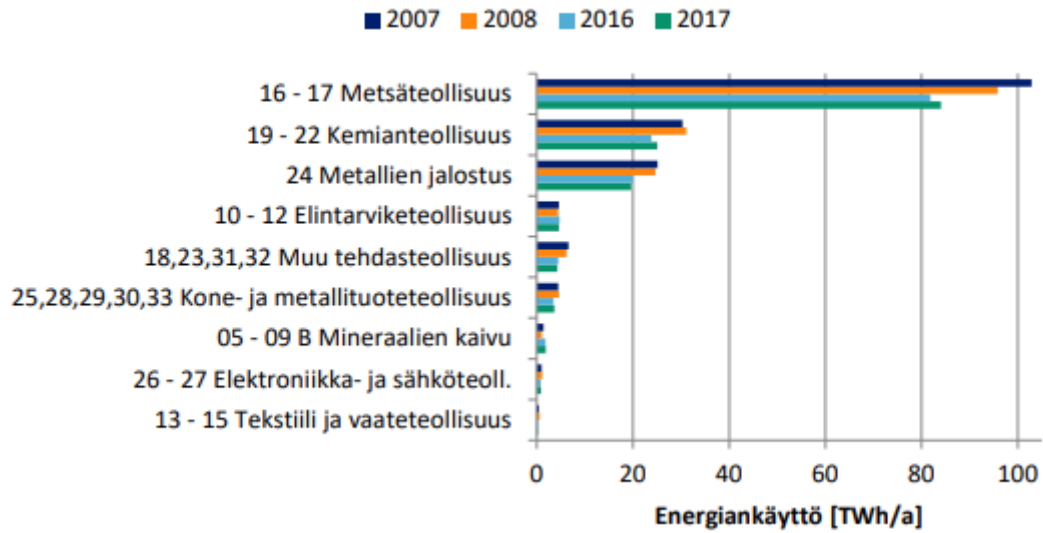
- SFS. (2018). *ISO 50001 Energianhallinta*. [verkkojulkaisu]. Suomen standardisoimisliitto SFS ry. Noudettu 21.1.2024 osoitteesta <https://sfs.fi/standardeista/tutustu-standardeihin/suositut-standardit/iso-50001-energianhallinta/>
- SFS-EN ISO 50001. (2011). *Energianhallintajärjestelmät*. Vaatimukset ja käyttöohjeet. Suomen standardisoimisliitto SFS. Metalliteollisuuden Standardisointiyhdistys ry. Viitattu 20.1.2024.
- Shah, R. K. & Sekulić, D. P., (2003). *Fundamentals of Heat Exchanger Design*. Classification of Heat Exchangers. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 976 s. ISBN 978-0-47132-171-2. Noudettu 6.1.2024 osoitteesta <https://windyhm.wordpress.com/wp-content/uploads/2008/11/fundamentals-of-heat-exchanger-design-0471321710.pdf>
- Tilastokeskus. (2018). *Tilastokeskuksen PxWeb-tietokannat*. Teollisuuden energiankäyttö toimialoittain (TOL 2008). [verkkojulkaisu]. Noudettu 2.1.2024 osoitteesta [https://www.stat.fi/til/tene/2018/tene\\_2018\\_2019-11-01\\_fi.pdf](https://www.stat.fi/til/tene/2018/tene_2018_2019-11-01_fi.pdf)
- Towler, G., & Sinnott, R. (2013). *Heat-Transfer Equipment*. Teoksessa: Towler G. & Sinnott R. (toim.) *Chemical Engineering Design*. 2. painos. Boston: ButterworthHeinemann, S. 794–928. ISBN 978-0-08096-659-5.
- Vaasan Sähkö. (2024). *Lämpömaksuhinnasto 1.1.2024 alkaen*. [Verkkojulkaisu]. Noudettu 25.3.2024 osoitteesta <https://www.vaasansahko.fi/kaukolampo/kaukolammon-hinnat/>
- Vaasan Sähköverkko. (2024). *Siirtohinnot 1.4.2024 alkaen*. [Verkkojulkaisu]. Noudettu 25.3.2024 osoitteesta <https://www.vaasansahkoverkko.fi/sahkonsiirto/siirtohinnot/>
- Xu, Z., & Wang, R. (2017). Absorption heat pump for waste heat reuse: current states and future development. *Frontiers in Energy*, 11(4), 414-436. <https://doi.org/10.1007/s11708-017-0507-1>
- Yesiller, N., Hanson, J., & Liu, W. (2005). Heat generation in municipal solid waste landfills. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 131(11), 1330-1344. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2005\)131:11\(1330\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:11(1330))

Zohuri, B. (2017). *Heat Exchanger Types and Classifications*. [verkkojulkaisu]. Noudettu 5.1.2024 osoitteesta [https://www.researchgate.net/figure/A-shell-and-tube-heat-exchanger-one-shell-pass-and-one-tube-pass-2\\_fig28\\_308464270](https://www.researchgate.net/figure/A-shell-and-tube-heat-exchanger-one-shell-pass-and-one-tube-pass-2_fig28_308464270)

Zwirner. (2021). *What is a Double Tube Heat Exchanger?* Equipment Maintenance. Stainless Steel Tanks. [verkkojulkaisu]. Noudettu 5.1.2024 osoitteesta <https://www.zwirnerequipment.com/blog/what-is-a-double-tube-heat-exchanger/>

## Liitteet

### Liite 1. Teollisuuden energiankäyttö Suomessa (Motiva, 2019, s. 16)



## Liite 2. Oilon lämpöpumpputekniikan tekniset tiedot

LAITTEET		Toimittaa	Asentaa
Muutos			
<b>G1 Lämmitys</b>			
<b>100 Lämpöpumpun lämmöntuotto</b>			
<b>100 LPU 01 Lämpöpumppu</b>		REH	PU
> Käyttötapa	Neste-neste, lämmitys		
Lämmitysteho (P1) kW	724		
Sähköteho (P2) kW	254		
Jäähdytysteho, lämmönkeruupiiri (P1+P3-P2)	470		
Kylmäaine	R513A		
Tehonsäätö, portaiden lkm. kpl	1, 1 kompressori taajuusmuuttajalla varustettuna		
Lämmityspiiri, neste	Vesi		
Lämmityspiiri, neste sisään °C	40		
Lämmityspiiri, neste ulos °C	61,3		
Lämmityspiiri, nestevirta dm <sup>3</sup> /s	10,1, kg/s		
Lämmityspiiri, painehäviö, max. kPa	30, sarjaankytkennän yhdistetty		
Lämmönkeruupiiri, nesteen pitoisuus %	35		
Lämmönkeruupiiri, neste	Etyleeniglykoli 35%		
Lämmönkeruupiiri, neste sisään °C	7		
Lämmönkeruupiiri, neste ulos °C	1		
Lämmönkeruupiiri, nestevirta dm <sup>3</sup> /s	22,1, kg/s		
Lämmönkeruupiiri, painehäviö max. kPa	32		
Liitântäeho/P kW	287, 3 x 500 A		
<b>Huomautukset</b>			
Oilon S580 AD LI SU HC VFDx1 R513A			
Verkkoyhteys laitevalmistajan etäseurantaa varten			
<b>100 LPU 02 Lämpöpumppu</b>		REH	PU
> Käyttötapa	Neste-neste, lämmitys		
Lämmitysteho (P1) kW	354		
Sähköteho (P2) kW	127		
Jäähdytysteho, lämmönkeruupiiri (P1+P3-P2)	227		
Kylmäaine	R513A		
Tehonsäätö, portaiden lkm. kpl	4, 4 kompressoria, joista 4 varustettu taajuusmuuttajilla		
Lämmityspiiri, neste	Vesi		
Lämmityspiiri, neste sisään °C	61,3		
Lämmityspiiri, neste ulos °C	68		
Lämmityspiiri, nestevirta dm <sup>3</sup> /s	10,1, kg/s		
Lämmönkeruupiiri, neste	Etyleeniglykoli 35%		
Lämmönkeruupiiri, neste sisään °C	3,8		
Lämmönkeruupiiri, neste ulos °C	1		
Lämmönkeruupiiri, nestevirta dm <sup>3</sup> /s	22,9, kg/s		
Liitântäeho/P kW	151, 3 x 315 A		
<b>Huomautukset</b>			
Oilon P300 SU HC VFDx4 R513A			
Verkkoyhteys laitevalmistajan etäseurantaa varten			
<b>100 LPU 03 Lämpöpumppu</b>		REH	PU
> Käyttötapa	Neste-neste, lämmitys		
Lämmitysteho (P1) kW	401		
Sähköteho (P2) kW	142,9		
Jäähdytysteho, lämmönkeruupiiri (P1+P3-P2)	258		
Kylmäaine	R513A		
Tehonsäätö, portaiden lkm. kpl	4, 4 kompressoria, joista 4 varustettu taajuusmuuttajilla		
Lämmityspiiri, neste	vesi		
Lämmityspiiri, neste sisään °C	68		
Lämmityspiiri, neste ulos °C	75		
Lämmityspiiri, nestevirta dm <sup>3</sup> /s	10,1, kg/s		
Lämmönkeruupiiri, neste	etyleeniglykoli-vesi 35 %		
Lämmönkeruupiiri, neste sisään °C	7		
Lämmönkeruupiiri, neste ulos °C	3,8		
Lämmönkeruupiiri, nestevirta dm <sup>3</sup> /s	22,8, kg/s		
Lämmönkeruupiiri, painehäviö max. kPa	56, kahden höyrytimen yhteinen maksimipainehäviö		
Liitântäeho/P kW	167, 3 x 315 A		
<b>Huomautukset</b>			
Oilon P300 SU HC VFDx4 R513A			
Verkkoyhteys laitevalmistajan etäseurantaa varten			

