

Oona Lehtonen

# HUKKALÄMPÖJEN HYÖDYNTÄMINEN KAUKOLÄMPÖJÄRJESTELMÄSSÄ

Case: Pori Energia Oy:n runkoverkon  
kaukolämpöjärjestelmä

Diplomityö  
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta  
Tarkastaja: Yliopistonlehtori Henrik Tolvanen  
Tarkastaja: Vieraileva opettaja Niko Niemelä  
Lokakuu 2022

# TIIVISTELMÄ

Oona Lehtonen: Hukkalämpöjen hyödyntäminen kaukolämpöjärjestelmässä  
Diplomityö  
Tampereen yliopisto  
Ympäristö- ja energiatekniikan DI-tutkinto-ohjelma  
Lokakuu 2022

---

Ilmastotavoitteet ohjaavat energian tuottajia vaihtoehtoihin lämmöntuotantomuotoihin. Lämmöntuotannon päästöjä on mahdollista vähentää hyödyntämällä kaukolämpöverkon läheisyydessä esiintyviä hukkalämpöjä polttoprosessiin perustuvan lämmöntuotannon sijaan. Kaukolämpöalan visiona on kehittää kaukolämpöjärjestelmiä niin, että ylijäämälämmön hyödyntäminen kaukolämpöverkossa olisi kaupallisin perustein mahdollista. Kaukolämpöverkon muuttaminen ns. kaksisuuntaiseksi tai avoimeksi mahdollistaa sen, että asiakkaat sekä ulkopuoliset henkilöt voivat myydä hukkalämpöä kaukolämpöyhtiöille. Kuitenkin olemassa olevien kaukolämpöjärjestelmien tuotantokokonaisuus sekä kaukolämpöverkon ominaisuudet ja rakenne asettavat vaatimuksia hukkalämpökohteille ja rajoittavat hukkalämpöjen hyödyntämismahdollisuuksia. Jokainen kaukolämpöjärjestelmä on toiminnaltaan, rakenteeltaan sekä ympäristöltään erilainen, jonka takia hukkalämpöjen hyödyntämiseen liittyvät tekniset ja taloudelliset edellytykset sekä ratkaisut on toteutettava järjestelmä- ja tapauskohtaisesti.

Tässä diplomityössä selvitettiin miten hukkalämpö olisi hyödynnettävissä Pori Energian runkoverkon kaukolämpöjärjestelmässä, joka koostuu kahdesta yhteistuotantolaitoksesta, sekä neljästä huippu- ja varakäytössä olevasta öljykäyttöisestä lämpökeskuksesta. Työssä tutustuttiin kaukolämpöjärjestelmän toimintaan ja hukkalämmön lähteiden ominaisuuksiin. Ominaisuuksien perusteella neljälle erilaiselle hukkalämmön lähteelle (datakeskus, teollisuuden jäähdytysvesijärjestelmä, krematorio, kauppa) ja tarkasteltavalle kaukolämpöjärjestelmälle luotiin tuntitason teho- ja lämpötilaprofiilit, joiden avulla selvitettiin hukkalämpöjen hyödyntämiseen liittyvät rajoitteet ja ratkaisut. Työssä selvitettiin kaukolämmön kysynnän rajoittama hukkalämpöjen hyödynnettävyys (ideaalinen), sekä tuotantokokonaisuuden asettamien vaatimusten rajoittama hukkalämpöjen hyödynnettävyys (todellinen). Lisäksi tarkasteltiin miten hukkalämpöjen hyödynnettävyys muuttuisi, mikäli kaukolämpöjärjestelmä sisältäisi lämmön kausivarastointiratkaisun. Temporaaalisen analyysin lisäksi selvitettiin hukkalämpöjen hyödyntämisestä syntyvät kustannukset ja hukkalämmön arvo (€/MWh), joiden pohjalta arvioitiin kohteiden kannattavuutta ja perusmaksukomponentin suuruutta, sekä hukkalämmöstä hukkalämmön tuottajalle maksettavaa hintaa.

Tulosten perusteella Pori Energian kaukolämpöjärjestelmässä kaukolämmön tarve sekä nykyinen tuotantorakenne rajoittavat hukkalämpöjen hyödyntämistä. Ideaalisessa tilanteessa alle 10 MW hukkalämmöt pystyttäisiin hyödyntämään sataprosenttisesti ja suuremman teholuokan lähteet lähes kokonaan. Ideaalinen hukkalämpöjen hyödyntäminen ei kuitenkaan ole tällä hetkellä mahdollista. Tällä hetkellä hukkalämpöä ei ole kannattavaa hyödyntää, kun ulkolämpötila on yli +14 °C, johtuen tuotantokokonaisuuden asettamista rajoitteista. Ulkolämpötilan ollessa -10 °C - +14 °C hukkalämpö korvaisi lämmön- ja sähkön yhteistuotantolaitoksilla tuotettua kaukolämpöä. Tämän takia hukkalämmön kannattava hyödyntäminen ja arvo on kyseisellä lämpötilaskaalalla voimakkaasti riippuvainen sähkön markkinahinnasta, sillä vähentämällä yhteistuotantolaitoksen lämmöntuotantoa, myös sähköntuotannon kokonaispotentiaali pienenesi. Sähkön hinnan ollessa alle 100 €/MWh hukkalämpöä olisi kannattavaa hyödyntää ja siitä maksettava hinta hukkalämmön tuottajalle voisi olla 25–0 €/MWh. Pääosin kun ulkolämpötila on alle -10 °C hukkalämpö korvaisi huippukapasiteettia, eli öljyä, jolloin hukkalämmön hyödyntäminen olisi aina kannattavaa ja sen arvo olisi ulkolämpötilasta riippuen 25–60 €/MWh. Kausilämpövaraston avulla mahdollistettaisiin fossiilisista polttoaineista eroon pääseminen, sekä hukkalämpöjen täyspainotteisempi hyödyntäminen. Varastointiratkaisun lisäksi muutokset tuotantorakenteessa lisääisivät hukkalämpöjen hyödyntämismahdollisuuksia. Ratkaisuita hukkalämpöjen parempaan hyödynnettävyyteen kannattaisi harkita varsinkin, jos biopolttoaineiden hinnat nousevat tai sähkön hinta laskee merkittävästi.

Avainsanat: kaukolämpöjärjestelmä, avoin kaukolämpö, hukkalämpö, tehoprofiili, lämpötilaprofiili, temporaalinen analyysi, lämmönvaihdin, lämpöpumppu, kausilämpövarasto

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

# ABSTRACT

Oona Lehtonen: Utilization of waste heat in district heating system  
Master Thesis  
Tampere University  
Master's Degree Program in Environmental and Energy Engineering  
October 2022

---

Climate targets direct the energy producer to alternative forms of heat production. Heat production emissions can be reduced by utilizing waste heat instead of heat production based on the combustion process. The vision of the district heating sector is to develop district heating systems in a way that the utilization of waste heat in the district heating network would be possible on commercial grounds. Changing the district heating network so-called two-way or open, offers customers and outsiders the opportunity to sell waste heat to district heating companies. However, the current production units of district heating systems and the characteristics and structure of the district heating network limit the possibilities of utilizing waste heat. Each district heating system is different in its function, structure, and environment, which is why the technical and economic conditions and solutions related to the utilization of waste heat must be implemented system-specific and case-specific.

The target of this thesis was to identify how waste heat could be utilized in Pori Energia's main district heating system which consists of two combined heat and power plants and four oil-fired peak power plants. The work introduced the operation of the district heating system and characteristics of various waste heat sources. Based on the characteristics, hourly power and temperature profiles were created for four different sources of waste heat (data center, industrial cooling water system, crematorium, grocery store) and the district heating system. Based on the profiles, the constraints and solutions related to the utilization of waste heat were clarified. The work investigated how much waste heat could be utilized in the district heating network. The work investigated the amount of waste heat limited by the need for district heating (ideal) and the amount of waste heat limited by the requirements set by the production structure (actual) and found out how the utilization of waste heat would change if the district heating system included a seasonal thermal energy storage solution. In addition, the costs caused by the utilization of waste heat were determined to estimate the size of the basic payment component and the value of waste heat (€/MWh) was determined to estimate the energy price to be paid for the waste heat to the waste heat producer.

Based on the results, district heat demand and production structure limit the utilization of waste heat in Pori Energia's district heating system. In an ideal situation, waste heat of less than 10 MW could be used 100 % and sources of higher power class almost completely. However, the ideal utilization of waste heat is currently not possible. Currently, using waste heat when the outside temperature is above +14 °C is not profitable due to the limitations set by the current production structure. When the outside temperature is -10 °C to +14 °C, the waste heat would replace the district heat produced by the combined heat and power plants. Due to this, the profitable utilization and value of waste heat is strongly dependent on the market price of electricity at this temperature scale, because reducing the heat production of combined heat and power plants would also reduce the total potential of electricity production. When the market price of electricity is below 100 €/MWh, waste heat can be utilized economically. In this case, the price paid to the waste heat producer could be 25 - 0 €/MWh depending on the price of electricity. Mainly when the outside temperature is below -10 °C, the waste heat would replace the peak capacity (oil), in which case the utilization of the waste heat would always be profitable and its value, depending on the outside temperature, would be 25–60 €/MWh. Seasonal storage would enable better utilization of waste heat and help to get rid of fossil fuels. However, in addition to seasonal storage, changes in the production structure should also be considered. Solutions for better utilization of waste heat must be considered, especially if the prices of biofuels rise or the price of electricity drops significantly.

Keywords: district heating system, open district heating, waste heat, power profile, temperature profile, temporal analysis, heat exchanger, heat pump, seasonal thermal energy storage

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin OriginalityCheck service.

# ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Pori Energia Oy:lle. Haluan kiittää työnantajaani työn mahdollistamisesta, sekä mielenkiintoisista tehtävistä, joiden parissa olen työn tiimoilta saanut toimia. Haluan kiittää Pori Energialta työni ohjaajaa Merja Heliniemeä ja muita työssä mukana olleita henkilöitä. Lisäksi osoitan kiitokset Energiakauppa-tiimille viihtyisästä työskentely ympäristöstä sekä hyvistä neuvoista ja keskusteluista.

Työn tarkastajia, Henrik Tolvasta sekä Niko Niemelää, kiitän työn ohjaamisesta ja työn aikaisista neuvoista. Kiitos myös opiskelujen aikaista kurssien tuomista mukaansatempaavista haasteista ja opeista, jotka ovat innostaneet perehtymään energia-alaan. Lopuksi haluan myös kiittää opiskeluystäväni ikimuistoisista opiskeluaajoista ja vanhempiani opintojen aikaisesta tuesta.

Porissa, 31.10.2022

Oona Lehtonen

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
2. KAUKOLÄMPÖJÄRJESTELMÄN TOIMINTA.....	4
2.1 Lämmön kysyntä ja -kulutus.....	4
2.2 Lämmöntuotanto .....	6
2.3 Lämmönsiirto .....	9
3. HUKKALÄMMÖN LÄHTEIDEN KARAKTERISOINTI .....	12
3.1 Teollisuus.....	12
3.2 Datakeskus .....	18
3.3 Jätevedenpuhdistamo .....	20
3.4 Päivittäistavarakauppa .....	21
3.5 Jäähalli.....	24
4. HUKKALÄMPÖJEN TEKNIS-TALOUDELLINEN HYÖDYNTÄMINEN .....	26
4.1 Lämmönvaihdin – tekniikka ja talous.....	26
4.2 Lämpöpumppu – tekniikka ja talous .....	28
4.3 Kausilämpövarasto – tekniikka ja talous.....	30
5. AINEISTO JA MENETELMÄT .....	33
5.1 Tutkimuksen rakenne.....	34
5.2 Kaukolämpöjärjestelmän mallintaminen .....	35
5.2.1 Tarkastelun kohteena oleva kaukolämpöjärjestelmä .....	35
5.2.2 Kaukolämpöjärjestelmän profilointi.....	38
5.3 Hukkalämpökohteiden mallintaminen .....	42
5.3.1 Tarkastelun kohteena olevat hukkalämpökohteet.....	42
5.3.2 Hukkalämmön lähteiden profilointi .....	43
5.4 Hukkalämpöjen hyödyntäminen kaukolämpöjärjestelmässä.....	46
5.4.1 Temporaalinen analyysi .....	46
5.4.2 Taloudellinen analyysi.....	48
6. TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU.....	52
6.1 Kaukolämpöjärjestelmän profiili.....	52
6.2 Hukkalämmön lähteiden profiilit .....	58
6.3 Hukkalämpöjen hyödyntäminen kaukolämpöjärjestelmässä.....	60
6.3.1 Hukkalämpöjen temporaalinen hyödynnettävyys .....	60
6.3.2 Hukkalämpöjen taloudellinen hyödynnettävyys .....	66
7. YHTEENVETO.....	71
LÄHTEET .....	73

LIITE 1: KAUKOLÄMPÖJÄRJESTELMÄN TUOTANTOPROFIILI .....	83
LIITE 2: KAUKOLÄMPÖJÄRJESTELMÄN POLTTOAINEPROFIILI .....	84
LIITE 3: HUKKALÄMMÖN LÄHTEIDEN TUOTANTOPROFIILIT .....	85
LIITE 4: HUKKALÄMMÖN LÄHTEIDEN HYÖDYNTÄMISTEKNOLOGIAT .....	86
LIITE 5: HUKKALÄMMÖN LÄHTEIDEN TUOTANTOPROFIILIT HYÖDYNTÄMISTEKNOLOGIALLA.....	87
LIITE 6: HUKKALÄMPÖJEN IDEAALINEN HYÖDYNNETTÄVYYS .....	88
LIITE 7: ULKOPUOLISEN LÄMMÖN HYÖDYNTÄMISPOTENTIAALI.....	89
LIITE 8: HUKKALÄMPÖJEN NYKYINEN HYÖDYNNETTÄVYYS .....	90
LIITE 9: HUKKALÄMPÖJEN HYÖDYNNETTÄVYYS KAUSIVARASTOLLA .....	91
LIITE 10: HUKKALÄMPÖJEN TALOUDELLINEN HYÖDYNNETTÄVYYS .....	92

# LYHENTEET JA MERKINNÄT

ATES	engl. Aquifer Thermal Energy Storage, pohjavesivarasto	
BTES	engl. Borehole Thermal Energy Storage, porakaivovarasto	
CHP	engl. combined heat and power, lämmön- ja sähkön yhteistuotanto	
CO <sub>2</sub>	hiilidioksidi	
COP	engl. coefficient of performance, lämpökerroin	
CTES	engl. Cavern Thermal Energy Storage, kallioluolavarasto	
DN	engl. diameter nominal, nimellishalkaisija	
HVAC	engl. heating ventilation and air condition, ilmanvaihto-ilmastointijärjestelmä	
KL	kaukolämpö	
LP	lämpöpumppu	
LV	lämmönvaihdin	
POK	kevyt polttoöljy	
PTES	engl. pit thermal energy storage, kaivantovarasto	
PUE	engl. power usage effectiveness, datakeskuksen energiatehokkuus	
REF	engl. recovered fuel, nyk. SRF, kierrätyspolttoaine	
SKL	savukaasulauhdutin	
STES	engl. seasonal thermal energy storage, kausilämpövarasto	
TES	engl. thermal energy storage, lämpövarasto	
TK	tutkimuskysymys	
TTES	engl. tank thermal energy storage, kaivantovarasto	
$A_{LV}$	lämmönvaihtimen lämmönsiirtopinta-ala	[m <sup>2</sup> ]
$c_i$	kantaja-aineen ominaislämpökapasiteetti	[kJ/kgK]
$c_{n/i}$	annuiteettitekijä	[-]
$E_{HL}$	hukkalämpömäärä	[MWh]
$E_{HL,tod}$	hukkalämpömäärä hyödyntämisteknologialla	[MWh]
$E_{IT}$	IT-laitteiden sähkönkulutus	[MWh]
$E_{prim}$	primäärienergiankulutus	[MWh]
$E_{tekninen,hukkalämpö}$	teknisesti hyödynnettävä hukkalämpö	[MWh]
$E_{tekninen,hukkalämpö,höyry}$	teknisesti hyödynnettävä höyry hukkalämpö	[MWh]
$E_{tekninen,hukkalämpö,jäähd.}$	teknisesti hyödynnettävä jäähdytysväliaineen hukkalämpö	[MWh]
$E_{tekninen,hukkalämpö,sk}$	teknisesti hyödynnettävä savukaasu hukkalämpö	[MWh]
$E_{tot}$	sähkön kokonaiskulutus	[MWh]
$f_{DC}$	lämmöntalteenoton hyödyntämiskerroin datakeskuksissa	[-]
$H_{CO_2}$	hiilidioksidipäästöjen hinta	[€/MWh]
$H_{HL,ominaiskust.}$	hukkalämmön ominaiskustannus	[€/MWh]
$H_{HL}$	hukkalämmön arvo	[€/MWh]
$HK_{LP}$	lämpöpumpun huolto- ja kunnossapitokustannukset	[€/a]
$HK_{LV}$	lämmönvaihtimen huolto- ja kunnossapitokustannukset	[€/a]
$H_{TES}$	lämpövaraston investointikustannus	[€]
$H_{energia}$	polttoaineen valmisteveroton hankintahinta	[€/MWh]
$H_{kiku}$	kiinteät kustannukset	[€/a]
$H_{muku}$	muuttuvat kustannukset	[€/a]
$H_{pa}$	polttoaineen kokonaishinta	[€/MWh]
$H_{polttoainevero}$	polttoaineen valmistevero	[€/MWh]
$H_{putki}$	kaukolämpöverkon putkikustannukset	[€/MWh]
$H_{sähkö}$	sähkön kokonaishinta	[€/MWh]
$H_{sähköenergia}$	sähköenergian hinta	[€/MWh]
$H_{sähköhäviö}$	sähkönmyyntitappio	[€/MWh]

$H_{\text{sähkövero}}$	sähköveron hinta	[€/MWh]
$H_{\text{siirto}}$	sähkön siirtohintaa	[€/MWh]
$I$	investointikustannus	[€]
$i$	laskentakorkokanta	[-]
$I_{LP}$	lämpöpumpun investointikustannus	[€/kW]
$I_{LV}$	levylämmönvaihtimen investointikustannus	[€]
$k_{\text{refr}}$	kylmälaitteen kuluttaman sähkön osuus	[-]
$k_{\text{skal}}$	korjauskerroin	[-]
$\dot{m}$	massavirta	[kg/s]
$MK_{LP}$	lämpöpumpun sähkökäytön muuttuva kustannus	[€/h]
$n$	pitoaika	[a]
$P_g$	sähköteho	[MW]
$P_{\text{max, siirto}}$	kaukolämpöverkon maksimisiirtokapasiteetti	[MW]
$Q_{HL, \text{ sähköhäviö}}$	sähkön tuotantoon vaikuttava hukkalämpöteho	[MW]
$Q_{HL, \text{ varasto}}$	varastointikapasiteetin vaativa hukkalämpöteho	[MW]
$Q_{HL, \text{ verkko}}$	kaukolämpöverkkoon syötettävä hukkalämpöteho	[MW]
$Q_{HL}$	hukkalämpöteho	[W]
$Q_{LP}$	lämpöpumpun lämpöteho	[kW]
$Q_{LV}$	lämmönvaihtimen lämpöteho	[W]
$Q_{\text{putki}}$	kaukolämpöputken kapasiteetti	[MW]
$Q_{\text{sisään}}$	lämpöpumppuun syötetty lämpöenergia	[W]
$Q_{\text{sähköhäviö, Aittaluoto}}$	Aittaluodon voimalaitoksen sähköntuottotappio	[MW]
$Q_{\text{sähköhäviö, Kaanaa}}$	Kaanaan voimalaitoksen sähköntuottotappio	[MW]
$Q_{\text{ulos}}$	lämpöpumpusta saatava lämpöenergia	[W]
$r$	rakennusaste	[-]
$T_C$	lämpöpumppu prosessiin tuodun lämmön lämpötila	[K]
$T_H$	lämpöpumppu prosessista poistetun lämmön lämpötila	[K]
$T_{HL}$	hukkalämmön lämpötila	[°C]
$T_m$	kaukolämpöveden menolämpötila	[°C]
$T_p$	kaukolämpöveden paluulämpötila	[°C]
$t_{\text{skal}}$	aikakerroin	[-]
$T_{\text{ulko}}$	ulkolämpötila	[°C]
$U$	lämmönvaihtimen kokonaislämmönsiirtokerroin	[W/m <sup>2</sup> K]
$V_{HL}$	hukkalämmön virtaama	[m <sup>3</sup> /h]
$W_{\text{komp}}$	kompressorin teho	[W]
$\delta_{\text{ideal}}$	hukkalämpöjen ideaalinen hyödynnettävyys	[%]
$\delta_{\text{TES}}$	hukkalämpöjen hyödynnettävyys varastolla	[%]
$\delta_{\text{tod}}$	hukkalämpöjen nykyinen hyödynnettävyys	[%]
$\eta_{\text{höyry}}$	höyryn hukkalämpökerroin	[-]
$\eta_{\text{hukkalämpö}}$	hukkalämpökerroin	[-]
$\eta_{\text{jäähd.}}$	jäähdytysväliaineen hukkalämpökerroin	[-]
$\eta_k$	kattilahyötysuhde	[-]
$\eta_{sk}$	savukaasun hukkalämpökerroin	[-]
$\eta_{\text{tekninen, hukkalämpö}}$	tekninen hukkalämpökerroin	[-]
$\eta_{\text{tekninen}}$	tekninen hyödynnettävyys -kerroin	[-]
$\phi$	nettohöyryteho	[MW]
$\phi_{KL\text{min, Aittaluoto}}$	Aittaluodon voimalaitoksen minimi kaukolämpöteho	[MW]
$\phi_{KL\text{min, A-kattila}}$	A-kattilan minimi kaukolämpöteho	[MW]
$\phi_{KL\text{min, Kaanaa}}$	Kaanaan voimalaitoksen minimi kaukolämpöteho	[MW]
$\phi_{KL\text{min, SKL}}$	Savukaasulauhduttimen minimi kaukolämpöteho	[MW]
$\phi_{\text{maxA-kattila}}$	A-kattilan maksimiteho	[MW]



$\phi_{max_{SKL}}$	savukaasulauhduttimen maksimiteho	[MW]
$\phi_{min_{A-kattila}}$	A-kattilan minimiteho	[MW]
$\phi_{min_{Cymic-kattila}}$	Cymic-kattilan minimiteho	[MW]
$\phi_{häviö}$	prosessihäviöt	[MW]
$\phi_{A-kattila}$	A-kattilan nettohöyryteho	[MW]
$\phi_{Cymic}$	Cymic-kattilan nettohöyryteho	[MW]
$\phi_H$	prosessihöyryteho	[MW]
$\phi_{KL_{huippukap.}}$	huippulämpökeskusten kaukolämpöteho	[MW]
$\phi_{KL_{Aittaluoto}}$	Aittaluodon voimalaitoksen kaukolämpöteho	[MW]
$\phi_{KL_{A-kattila}}$	A-kattilan kaukolämpöteho	[MW]
$\phi_{KL}$	kaukolämpöteho	[MW]
$\phi_{SKL}$	savukaasulauhduttimen kaukolämpöteho	[MW]
$\phi_{apujäähd.}$	apujäähdysteho	[MW]
$\phi_{max}$	kattilan huipputeho	[MW]
$\phi_{min}$	kattilan minimiteho	[MW]
$\phi_{pa}$	polttoaineteho	[MW]
$\phi_{tot}$	kauko- ja prosessilämpöteho	[MW]
$\Delta T$	lämpötilaero	[K]
$\Delta T_1$	fluidien välinen lämpötilaero lämmönvaihtimen alussa	[K]
$\Delta T_2$	fluidien välinen lämpötilaero lämmönvaihtimen lopussa	[K]
$\Delta T_{ln}$	logaritminen keskilämpötilaero lämmönvaihtimessa	[K]

# 1. JOHDANTO

Energiasektori aiheuttaa liikenteen ja maatalouden ohella suurimman osan Suomen kasvihuonekaasupäästöistä [1]. Vuonna 2021 energiasektorin kokonaispäästöt olivat 34 milj. tonnia, josta kaukolämpösektorin osuus oli noin 15 % [2] [3]. Kuitenkin poliittinen paine ja regulaatio, sekä huoli globaalista energiakriisistä ohjaa energian tuottajia vahvasti energiatehokkaaseen ja päästöttömään sähkön- ja lämmön tuotantoon. Suomen tavoitteena on olla hiilineutraali vuoteen 2035 mennessä, sekä saavuttaa lähes päästötön sähkön- ja lämmöntuotanto 2030-luvun loppuun mennessä. [4] Yksi mahdollinen keino vähentää lämmöntuotannon hiilidioksidipäästöjä ja polttoaineiden käyttöä, on kaukolämpöverkon alueella muodostuvien hukkalämpöjen talteenotto ja hyödyntäminen kaukolämpöverkossa lämmön tuottamisen sijaan. Hukkalämpö (ylijäämälämpö, jäteämpö) on sivutuotteena väistämättä syntyvää lämpöenergiaa, jota ei toistaiseksi vielä hyödynnetä. Hyödyntämättömänä hukkalämpö poistuu kiinteistöistä tai tuotantolaitoksista esimerkiksi lauhde- ja jäähdytysvesien, jätevesien, poistoilmojen ja -kaasujen, savukaasujen, lietteiden sekä laitteiden säteilylämmön mukana ympäristöön. [5] [6] [7] Hukkalämpöä voi olla mahdollista käyttää uudelleen tuotantoprosessissa, tai lämpöä voidaan hyödyntää tehdaskiinteistön lämmittämisessä tai yrityksen tarvitsemien raaka- ja polttoaineiden kuivattamisessa [8]. Tyypillisesti, mikäli hukkalämpöä ei ole mahdollista hyödyntää syntykohteessa, voidaan harkita kohteen ulkopuolisia hyödyntämismahdollisuuksia, kuten lämmön myyntiä kaukolämpöyhtiölle.

Kaukolämpöalan visiona ja strategiana on, että kaukolämpöjärjestelmiä kehitetään niin, että asiakkaiden ylijäämälämmön hyödyntäminen kaukolämpöverkossa olisi kaupallisin perustein mahdollista. Kaukolämpöverkon muuttaminen ns. kaksisuuntaiseksi tai avoimeksi, vastaavalla tavalla kuin sähköverkko, mahdollistaa sen, että asiakkaat sekä ulkopuoliset henkilöt voivat myydä hukkalämpöä kaukolämpöyhtiöille, jossa sitä voidaan hyödyntää kaukolämmön tuotannossa. [9] Suomessa muutamilla energiayhtiöillä on jo saatavilla avoimia, tuotantokustannuksiin ja ulkolämpötilaan perustuvia, hukkalämmön ostohintoja [10] [11] [12]. Erilaisia hukkalämpöjä myös jo hyödynnetään esimerkiksi Fortumin [13] [14], Helenin [15] [16] ja Nivoksen [17] kaukolämpöverkoissa. Lisäksi Suomessa on tehty useita selvityksiä, minkälaisissa kohteissa ja kuinka paljon hukkalämpöjä muodostuu, mitkä tekijät vaikuttavat hukkalämmön hyödynnettävyyteen ja miten hukkalämpöjä saataisiin hyödynnettyä kaukolämmön tuotannossa [6][18]. Hukkalämpöjen laaja-

alainen hyödyntäminen kaukolämpöverkoissa on kuitenkin vielä kehitysvaiheessa, johon tuen kaukolämpöjärjestelmien toiminnasta ja rakenteesta. Nykyisellään kaukolämmön tuotanto toteutetaan pääsääntöisesti yhteistuotantolaitoksilla ja lämmön jakelu korkealämpöisen (~ 100 °C) paineistetun veden muodossa [19]. Olemassa olevien kaukolämpöjärjestelmien tuotantokokonaisuus sekä kaukolämpöverkon ominaisuudet ja rakenne asettavat vaatimuksia hukkalämpökohteille ja rajoittavat hukkalämpöjen hyödyntämismahdollisuuksia. Jokainen kaukolämpöjärjestelmä on myös toiminnaltaan ja rakenteeltaan erilainen, jonka takia hukkalämpöjen vastaanoton soveltuvuus, tekniset sekä taloudelliset edellytykset ja ratkaisut, on aina toteutettava järjestelmä- ja tapauskohtaisesti. [20] Tämän työn tarkoitus on selvittää miten hukkalämpö olisi hyödynnettävissä Pori Energian kaukolämpöjärjestelmässä.

Pori Energia on energia-alan yritys, joka tuottaa ja myy energiaa sekä energia-alan palveluja asiakkailleen pääasiassa Satakunnan alueella. Yrityksen tärkeimmät tuotteet ovat sähkö, kaukolämpö ja -kylmä sekä prosessihöyry teollisuuden tarpeisiin. Pori Energialla on Porin alueella kolme kaukolämmön erillisverkkoa Reposaaressa, Noormarkussa ja Laviassa, sekä runkoverkko, jonka välityksellä kaukolämpöä toimitetaan Porin alueen asiakkaille sekä Ulvilan kaukolämpöverkkoon. Erillisverkoissa kaukolämpö tuotetaan lämpökeskuksilla. Runkoverkon tuotantokokonaisuuden muodostaa kaksi yhteistuotantolaitosta, sekä neljä ympäri kaukolämpöverkkoa sijaitsevaa huippu- ja varakäytössä olevaa öljykäyttöistä lämpökeskusta. Työssä keskitytään selvittämään, miten hukkalämpöjä voidaan hyödyntää runkoverkossa. Runkoverkko on yli 230 km pitkä ja sen varrella sijaitsee niin teollisuutta, kuin myös julkisia palvelurakennuksia, asuintaloja sekä toimistorakennuksia. Työssä selvitetään, millaisia runkoverkon alueella sijaitsevat hukkalämpökohteet ovat ominaisuuksiltaan ja miten niitä voitaisiin hyödyntää tarkasteltavassa kaukolämpöverkossa, ottaen huomioon ympäröivän energiajärjestelmän ominaisuudet, eli tuotantokokonaisuuden rakenteen ja sen asettamat rajoitteet hukkalämpöjen hyödyntämisessä.

Työn päätarkoitus on luoda Pori Energialle alkukartoitus, jonka avulla pystytään lähemmään kehittämään hukkalämpöjen hyödyntämistä runkoverkossa taloudellisin perustein. Työssä selvitetään, milloin ja miten hukkalämmön hyödyntäminen on kannattavaa. Työssä selvitetään kannattavasti hyödynnettävän hukkalämmön määrä (MWh), sekä arvo (€/MWh) eri ajanhetkinä. Erilaiset hukkalämmön lähteet arvioidaan perustuen hukkalämpöjen ominaisuuksiin ja tarkasteltavan energiajärjestelmän toimintaan. Kaukolämpöjärjestelmän toiminnan, hukkalämpökohteiden ominaisuuksien sekä hukkalämpöjen hyödyntämisestä syntyvien kustannusten avulla tehdään johtopäätökset siitä, milloin

hukkalämpöä on taloudellisesti kannattavaa hyödyntää, mitä hukkalämmön tuottajalle voitaisiin maksaa hukkalämmöstä eri ajanhetkinä ja minkälaiset kohteet voisivat olla potentiaalisesti liitettävissä verkkoon. Näin ollen työssä pyritään vastaamaan seuraaviin kysymyksiin:

1. Millaisia rajoitteita ja vaatimuksia kaukolämpöjärjestelmän toiminta luo hukkalämpöjen hyödyntämiselle?
2. Millaisia energijärjestelmän ulkopuoliset tyypillisimmät hukkalämmön lähteet ovat ominaisuuksiltaan?
3. Miten voidaan määritellä hukkalämmön arvo (€/MWh) ja hyödynnettävyys kaukolämpöjärjestelmässä?
4. Millainen tarkasteltavien hukkalämpökohteiden hyödyntämispotentiaali on kaukolämpöjärjestelmässä ja miten lämmön kausivarastointiratkaisu vaikuttaisi siihen?
5. Mitkä tarkasteltavista hukkalämpökohteista ovat ominaisuuksiltaan potentiaalisimpia tarkasteltavassa kaukolämpöjärjestelmässä?

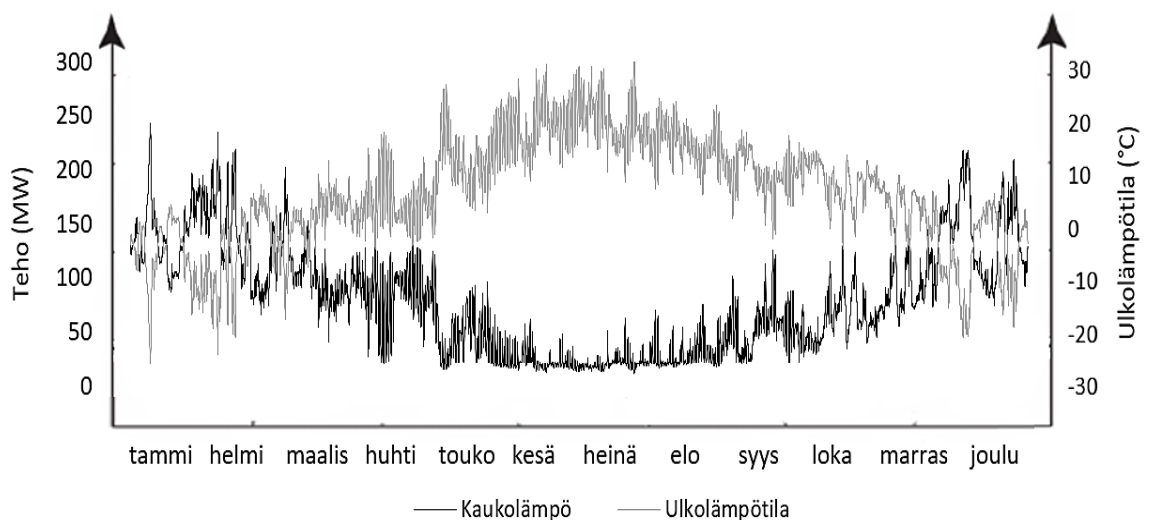
Ensin luvussa 2 tutustutaan kaukolämpöjärjestelmän toimintaperiaatteeseen. Luvussa 2 käsitellään kaukolämmön kulutukselle ja -kysynnälle, tuotannolle sekä siirrolle ominaisia piirteitä. Luvussa vastataan ensimmäiseen tutkimuskysymykseen. Tämän jälkeen luvussa 3 käsitellään Suomessa tyypillisesti esiintyviä hukkalämmön lähteitä ja niiden ominaisuuksia. Luku vastaa tutkimuskysymykseen kaksi. Tämän jälkeen luvussa 4 käsitellään hukkalämpöjen hyödyntämisteknologioita sekä hukkalämpöjen hyödyntämisen taloudellisuuteen vaikuttavia tekijöitä. Tutkimukseen liittyvän teorian jälkeen luvussa 5 esitellään tutkimuksen yleiskuvaus, eli taustatiedot ja aineistot, joiden avulla työn ongelmaa lähdetään ratkaisemaan. Luvussa esitetään tarkasteltava kaukolämpöjärjestelmä, sekä valitut hukkalämpökohteet ja niiden ominaisuudet. Lisäksi luvussa 5 esitetään menetelmä, miten tutkimus toteutetaan ja tärkeimmät tulokset muodostetaan. Luku 5 antaa vastauksen kolmanteen tutkimuskysymykseen. Tämän jälkeen luvussa 6 kootaan yhteen tärkeimmät tulokset ja analysoidaan niiden luotettavuutta. Luku 6 vastaa tutkimuskysymyksiin neljä ja viisi. Viimeiseksi luvussa 7 esitetään työn yhteenveto.

## 2. KAUKOLÄMPÖJÄRJESTELMÄN TOIMINTA

Kaukolämpöjärjestelmä koostuu tyypillisesti lämpöä tuottavista laitoksista, kaukolämpöverkosta, jonka avulla lämpö siirretään asiakkaille, sekä asiakaslaitteista, joiden avulla mahdollistetaan lämmön vastaanotto ja käyttö [21]. Tuotantolaitokset voidaan jaotella peruskuorman tuotantolaitoksiin sekä huippu- ja varakapasiteettiin. Suomessa kaukolämmön peruskuorma tuotetaan tyypillisesti sähkön- ja lämmön yhteistuotannolla (CHP, Combined Heat and Power) vastapainevoimalaitoksilla. Huippu- ja varakapasiteetti tuotetaan tyypillisesti lämpökeskuksilla. Tuotantolaitosten käyttöön vaikuttaa asiakkaiden tehontarve ja tehontarpeen vaihtelu, lämmön tuotannon kustannukset sekä kaukolämpöverkon siirtokapasiteetti. [22]

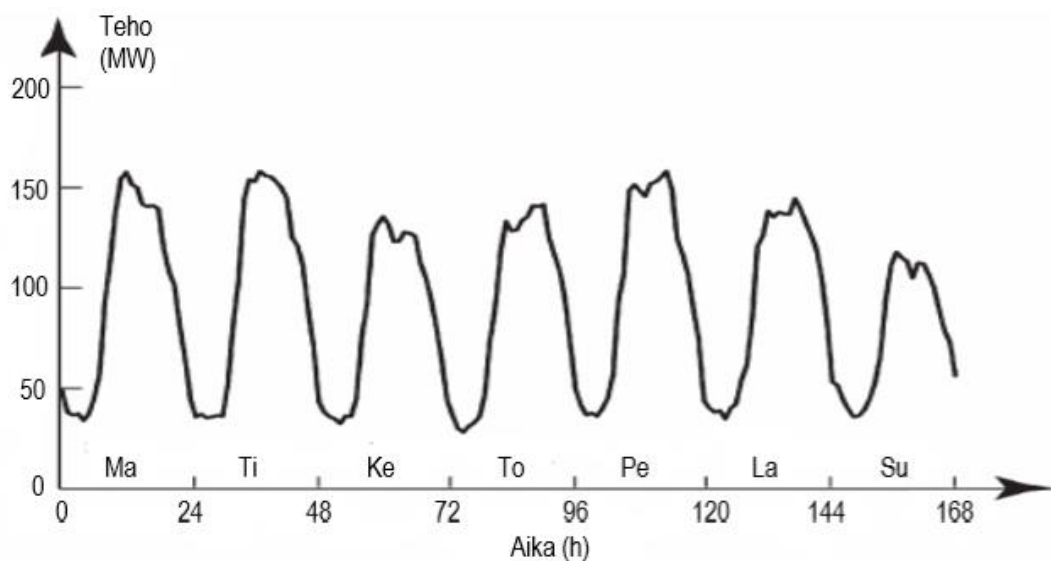
### 2.1 Lämmön kysyntä ja -kulutus

Kaukolämpöjärjestelmässä lämmöntarve muodostuu kaukolämpöverkkoon kytkettyjen asiakkaiden lämmöntarpeesta. Asiakaskunta voi koostua esimerkiksi asuintaloista, teollisuudesta, sekä julkisista palvelurakennuksista. [21] Asiakkaiden lämmöntarpeesta muodostuu koko verkon kysyntä- ja kulutuskäyttäytyminen. Kaukolämpöverkkoon kytkettyjen asiakkaiden lämmöntarve vaihtelee tyypillisesti eri vuodenaikoina, johtuen ulkolämpötilan  $T_{ulko}$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) vaihtelusta. Kaukolämpötehon  $\phi_{KL}$  (MW) tarve on suurimmillaan kovilla pakkasilla ja alhaisimmillaan lämpimällä ilmalla. [3] Kuvan 1 mukaisesti kaukolämmön (KL) kulutus vaihtelee merkittävästi vuodenajan ja ulkolämpötilan funktiona.



**Kuva 1** Ulkolämpötilan vaikutus kaukolämmön tarpeeseen Pori Energian runkoverkossa

Kesällä lämmityksen tarve pienenee, sillä silloin kaukolämpöä käytetään lähinnä vain käyttöveden lämmittämiseen. Talvikuukausina kaukolämpöä kuluu käyttöveden lämmittämisen lisäksi merkittävästi rakennusten lämmitykseen. Koko verkon tasolla kulutukseen vaikuttaa suurimmaksi osaksi ulkolämpötila, mutta myös vuorokaudenaika ja viikonpäivä vaikuttavat lämmöntarpeeseen merkittävästi. [21, s.42] Tuntivaihteluun vaikuttaa rakennuksen koko ja käyttötarkoitus sekä asiakkaan lämmönkulutusprofiili. Asuinrakennusten osalta käyttöveden kulutus muodostaa suurimman vaihtelun. Toimistorakennuksissa käyttöveden kulutus ei ole niin merkittävää, vaan vaihtelu on ennemminkin riippuvainen toimiston aukioloajoista. [23] Kuvassa 2 on havainnollistettu lämmönkulutuksen tehovaihtelua kaukolämpöverkossa tuntitasolla yhden viikon ajalta.

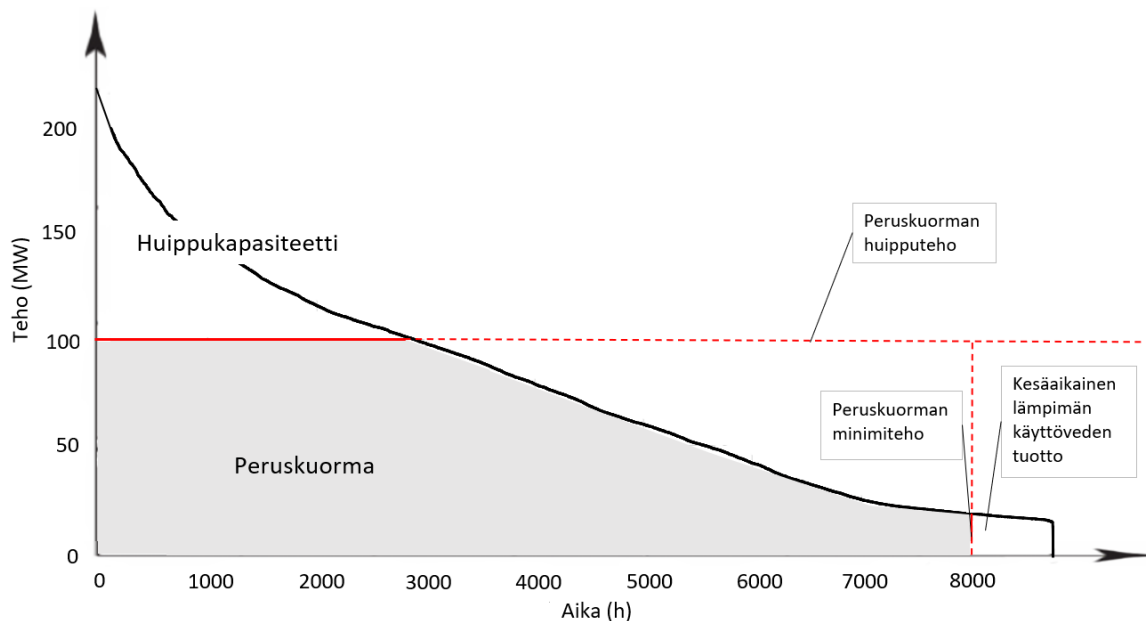


**Kuva 2** Kaukolämmön kulutuksen tehovaihtelu kaupungin kaukolämpöverkossa tuntitasolla viikon ajalta [22, s.263]

Tuntivaihtelussa näkyy tyypillisesti aamuisin asuinrakennusten käyttöveden kulutushuiput sekä toimistorakennusten ilmastointilaitteiden käynnistyminen. Tuntivaihtelussa voi myös havaita iltahuipun, jonka aiheuttaa pääasiassa käyttöveden kulutushuiput asuinrakennuksissa. Yöaikana kulutus vähenee toimistotilojen sisälämpötilojen alentamisen vuoksi. Yöaikaan myös asuinrakennusten lämpimän vedenkulutus on pienimmillään. Viikon aikana lämpökuormitukset ovat tyypillisesti pienempiä viikonloppuisin, kuin arkipäivisin. [21, s.42] Lämmön kysyntä ja -kulutus ohjaavat edelleen voimalaitoksilla tapahtuvaa lämmöntuotantoa.

## 2.2 Lämmöntuotanto

Lämmöntuotanto tapahtuu tyypillisesti yhteistuotannolla vastapainevoimalaitoksissa. Yhteistuotannon lisäksi kaukolämpöä tuotetaan lämpölaitoksilla, sillä perustuotannon lisäksi tarvitaan kapasiteettia varmistamaan lämmön saanti huippukulutushetkinä ja erilaisissa vikatilanteissa. [24] [25] Huippu- ja varakapasiteetin tuotanto riippuu lämmöntarpeesta ja päätuotantolaitoksen mitoituksesta. Huipputehontarve on tyypillisesti lyhytaikainen, jonka vuoksi peruskuormalaitoksina toimivat CHP-laitokset suunnitellaan kattamaan noin 50 % lämmöntarpeen maksimitehosta. Peruskuorman mitoitus 50 % maksimitehotarpeesta vastaa noin 90 % tuotetusta energiasta. [21, s.42] Hetkellisen lämmöntarpeen ylittäessä peruskuorman kattilan huipputehon  $P_{max}$  (MW) tai alittaessa kattilan minimitehon  $P_{min}$  (MW) hyödynnetään huippukapasiteettia. [21, s.322] Lämmöntuotannon jakautumista eri kapasiteeteille voidaan havainnollistaa kuvan 3 mukaisesti pysyvyyskäyrällä. Pysyvyyskäyrästä nähdään, kuinka paljon mitäkin käyttöaikaa esiintyy.



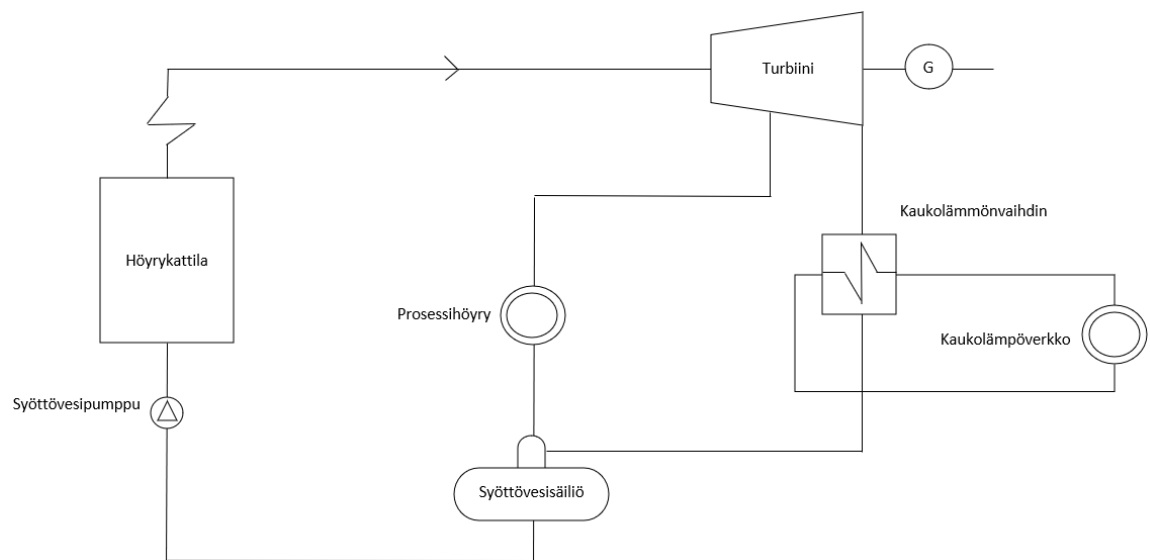
**Kuva 3** Lämmöntuotannon jakautuminen perus- ja huippukuormaan [21, s.322]

Sähköä ja lämpöä tuottavassa vastapainevoimalaitoksessa energiantuotannon perustana toimii tyypillisesti höyrykattila. Höyrykattilassa tuotettu tuorehöyry ohjataan turbiniin, jossa osa höyryn sisältämästä lämpöenergiasta muuttuu turbiinia pyörittäväksi mekaaniseksi energiaksi, joka saadaan edelleen muutettua sähköenergiaksi turbiiniin liitettyllä generaattorilla. Turbiinista höyry ohjataan kaukolämmönvaihtimelle, jossa höyry paisuu kaukolämmönvaihtimen läpi virtaavan kaukolämpöveden lämpötilan määräämään vastapaineeseen ja luovuttaa energiaa kaukolämpöveden. [26, s.7–10] Kaukolämmön

ja sähkön lisäksi CHP-laitoksella voidaan tuottaa prosessihöyryä teollisuuden prosesseihin. Teollisuuden yhteydessä sijaitsevilla CHP-laitoksilla on tyypillisesti eri painetasoissa olevia höyryasiakkaita. Tällöin osa paisuvasta höyrystä otetaan teollisuuden käyttöön turbiinin väliotosta ja loppuosan annetaan paisua vastapaineeseen. [26, s.10–13] Sähkön- ja lämmöntuotannon suhdetta voidaan kuvata rakennusasteen  $r$  avulla tuotetun sähkötehon  $P_g$  (MW) ja kauko- ja prosessilämpötehon  $\Phi_{\text{tot}}$  (MW) avulla seuraavasti:

$$r = \frac{P_g}{\Phi_{\text{tot}}} \quad (1)$$

Vastapainevoimalaitoksella tuotetaan tyypillisesti lämpöä määräävänä päätuotteena ja sähköä sivutuotteena. Rakennusaste on tyypillisesti 0,3–0,6, riippuen voimalaitoksen koosta ja tyypistä. [26, s.10–12] Laitoksen optimointiin ja ajoon vaikuttavat polttoaineiden hinnat, sähkön hetkellinen markkinahinta sekä höyryn ja kaukolämmön kysyntä. Kuvasssa 4 on esitetty vastapainevoimalaitoksen toimintaperiaate.



**Kuva 4** Vastapainevoimalaitoksen yksinkertaistettu toimintaperiaate [26, s.10–13]

Lämpölaitosten prosessit ovat hyvin samankaltaisia CHP-laitosten kanssa. Lämpölaitoksissa ainoastaan lämpötilat ovat matalampia, koska höyrykattilan sijaan hyödynnetään kuumavesikattilaa. [21, s.282] Voimalaitoksilla lämmöntuotanto perustuu polttoaineen palamisreaktiosta vapautuvaan lämpöenergiaan, joka siirretään kattilassa virtaavaan veteen. Kaukolämmön tuotantoon voidaan käyttää eri polttoaineita saatavuuden ja hintatason perusteella. [26, s.38] CHP-laitoksissa käytetään tyypillisesti kiinteitä polttoaineita, eli mm. puuta, kivihiiltä ja turvetta. Huippu- ja varakapasiteetin polttoaineena toimii tyypillisesti öljy tai maakaasu. [21, s.42] Polttoaineen polttoainetehto  $\Phi_{pa}$  (MW) voidaan



laskea tuotetun höyrytehon  $\Phi$  (MW) ja kattilahiötysuhteen  $\eta_k$  avulla yhtälön 2 mukaisesti. Kattilahiötysuhde on tyypillisesti 0,88–0,95, eli noin 10 % polttoainetehosta häviää erilaisissa kattila- ja prosessihäviöissä. [21, s.48] Kattilahiötysuhde kuvaa, kuinka suuri osa kattilaan syötettävän polttoaineen energiasta saadaan muutettua tuotettavan tuorehöyryn energiaksi.

$$\Phi_{pa} = \frac{\Phi}{\eta_k} \quad (2)$$

, joka edelleen voidaan ilmoittaa seuraavasti eri polttoainejakeiden summana:

$$\Phi_{pa} = \sum x_i \Phi_{pa} \quad (3)$$

, missä  $x_i$  kuvaa polttoainejakeen osuutta kokonaispolttoainekulutuksesta.

Polttoainekustannukset ovat yksi merkittävimmistä kustannustekijöistä lämmöntuotantokustannuksissa [22, s.11]. Taulukossa 1 on erilaisten kaukolämmöntuotannossa pääasiassa käytettävien polttoaineiden hankintahintoja  $H_{\text{energia}}$  (€/MWh) [27]. Lisäksi fossiililla polttoaineilla valmistevero muodostaa lisähintaa. Taulukossa 1 on myös esitetty valmisteverojen  $H_{\text{polttoainevero}}$  (€/MWh) aiheuttama lisäkustannus polttoaineille [28] [29].

**Taulukko 1** Polttoaineiden hankintahintoja [27] ja valmisteveroja [28] [29] vuodelta 2022

Polttoaine	Hankintahinta (€/MWh)	Valmistevero (€/MWh)
Kivihiili	23	23,93
Maakaasu	84	15,72
Kevyt polttoöljy	151	22,60
Metsähake	24	-
Jyrsinturve	12	5,70

Lisäksi fossiilisia polttoaineita käytettäessä hiilidioksidipäästöt ( $\text{CO}_2$ ) tulee hyvittää päästöoikeuksilla [30]. Päästöoikeuden hinta on kasvanut viime vuosina voimakkaasti, jonka seurauksena se on yhä merkityksellisempi tekijä polttoainekustannusten optimoinnissa. Päästöoikeuden hinta vuonna 2017 oli noin 5 €/t $\text{CO}_2$ , kun taas vuoden 2022 alussa noin 100 €/t $\text{CO}_2$  [31]. Taulukossa 2 on esitetty polttoaineiden päästökertoimet, sekä hiilidioksidipäästön tuoma lisähinta  $H_{\text{CO}_2}$  (€/MWh) eri polttoaineille muutamalla eri päästöoikeuden hinnalla [32].

**Taulukko 2** Päästöoikeuden aiheuttama lisähinta (€/MWh) fossiilisille polttoaineille [32]

Polttoaine	Päästökerroin (tCO <sub>2</sub> /MWh)	Päästöoikeus	Päästöoikeus	Päästöoikeus	Päästöoikeus
		60 €/tCO <sub>2</sub>	70 €/tCO <sub>2</sub>	80 €/tCO <sub>2</sub>	90 €/tCO <sub>2</sub>
		Lisäkustannus (€/MWh)	Lisäkustannus (€/MWh)	Lisäkustannus (€/MWh)	Lisäkustannus (€/MWh)
Kivihiihi	0,335	20,1	23,5	26,8	30,2
Maakaasu	0,199	11,9	13,9	15,9	17,9
Kevyt polttoöljy	0,253	15,2	17,7	20,2	22,7
Jyrsinturve	0,387	23,2	27,1	31,0	34,9
Kierrätys- polttoaine*	0,114	6,9	8,0	9,2	10,3

\* Oletettu bio-osuus 60 %

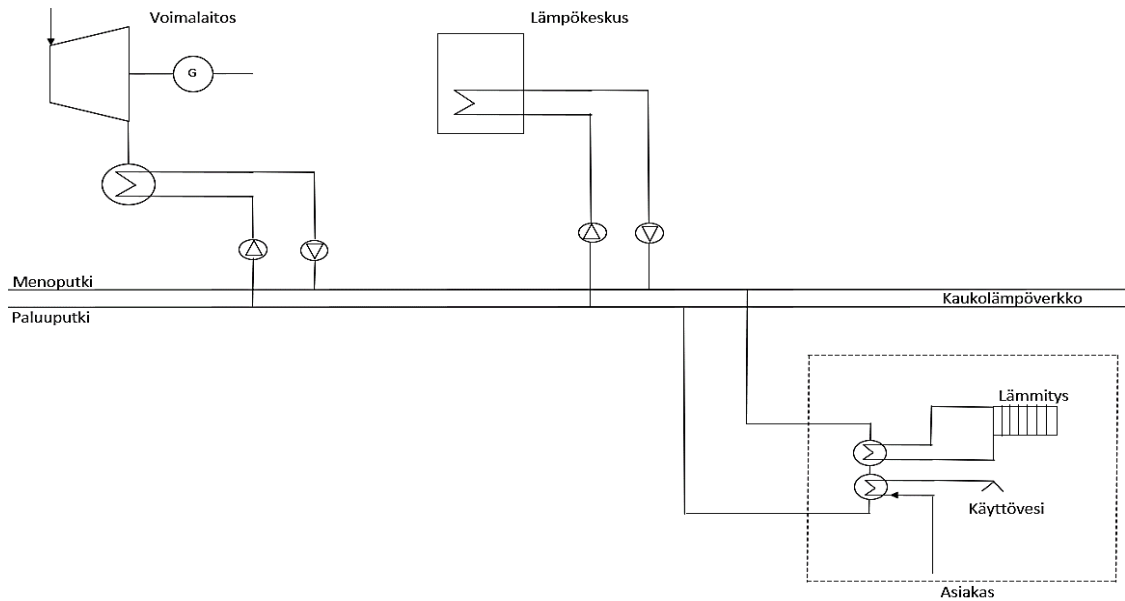
Näiden perusteella polttoaineen kokonaiskustannus  $H_{pa}$  (€/MWh) voidaan laskea seuraavasti:

$$H_{pa} = H_{energia} + H_{polttoainevero} + H_{CO_2} \quad (4)$$

Kaukolämmön polttoainejakauma on paikkakunta- ja laitoskohtainen.

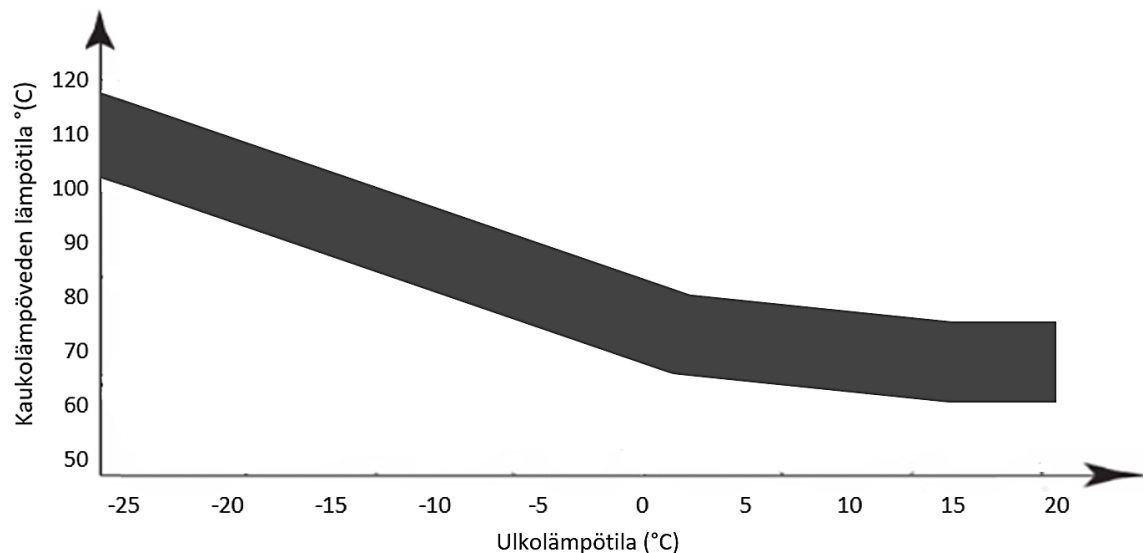
## 2.3 Lämmönsiirto

Kaukolämpöverkon avulla tuotantolaitoksilla tuotettu lämpö siirretään kohteeseen, jossa sitä käytetään rakennuksen ja käyttöveden lämmittämiseen. Kaukolämpöverkko on meno- ja paluuputkesta koostuva suljettu kaksiputkijärjestelmä. Menoputkessa virtaavan veden avulla tuotantolaitoksilla tuotettu lämpöenergia siirretään asiakkaille. Suomessa kaukolämpöverkon ja rakennuksen vesikierrot ovat erillisiä, eli kaukolämpövesi ei suoraan virtaa rakennuksien lämmitysverkoissa, vaan lämmönvaihdin erottaa ne. [22, s.10] Menoputkessa virtaava kaukolämpövesi johdetaan kiinteistön lämmönjakokeskukseen, jossa vesi luovuttaa lämpöä asiakkaille lämmönsiirtimen välityksellä. Lämmönjakokeskuksessa on yleensä vähintään kaksi lämmönsiirrintä, yksi lämpimälle käyttövedelle ja yksi lämmitykselle. Lämmön luovuttamisen jälkeen kaukolämpövesi kulkeutuu jäähtyneenä paluuputkessa takaisin tuotantolaitokselle uudelleen lämmitettäväksi. [21, s.43–44] Kuvassa 5 on esitetty kaksiputkisen kaukolämpöjärjestelmän toimintaperiaate.



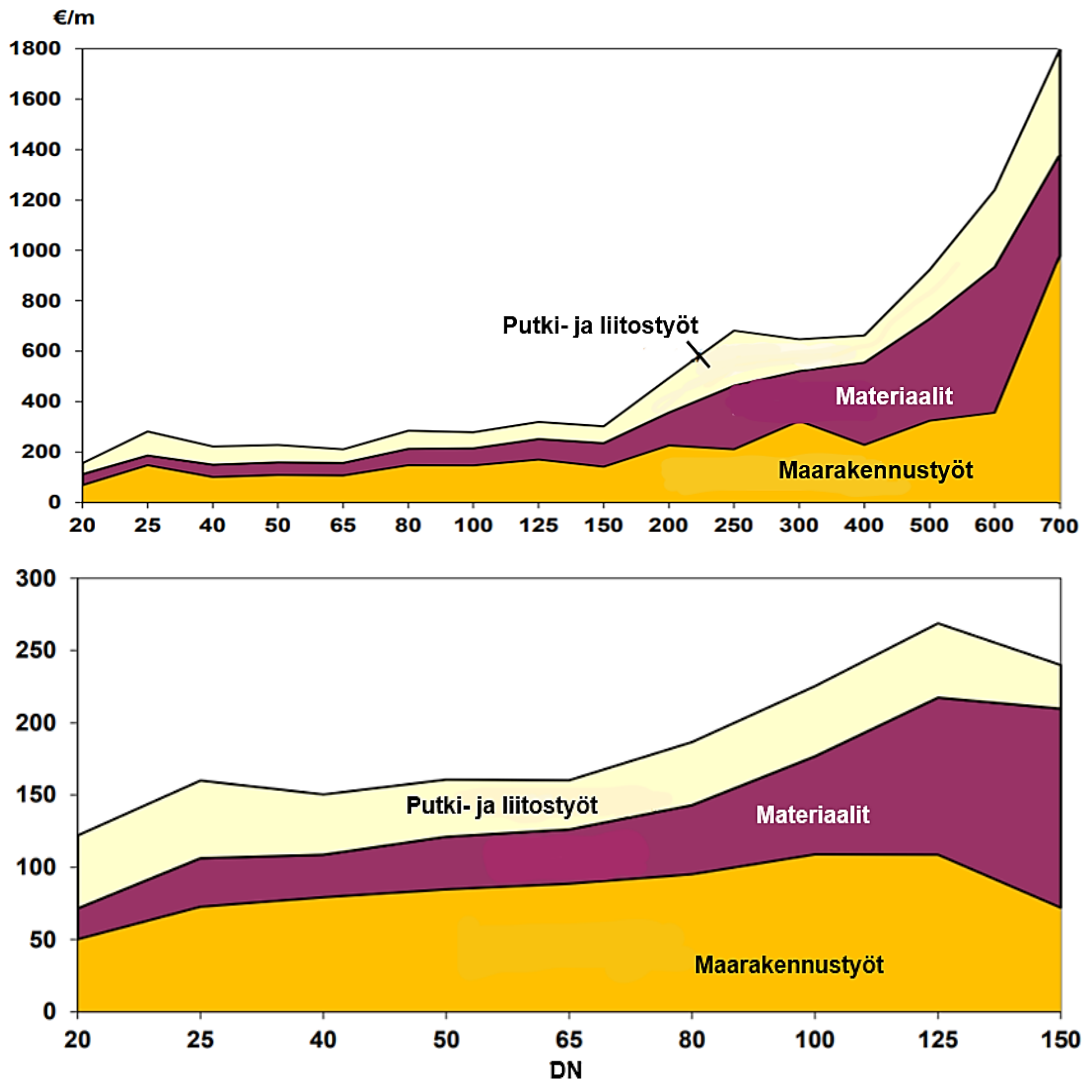
**Kuva 5** Kaukolämpöjärjestelmän yksinkertaistettu toimintaperiaate [21, s.43]

Meno- ja paluujohdon välissä on paine-ero, jotta vesi kiertää verkossa. Mitoituspaine on tyypillisesti 16 bar. Kaukolämpöveden mitoituslämpötila on 120 °C. Menoputken kaukolämpöveden lämpötila  $T_m$  (°C) riippuu kuitenkin ulkolämpötilasta, ja on tyypillisesti 65–115 °C. [21] Menovesi on tyypillisesti noin 90 °C kevästä syksyyn ja vain talven kovimilla pakkasilla menoputkessa virtaa 115 °C vettä. Kuvassa 6 on esitetty kaukolämpöveden lämpötilan vaihtelu menoputkessa ulkolämpötilan funktiona. Paluuputkessa virtaavan veden lämpötila  $T_p$  (°C) riippuu veden jäähtymästä asiakkaan lämmönvaihtimissa. Paluuputkessa virtaava vesi on tyypillisesti 40-60 °C. [33]



**Kuva 6** Kaukolämpöveden lämpötila menoputkessa ulkolämpötilan funktiona [34]

Lämpöhäviöiden minimoimiseksi kaukolämpöjohdot on lämpöeristetty. Jakeluverkon häviöt vaihtelevat tyypillisesti 5–10 % riippuen verkon rakenteesta. [21, s.48] [35] Suomessa yleisin johtotyyppi on kiinnivaahdotettu muovisuojakuorijohtorakenne, jossa käytetään sekä yksiputkirakennetta (2Mpuk) että kaksiputkirakennetta (Mpuk) [36]. Lämmöntuotantolaitosten ohella suuri osa kaukolämpöjärjestelmän investointikustannuksista kohdistuu jakeluverkkoon [22, s.14]. Kuvasta 7 saa yleiskuvan maan johtorakentamisen kokonaiskustannuksista 2Mpuk- ja Mpuk-rakenteella.



**Kuva 7** 2Mpuk-rakenteen (yllä) ja Mpuk-rakenteen (alla) rakentamiskustannukset osakustannuksiin jaettuna [36]

Kustannuksiin vaikuttaa vahvasti putken nimellishalkaisija (DN, Diameter Nominal) ja rakennetyyppi. Käytettävä kaukolämpöputkikoko riippuu siirrettävästä tehosta, tehotarpeen vaihtelusta sekä meno- ja paluueden välisestä lämpötilaerosta. [37, s.52]

### 3. HUKKALÄMMÖN LÄHTEIDEN KARAKTERISOINTI

Hukkalämpöjen ominaisuudet riippuvat hukkalämmön syntykohteesta. Hukkalämpöjen väliaine (kaasu, höyry, neste jne.) ja kemialliset ominaisuudet, lämpötilataso, lämpöteho, ajoitus sekä esiintymisen ennustettavuus vaihtelevat hukkalämmön lähteen perusteella [6] [9] Hukkalämpöjä syntyy niin teollisuudessa, maataloudessa, julkisella sektorilla, kuin myös kotitalouksissa. Hukkalämpöpotentiaalia esiintyy myös energiateollisuudessa esimerkiksi voimalaitosten savukaasuissa, kaukojäähdytysjärjestelmässä sekä sähköasemien muuntamoissa. [38] Suomessa hyödyntämätöntä hukkalämpöpotentiaalia on erityisesti energiaintensiivisillä teollisuudenaloilla [18]. Teollisuuden lisäksi hyödyntämätöntä hukkalämpöpotentiaalia on merkittävästi julkisella- ja palvelusektorilla. Jätevesien käsittelylaitoksilta sekä suurten jäähdytyskohteiden jäähdytyksestä löytyy potentiaalisia hukkalämmön lähteitä. Lisäksi hukkalämpöä syntyy kiinteistökohtaisesti jäähdytyksen, harmaan veden sekä poistoilmojen yhteydessä pienempiä määriä. [38] [39]

#### 3.1 Teollisuus

Suomalainen teollisuus on merkittävä energian kuluttaja. Eri teollisuudenalat sisältävät hyvin laajan kirjon erilaisia lämpöä ja sähköä kuluttavia prosesseja. Suomessa merkittävimmät primäärienergian kuluttajat ovat metsä-, kemian-, metalli- ja elintarviketeollisuus. [40] Teollisuudenalojen hukkalämpöpotentiaali seurailee tyypillisesti alan primäärienergiankulutusta, eli teollisuuskohteen energialähteiden jakauma ja kulutus vaikuttavat välillisesti muodostuvien hukkalämpöjen ominaisuuksiin. Syntyvän hukkalämmön suuruusluokka ja ajallinen vaihtelu riippuvat prosessin hetkellisestä energiankulutuksesta. Energiankulutus on riippuvainen teollisuuden käyttöasteesta, joka voi vaihdella esimerkiksi vuodenajan mukaan. Tyypillisesti teollisuus on jatkuvatoimista, eli se sisältää vain huolokatot. Kuitenkin teollisuus voi toimia myös yhdessä (esim. 1x8h) tai kahdessa (esim. 2x8h) vuorossa. Tietyn prosessin energiankulutus voi olla jatkuvatoimista, tai se voi vaihdella syklisesti. [41] Teollisuuden prosesseista syntyy tyypillisesti joko suoraan hukkalämpöä esimerkiksi kuivaus- tai lämpökäsittelyprosesseista lämpimien hönkähöyryjen, poistokaasujen ja -ilmojen muodossa, tai vaihtoehtoisesti välillisesti erilaisten prosessien, kuten pesun tai jäähdytyksen, kautta erilaisten fluidien muodossa. Lämmönlähteen tyyppin ja laadun mukaan valtaosa teollisuuden hukkalämmöstä voidaan luokitella seuraavasti: 1. korkean lämpötilan hukkalämpö savukaasuista, 2. korkean lämpötilan huk-

kalämpö höyrystä, 3. korkean lämpötilan kuona- tai jäännöshukkalämpö, (esim. masuunien kuona), 4. korkean tai keskilämpötilan tuote hukkalämpö (esim. kuparisulattojen rikkihappo) 5. matalan lämpötilan jäähdytysväliaineen hukkalämpö, 6. korkean lämpötilan palavan kaasun hukkalämpö (esim. masuunikaasu) 7. matalan lämpötilan hukkalämpö lauhdevesistä. [42]

**Metsäteollisuuden** primäärienergian kulutusjakauma Suomessa on tyypillisesti seuraavanlainen: 77 % polttoaineita, 3 % lämpöä ja 20 % sähköä [43]. Kemiallisen metsäteollisuuden (i.e. massa- ja paperiteollisuuden) merkittävimmät prosessit ovat sellun, sekä edelleen paperin ja kartongin valmistus. Sellun valmistus kuluttaa energiaa tyypillisesti noin 5–7 MWh/t. Paperi- ja kartonkituotteiden valmistus kuluttaa tyypillisesti energiaa tuotteen tyypistä riippuen 2,50–3,06 MWh/t. [44] [45] Energiankulutukseen vaikuttaa merkittävästi laitoksen tuotantomäärä sekä käyntiaika. Esimerkiksi Porin kartonkitehtaalla tuotanto on ympäristöluvan perusteella noin 120 000 t/a hylsykartonkia, 80 000 t/a uusiomassaa ja 35 000 t/a puoliselua. Laitoksessa on 2000-luvun alussa käytetty höyryä noin 550 000 GJ/vuosi (i.e. 154 166 MWh) ja sähköä 55 000 MWh/vuosi. [46] Lisäksi metsäteollisuudessa käytetään paljon vettä, niin prosessi-, kuin myös jäähdytystarpeisiin. Esimerkiksi Porin kartonkitehtaalla prosessivesiä on 2000-luvun alussa käytetty noin 1700–2000 m<sup>3</sup>/päivä ja jäähdytysvesiä 4300–4500 m<sup>3</sup>/päivä. Ylimääräinen jae prosessivesikierrosta ohjataan kaupungin jätevedenpuhdistamolle ja jäähdytysvedet Kokemäenjokeen. [46] Metsäteollisuuden tuotanto on tyypillisesti jatkuvatoimista ja tuotantoaste ei ole vuodenajasta riippuvainen [47]. Esimerkiksi Porin Kartonkitehtaan käyntiaika vuonna 2001 oli 8216 h [46].

**Kemianteollisuuden** primäärienergian kulutusjakauma Suomessa on tyypillisesti seuraavanlainen: 64 % polttoaineita, 13 % lämpöä ja 23 % sähköä [43]. Kemianteollisuuden merkittävimpiä tuotteita ovat peruskemikaalit, öljy-, muovi- ja kumituotteet, sekä lääkkeet. Kemianteollisuudessa prosessit vaativat energiaa mm. lämpötilojen nostamiseen, paineiden hallintaan tai tuotteiden erotteluun. Kemianteollisuudessa sähköä käytetään esimerkiksi. elektrolyysiin, komprimointiin, pumppuihin ja puhaltimiin. Lämmönkäyttökohteita ovat tyypillisesti prosessivirtojen lämmitys, sekä tislaus- ja haihdutusprosessit. [48] Kemianteollisuudessa tuotteiden valmistuksessa käytetään tyypillisesti erilaisia poltto-, höyrystys-, pesu- ja jäähdytysprosesseja sekä kemiallisia reaktioita, joissa reaktiolämpö on melko korkea. Energiaa kuluu paljon mm. kemikaalien ja kemiallisten tuotteiden, öljytuotteiden ja muovien valmistukseen. Peruskemikaalien tuotannossa mm. ammoniakin ja metanolin valmistus kuluttaa merkittävästi energiaa. [48] [49] Esimerkiksi

ammoniakin ja metanolin valmistus kuluttaa energiaa noin 5 MWh/t, kun taas polypropeenin valmistus noin 200 MWh/t [44] [50]. Kokonaisenergiankulutukseen vaikuttaa teollisuuslaitoksen tuotantomäärä ja käyntiaika, esimerkiksi Porin muovipakkaustehtas on vuonna 2003 tuottanut 21 000 t/vuosi muovituotteita, energiankulutuksen tällöin ollen noin 3,84 GWh polttoaineita ja 20 GWh sähköä. Lisäksi kemianteollisuus kuluttaa merkittäviä määriä vettä niin prosesseihin, kuin myös jäähdytykseen. Esimerkiksi Porin muovipakkaustehtaalla on vuonna 2003 kulunut vettä jäähdytykseen noin 252 000 m<sup>3</sup> [51]. Kemianteollisuus on tyypillisesti jatkuvatoimista, eikä tuotantoaste ole vuodenaajasta merkittävästi riippuvainen [47].

**Metalliteollisuuden** primäärienergian kulutusjakauma Suomessa on tyypillisesti seuraavanlainen: 56 % polttoaineita, 2 % lämpöä ja 42 % sähköä [43]. Metalliteollisuudessa on tyypillisesti erilaisia lämpökäsittelyprosesseja, sulatusta sekä valua ja valssausta sekä jäähdytysprosesseja. Koneita valmistavassa teollisuudessa käytetään mm. lämpökäsittely-, maalaus- ja pinnoitusprosesseja. Metalliteollisuuden prosessit kuluttavat paljon energiaa, sillä lämpötilat ovat prosesseissa korkeita. [44] Energiankulutus on riippuvainen laitoksen tuotantomäärästä ja käyntiajasta, esimerkiksi Porin Kupariteollisuuspuistossa noin 60 000 t/a erilaisia kuparituotteita tuottava laitos kuluttaa sähkö- ja lämpöenergiaa noin 60–70 GWh/vuosi [52]. Lisäksi metalliteollisuudessa käytetään paljon vettä, niin prosessi-, kuin myös jäähdytystarpeisiin. Esimerkiksi Porin Kupariteollisuuspuiston alueelta erilaisia kuparituotteita valmistavien yritysten jäähdytysvesiä johdetaan Kokemäenjokeen viiden pääviemärin kautta noin 7 400 000 m<sup>3</sup>/vuosi [53]. Metalliteollisuus on tyypillisesti jatkuvatoimista ja tuotantoaste ei ole vuodenaajasta riippuvainen [47]. Metalliteollisuudessa kuitenkin erilaisten linjojen käyntiajat voi vaihdella, joka vaikuttaa koko laitoksen energian- ja jäähdytys- sekä prosessivesien kulutukseen hetkellisesti merkittävästi [52].

**Elintarviketeollisuuden** primäärienergian kulutusjakauma Suomessa on tyypillisesti seuraavanlainen: 19 % polttoaineita, 44 % lämpöä ja 37 % sähköä [43]. Elintarviketeollisuudessa ruokatuotteiden valmistuksessa käytetään lämpöä mm. kypsentämiseen, sterilointiin, pastörintiin, kuivaukseen sekä siivoamiseen. Tarvittavat lämpötilat ovat usein matalia, jonka takia prosessivesiä, -höyryä tai erilaisia uuneja käytetään laajalti prosesseissa. [54] Lisäksi elintarviketeollisuudessa esiintyy tyypillisesti runsaasti erilaisia kylmälaitteita ja pakastamoja, jotka kuluttavat merkittäviä määriä sähköä. [41] Valmisruokateollisuus kuluttaa energiaa tyypillisesti 0,50–3,65 MWh/t [44] [55], juomateollisuus 32–35 MWh/hl [44] ja leipomot 0,88–0,92 MWh/t [56]. Kokonaisenergiankulutus on riippuvainen elintarviketeollisuuden koosta ja tuotantoasteesta. Esimerkiksi leipomossa,

jossa työskentelee noin 78 henkilöä ja taikinan tuotantomäärä on noin 4 390 t/vuosi, kulutetaan vuodessa sähköä 3 879 MWh ja 695 690 Nm<sup>3</sup> maakaasua (6 956,9 MWh) lämmön tuottamiseen uuneihin ja toimitiloihin. Vedenkulutus kyseisen kokoluokan leipomolla on 10 445 m<sup>3</sup>/vuosi. [57] Kun taas leipomon, jossa työskentelee noin 30 henkilöä, sähköä kuluu 876 MWh/vuosi ja maakaasua noin 91 800 m<sup>3</sup>/vuosi (918 MWh/vuosi). Maakaasusta 56,6 % kuluu uunien lämmitykseen, 36,6 % tilojen lämmitykseen ja 6,78 % käyttöveden lämmitykseen. [58] Elintarviketeollisuus toimii tyypillisesti laitoksen koosta ja tuotantomäärästä riippuen 3-, 2- tai 1-vuorossa.

Osa primäärisestä energiasta sitoutuu itse prosessiin, ja loput muodostavat hukkalämmön teoreettisen kokonaispotentiaalin. Tästä osa on otettavissa talteen, osa taas ei (väistämättömät häviöt). Tämä osa muodostaa teknisen potentiaalin. Teollisuudesta muodostuvaa ja teknisesti hyödynnettävää hukkalämpöä  $E_{tekninen,hukkalämpö}$  (MWh) voidaan arvioida Dénarié A. et al. [59] mukaan primäärienergiankulutuksen  $E_{prim}$  (MWh), sekä teknisen hukkalämpökertoimen  $\eta_{tekninen,hukkalämpö}$  avulla seuraavasti:

$$E_{tekninen,hukkalämpö} = E_{prim} \eta_{tekninen,hukkalämpö} \quad (5)$$

, joka voidaan esittää edelleen seuraavasti:

$$E_{tekninen,hukkalämpö} = E_{prim} \eta_{tekninen} \eta_{hukkalämpö} \quad (6)$$

missä  $\eta_{hukkalämpö}$  kuvaa osuutta primäärienergiankulutuksesta, joka ei sitoudu itse toimintaan ja  $\eta_{tekninen}$  osuutta, joka on hyödynnettävissä ylijäämäenergiasta teknisesti. Edelleen, jos hukkalämpöä synnyttävät prosessit pystytään jakamaan kantaja-aineen olomuodon perusteella, voidaan selvittää tietyn kantaja-aineen synnyttämä hukkalämpömäärä. Väliaineen ollessa savukaasu, voidaan hukkalämpömäärä selvittää seuraavasti:

$$E_{tekninen,hukkalämpö,sk} = E_{prim} \eta_{tekninen} \eta_{hukkalämpö} \eta_{sk} \quad (7)$$

Kantaja-aineen ollessa jäähdytysfluidi, voidaan hukkalämpömäärä selvittää seuraavasti:

$$E_{tekninen,hukkalämpö,jäähd.} = E_{prim} \eta_{tekninen} \eta_{hukkalämpö} \eta_{jäähd.} \quad (8)$$

Ja väliaineen ollessa höyry, saadaan hukkalämpömäärä selvitettyä seuraavasti:

$$E_{tekninen,hukkalämpö,höyry} = E_{prim} \eta_{tekninen} \eta_{hukkalämpö} \eta_{höyry} \quad (9)$$

Kirjallisuudessa on esitetty arvoja erityyppisille tehokkuuskertoimille. Taulukossa 3 on esitetty tehokkuuskertoimia erilaisille teollisuudenaloille ja niiden tyypillisille prosesseille tai tuotteille.



**Taulukko 3** Eri teollisuudenalojen hukkalämmön hyödyntämiseen liittyviä tehokkuuskertoimia lämpöenergian loppukäytöstä ( $LK_{th}$ ), primäärienergiasta ( $PE$ ), lämmön primäärienergiasta ( $PE_{th}$ ) tai tietyn prosessin lämmön primäärienergian ( $PE_{th, pros}$ ) määrästä

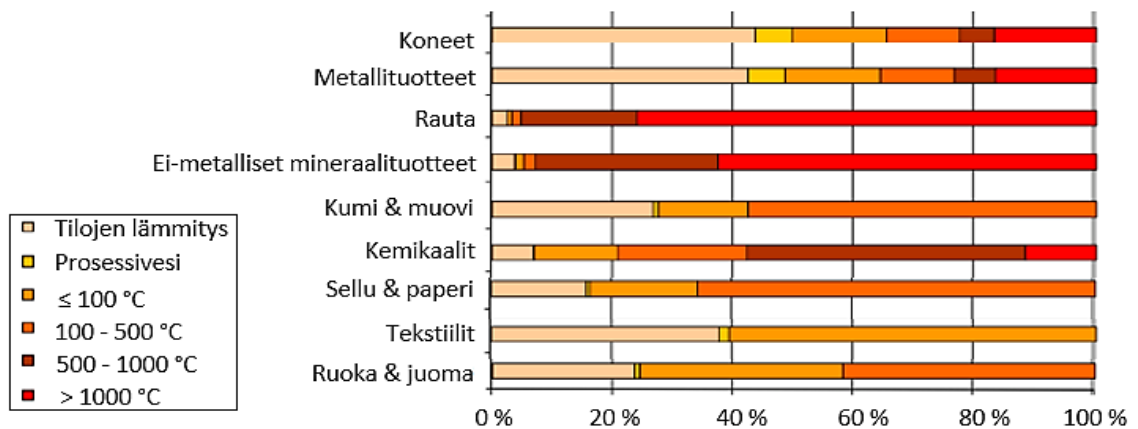
Teollisuussektori	$\eta_{tekninen, hukkalämpö}$	$\eta_{tekninen}$	$\eta_{hukkalämpö}$	$\eta_{sk}$	$\eta_{jäähd.}$	$\eta_{höyry}$	Ref.	Lähde
<b>Metsäteollisuus</b>								
Sellu- ja paperi	0–5 %	-	-	-	-	-	$LK_{th}$	[60] [59]
	-	50 %	25 %	-	-	-	$PE_{th}$	[61] [59]
	-	50 %	46 %	17 %	1 %	78 %	PE	[41] [59]
	2,4 %	-	-	-	-	-	PE	[59]
<b>Kemianteollisuus</b>								
Kemikaalit	5–10 %	-	-	-	-	-	$LK_{th}$	[60] [59]
	-	50 %	25-50 %	-	-	-	$PE_{th}$	[61] [59]
	-	50 %	13 %	44 %	24 %	32 %	PE	[41] [59]
	12,2 %	-	-	-	-	-	PE	[59]
	-	-	3,5 %	-	-	-	$PE_{th}$	[62]
Ei-metalliset mineraalituotteet	5–20 %	-	-	-	-	-	$LK_{th}$	[60] [59]
	-	50 %	25 %	-	-	-	$PE_{th}$	[61] [59]
	-	50 %	20 %	55 %	13 %	32 %	PE	[41] [59]
	2,9 %	-	-	-	-	-	PE	[59]
Muovin prosessointi	-	-	3 %	-	-	-	$PE_{th}$	[62]
<b>Metalliteollisuus</b>								
Perusmetallit	5–10 %	-	-	-	-	-	$LK_{th}$	[60] [59]
	-	50 %	25 %	-	-	-	$PE_{th}$	[61] [59]
	-	50 %	12 %	-	-	-	PE	[41] [59]
	17,3 %	-	-	-	-	-	PE	[59]
Valu	-	-	27,5 %	-	-	-	$PE_{th}$	[62]
Metallituotteiden valmistus	-	-	3 %	-	-	-	$PE_{th}$	[62]
Metallituotteiden pinnoitus	-	-	3 %	-	-	-	$PE_{th}$	[62]
<b>Elintarviketeollisuus</b>								
Elintarvikkeet ja juomat	5–10 %	-	-	-	-	-	$LK_{th}$	[60] [59]
	-	50 %	10 %	-	-	-	$PE_{th}$	[61] [59]
	-	50 %	52 %	7 %	54 %	35 %	PE	[41] [59]
Elintarvikkeet ja tupakka	3,6 %	-	-	-	-	-	PE	[59]
Keittiö	-	-	15,5 %	-	-	-	$PE_{th}$	[62]
Leipomo	-	-	44 %	-	-	-	$PE_{th}$	[62]
Lihakauppa	-	-	17,5 %	-	-	-	$PE_{th, pros}$	[62]
<b>Tekstiiliteollisuus</b>								
Tekstiilit	-	50 %	26 %	-	-	-	PE	[41] [59]
Pesula	-	-	5 %	-	-	-	$PE_{th, pros}$	[62]

Vaihtoehtoisesti, jos hukkalämmön kantaja-aineen olomuoto, lämpötila, sekä virtaus tunnetaan, voidaan hyödyksi saatava hukkalämpöteho  $Q_{HL}$  (kW) arvioida kantaja-aineen ominaislämpökapasiteetin  $c$  ( $\text{kJ K}^{-1} \text{kg}^{-1}$ ), massavirran  $\dot{m}$  (kg/s) ja lämpötilaeron  $\Delta T$  (K) avulla seuraavasti:

$$Q_{HL} = c \dot{m} \Delta T \quad (10)$$

Kantaja-aineen ollessa vesi, jäähdytys voidaan tyypillisesti tehdä ympäristön olosuhteisiin. Kantaja-aineen ollessa kaasu, voidaan se jäädyttää noin  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  aiheuttamatta lämmönsiirtopintojen korroosiovahinkoja. [63]

Syntyvän hukkalämmön lämpötila ja lämpötilanvaihtelu riippuu prosessista. Teollisissa prosesseissa käytetään lämmitystä matalissa (alle  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), keskisuurissa ( $100\text{--}400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) sekä korkeissa lämpötiloissa (yli  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Matalaa lämpöä käytetään esimerkiksi pesuprosesseissa, huuhtelussa ja ruoanvalmistuksessa. Osa lämmöstä käytetään myös tilojen ja käyttöveden lämmittämiseen. Keskitason lämpöä syötetään prosessiin tyypillisesti höyryn avulla. Tarkoituksena on usein haihduttaa tai kuivata. Yli  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$  lämpötilatasoja saadaan aikaan käyttämällä esimerkiksi kuumia kaasuja tai polttoprosesseja. [22, s.65–66] Kuvassa 8 on esitetty erilaisten teollisuussektorien tarvitsemia lämpötiloja.



**Kuva 8** Teollisuussektorien kuluttaman lämmön laatu lämpötilatasoittain [62] Teollisuuden kuluttaman lämmön laatu korreloi syntyvien hukkalämpöjen lämmön laadun ja määrän kanssa.

**Metsäteollisuudessa** hukkalämpöä muodostuu tyypillisesti eniten kuivatusprosesseista. Kuivauksesta syntyvä hukkalämpö voi lähteestä riippuen vaihdella välillä  $50\text{--}100\text{ }^{\circ}\text{C}$  tai  $40\text{--}149\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Myös erilaisista uuneista ja kattiloista muodostuu korkealämpöistä hukkalämpöä kaasujen muodossa. Lisäksi alle  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  tai  $40\text{--}59\text{ }^{\circ}\text{C}$  hukkalämpöä voi muodostua pienemmissä määrin jäähdytysprosesseista. **Kemianteollisuudessa** hukkalämpöjä syntyy erityisesti kuivaimista ja polttoprosesseista höyryn ja savukaasujen

muodossa. Höyryt ovat tyypillisesti 40–99 °C ja savukaasut 100–149 °C. Lisäksi pienemmissä määrin voi muodostua kylmälaitteiden synnyttämää alle 40 °C hukkalämpöä. **Metalliteollisuudessa** hukkalämpöä poistuu tyypillisesti paljon korkealämpöisten savu- ja poistokaasujen mukana. Metalliteollisuudessa hukkalämpöä muodostuu erityisesti uuneista kaasujen muodossa, sekä kuivausprosesseista höyryn muodossa. Kaasujen ja höyryn lämpötilat voivat vaihdella 40–249 °C. **Elintarviketeollisuudessa** muodostuu tyypillisesti hukkalämpöä pesuvesien ja jäähdytysjärjestelmien väliaineiden muodossa. Pesuvesien sekä erilaisista jäähdytysprosesseista syntyvä hukkalämpö on tyypillisesti alle 40 °C, tai 40–79 °C. Lisäksi erilaisissa kuivausprosesseissa muodostuu suuria määriä eri laatuista (alle 40 °C, jopa 149 °C) hukkalämpöä. [41] [62]

### 3.2 Datakeskus

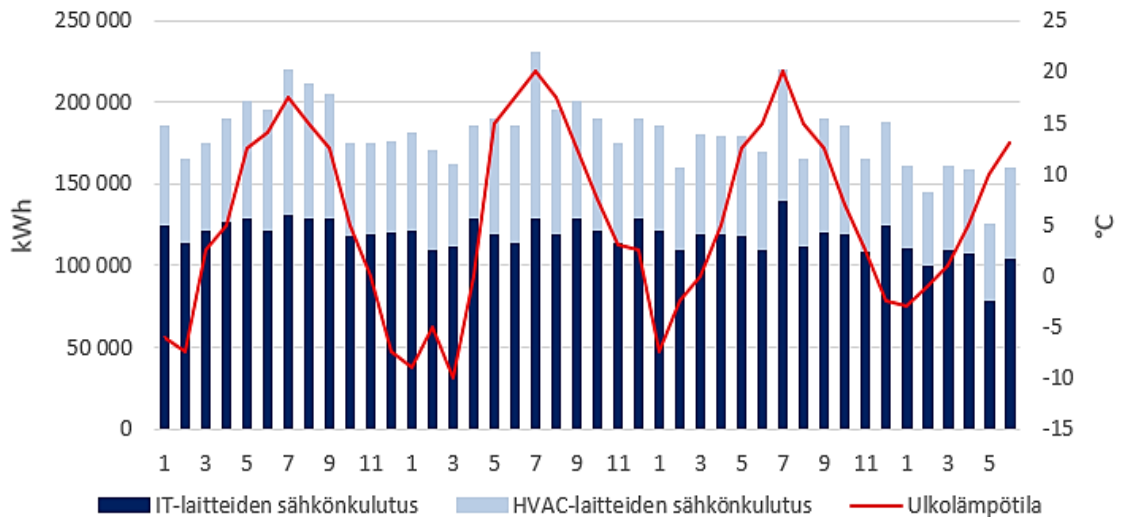
Datakeskus on keskitetty tila, jonka pääasiallinen tarkoitus on datan siirtäminen, prosessointi ja tallennustilan tarjoaminen [64, s.21] Datakeskuksen infrastruktuurin muodostaa IT-laitteet (palvelimet, verkko- ja tallennuslaitteet), sähköjakelujärjestelmä sekä UPS- ja varavoimajärjestelmät, automaatiojärjestelmät ja jäähdytysjärjestelmät. Datakeskuksien infrastruktuuri tarvitsee suuria määriä sähköä toimiakseen. Tyypillinen datakeskuksen sähköteho on 10–50 MW. [64, s.34–39] Suurin osa datakeskusten kuluttamasta sähköstä menee datapalvelimien toimintaan. Datakeskuksen energiatehokkuutta kuvataan PUE (Power Usage Effectiveness) arvolla, yhtälön 11 mukaan. PUE kertoo konesalin käyttämän kokonaisenergian  $E_{tot}$  (MWh) suhteen IT-laitteiden käyttämään sähköenergiaan  $E_{IT}$  (MWh). [65, s.18]

$$PUE = \frac{E_{tot}}{E_{IT}} \quad (11)$$

PUE-arvot vaihtelevat tyypillisesti 1,1–3,0:n välillä. Uusien datakeskuksien PUE-arvo voivat olla jopa 1,02–1,20, eli nykyisellään vain pieni osa datakeskuksen kuluttamasta sähköstä kuluu muuhun tarkoitukseen. [64, s.39] Lähes kaikki sähkö, jonka IT-laitteet käyttävät toimiakseen, muuttuu lämmöksi (yli 99 %) [66]. Laitteiden toiminnan kannalta on välttämätöntä, että lämpö poistetaan jäähdytysjärjestelmän avulla. Riippuen jäähdytysjärjestelmästä lämpö poistuu datakeskuksista nesteen tai poistoilman mukana, tyypillisesti esimerkiksi järveen tai ulkoilmaan. [64, s.41–42]

Syntyvän hukkalämmön suuruusluokka ja ajallinen vaihtelu riippuvat datakeskuksen sähkökulutuksesta, sillä sähkönkulutus ohjaa edelleen jäähdytyksen tarvetta. Datakeskuksen sähköntarve vaihtelee vuorokauden ja ulkoilman lämpötilan mukaan. Vaihtelu sähköntarpeessa on kuitenkin melko vähäistä kuukausi- ja vuositasolla. [67] Kuvassa 9

on havainnollistettu vuodenajan ja ulkolämpötilan vaikutuksia datakeskuksen sähkönkulutukseen kuukauden funktiona. Datakeskuksissa palveluiden vuosittainen saatavuus on yli 99 %, eli kriittiset järjestelmät ovat varmennettuja, tuotannossa ei ole huoltoseisokkeja, eikä tuotannon alasajoa tapahdu vikatilanteissa. [68] Datakeskusten hukkalämpövirta on siis melko vakio ja toimitusvarma ajanhetkestä riippumatta.



**Kuva 9** IT-laitteiden ja ilmanvaihto-ilmastointi-järjestelmän (HVAC, Heating Ventilatin and Air Conditionin) sähkönkulutuksen vaihtelu. [67]

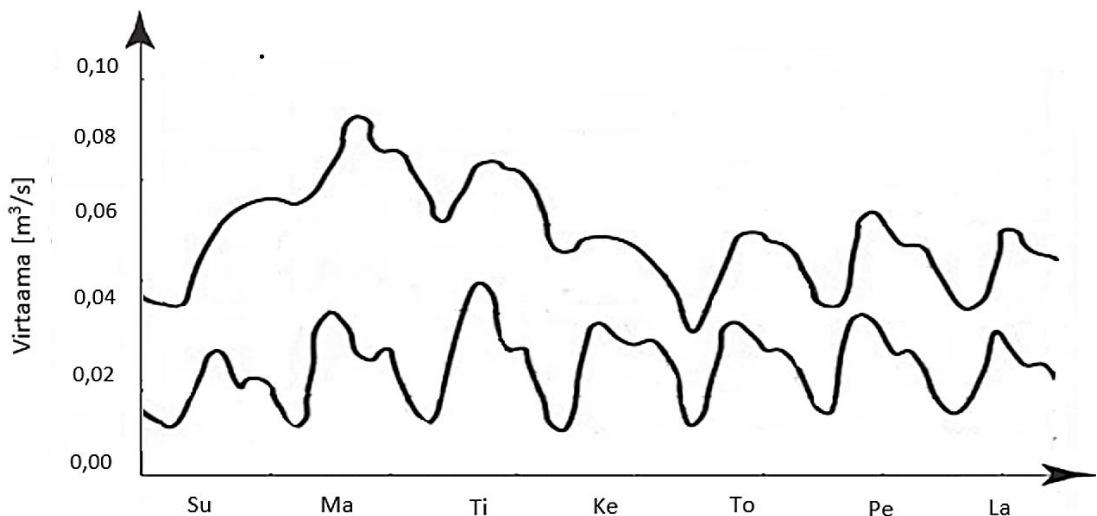
Sundellin [69] menetelmän avulla voidaan laskennallisesti arvioida datakeskuksessa muodostuva hukkalämpömäärä. Datakeskuksessa muodostuvaa hukkalämpöä  $E_{HL}$  (MWh) voidaan arvioida datakeskuksen sähkön kokonaiskulutuksen  $E_{tot}$  (MWh) ja hukkalämmön lämmöntalteenoton hyödyntämiskertoimen  $f_{DC}$  perusteella yhtälön 12 mukaisesti. Tyypillisen uuden datakeskuksen PUE-arvoilla (1,02–1,20) hyödyntämiskerroin voisi saada arvoja väliltä 0,98–0,83, mikäli oletetaan että kaikki IT-laitteiden kuluttama sähkö muuttuisi lämmöksi.

$$E_{HL} = E_{tot} f_{DC} \quad (12)$$

Syntyvän hukkalämmön lämpötila riippuu datakeskuksen käyttämästä jäähdytysmenetelmästä. Suomessa tyypillisin jäähdytysjärjestelmä on ilmajäähdytys. Ilmajäähdytteissä datakeskuksessa palvelimia jäähdytetään puhaltamalla 18–27 °C ilmaa palvelinten läpi, jonka seurauksena ilman lämpötila nousee. [64, s.41–42] Ilmajäähdytyksellä syntyvän hukkalämmön lämpötila on 30–45 °C. Lisäksi hyödynnetään yksi- ja kaksifaasisista nestejäähdytystä. Yksifaasisessa jäähdytysjärjestelmässä väliaineena toimii vesi ja kaksifaasisessa järjestelmässä jäähdytinneste. Yksifaasisessa prosessissa syntyvä lämpö on tyypillisesti 22–65 °C ja kaksifaasisessa prosessissa 62–80 °C. [38]

### 3.3 Jätevedenpuhdistamo

Jätevedenpuhdistamoille virtaa jatkuvasti jätevettä puhdistettavaksi erilaisista kulutuskohteista, kuten kotitalouksista ja teollisuudesta. Jätevesien virtaama riippuu viemäriverkostoon kytkettyjen asiakkaiden määrästä. Esimerkiksi Helsingissä Viikinmäen puhdistamolle [70] jätevettä virtaa noin 290 000 m<sup>3</sup>/d, eli ~ 12 080 m<sup>3</sup>/h, kun taas Porissa Luotsinmäen keskuspuhdistamolle [71] virtaa jätevettä vain noin 12 504 756 m<sup>3</sup>/vuosi, eli ~ 1 430 m<sup>3</sup>/h. Virtaus vaihtelee ajallisesti, vuorokausi-, viikko- ja vuositasolla. Virtaukseen vaikuttaa mm. asukkaiden vuorokausirytmii sekä teollisuuslaitosten käyntiaika ja prosessisykli. Tyypillisesti virtaus on suurimmillaan päiväsaikaan ja pienentyy iltaa ja yötä myöten. Lisäksi sateet ja sulamisvedet vaikuttavat voimakkaasti virtaukseen. Sade- ja lumensulamiskaudella virtaamat jätevedenpuhdistamolla voivat olla yli kaksinkertaisia kuivaan kauteen nähden. [72] Kuvassa 10 on havainnollistettu kuivien ja märkien jaksosten vaikutusta virtaamaan. Lukuun ottamatta sade- ja lumensulamiskausia ajalliset vaihtelut jäteveden virtaamassa ovat vähäisiä, eli virtausnopeus on melko vakio vuoden ympäri [73].



**Kuva 10** Jäteveden tyypillinen päivävirtaama märillä (yllä) ja kuivilla (alla) jaksoilla [72]

Viemäriverkostoon päätyy niin lämmintä, kuin myös kylmää käyttövettä. Viemäriverkostot ovat tyypillisesti pitkiä, jonka seurauksena virtaus jäähtyy verkostossa ennen sen päätymistä jätevedenpuhdistamolle. Tyypillisesti jätevedenpuhdistamolla vesi on ulkolämpötilasta riippuen 10–20 °C. Kesällä jätevedenpuhdistamolla virtaava jätevesi on lämpimämpää pienempien viemäriverkostoon lämpöhäviöiden takia. [73] Jäteveden lämpötilan ollessa suurimmillaan, on siitä mahdollista poistaa enemmän lämpöä lämpöpumpulla. Tyypillisesti jätevedestä poistetaan 5–10 °C lämpöä. [22] Lämpötila, kuin myös virtauksen suuruus vaikuttavat talteen saatavaan lämpötehoon. Jätevedestä teoreettisesti hyödyksi saatava lämpöteho  $Q_{HL}$  (kW) voidaan selvittää yhtälön 13 mukaisesti. [74]

$$Q_{HL} = c V_{HL} \Delta T \quad (13)$$

, missä  $V_{HL}$  ( $\text{m}^3/\text{h}$ ) on jäteveden virtaama,  $c$  ( $\text{kWh}/\text{m}^3\text{K}$ ) veden ominaislämpökapasiteetti ja  $\Delta T$  (K) jäteveden lämpötilanmuutos.

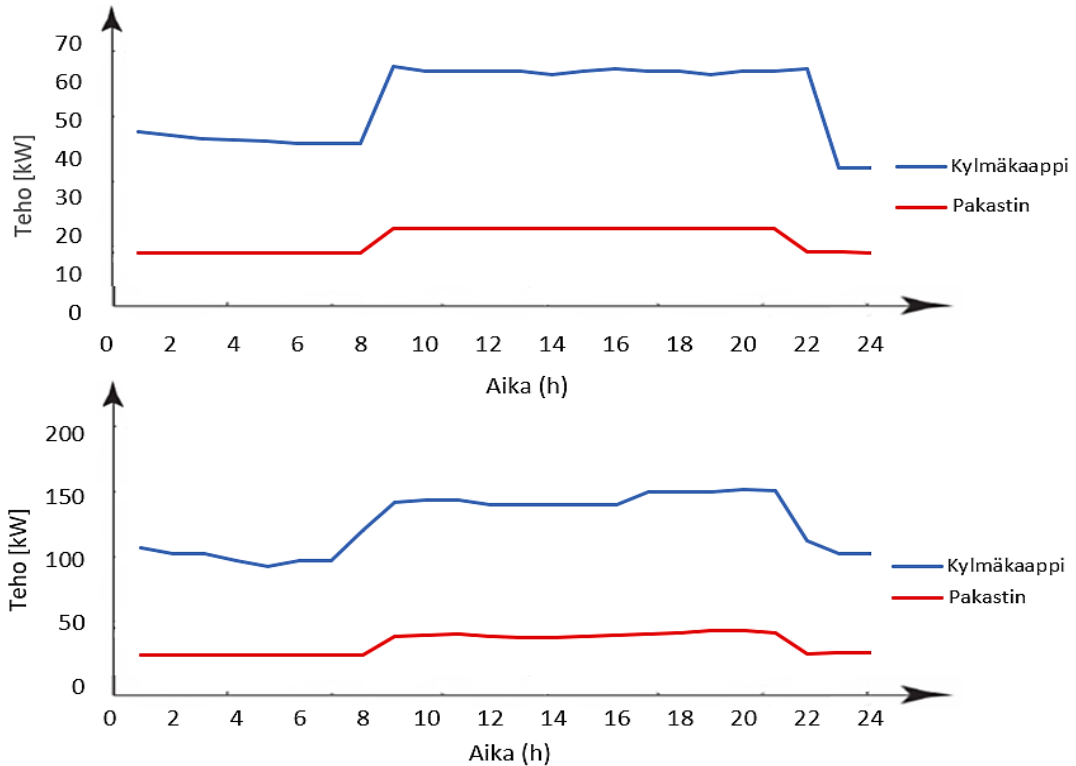
### 3.4 Päivittäistavarakauppa

Päivittäistavarakauppojen myynnistä noin 80 % on elintarvikkeita. [75] Suomessa elintarvikkeiden säilytyslämpötiloja säädellään elintarvikelakiin perustuvalla asetuksella, jonka perusteella kylmätuotteet tulee säilyttää vähintään  $+3\text{--}8\text{ }^\circ\text{C}$ , riippuen elintarvikkeesta. [76] Pakastettujen elintarvikkeiden säilyttämistä varten käytettävien tilojen tulee olla vähintään  $-18\text{ }^\circ\text{C}$  [77]. Kaupoissa hyödynnetään tyypillisesti sähkökäyttöisiä kompressoripohjaisia jäähdytyslaitteistoja kylmää tarvitsevien elintarvikkeiden kylmätilojen alhaisten lämpötilojen ylläpitämiseen. Suomessa päivittäistavarakauppojen kylmäjärjestelmät (kompressori, lauhtutin, puhaltimet ja valaistus ym.) kuluttavat koko kaupan kiinteistön sähkönkulutuksesta hypermarketeissa noin 28 %, supermarketeissa noin 44 % ja pienemmissä marketeissa noin 69 %. Keskimääräinen kokonaissähkönkulutus hypermarketeissa on noin 2280 MWh/vuosi, supermarketeissa noin 530 MWh/vuosi ja pienemmissä marketeissa noin 210 MWh/vuosi. [78]

Jäähdytykseen käytettävän sähkön sivutuotteena syntyy lämpöä. Kauppojen jäähdytyspiirissä kiertää jäähdytysnestettä, joka jäähdytetään jäähdytyskoneikossa sijaitsevalla höyrystimellä. Jäähdytyskoneikossa oleva nestemäinen kylmäaine höyrystyy sitoen jäähdytettävästä kohteesta itseensä lämpöä. Tämän jälkeen kylmäaine puristetaan korkeampaan paineeseen ja lämpötilaan, jonka seurauksena kylmäaine palautuu nesteeksi kylmäaineen kiehumispisteen ylittäessä lauhtuttimessa vallitsevan lämpötilan. Lauhtuessa kylmäainehöyry luovuttaa lämpöä ympäristöön. [79, s.83–84] Kylmäkoneen lauhtutuslämpö on tyypillisesti jakaantunut seuraavasti: tulistuslämpö on 10–20 %, lauhtutuslämpö on 80–90 % ja alijäähdytys on 0–5 % lauhtutuslämmöstä [80, s.211] Rakennuksen jäähdytyspiiristä jäähdytyskoneikon piiriin siirtynyt lämpö siirretään lauhtuttimella tyypillisesti ulkoilmaan hyödyntämättä [81]. Tämän jälkeen kylmäaine kulkee paisunta-venttiilin kautta takaisin höyrystimelle ja kiertoprosessi jatkuu [79, s.83–84].

Hukkalämmön suuruusluokka ja ajallinen vaihtelu riippuu kylmälaitteiden sähkönkulutuksesta, joka riippuu kylmätilojen jäähdytystarpeesta. Kauppojen kylmätilojen jäähdytystarve vaihtelee kaupan aukioloaikojen mukaan. [38] Kylmätilojen jäähdytystarve on tyypillisesti suurempi kaupan aukioloaikoina. Aukioloaikojen ulkopuolella myymälän kylmäkalusteissa käytetään energiankulutuksen pienentämiseksi verhoja. Lisäksi myymälän

lämpötilaa lasketaan usein kaupan kiinnioloaikoina. Energiatohokkuustoimenpiteiden lisäksi erilaiset lämpökuormat, kuten henkilöt ja valaistus, vähenevät. Näiden toimien seurauksena kauppojen kylmäntarve vähenee noin 30 %. Kylmälaitteiden energiantarpeeseen vaikuttaa myös ulkoilman lämpötila. Kylmälaitteen energiankulutus on suurempi kesäaikaan, suuremman viilennyksen tarpeen takia. [82] [83] Kuvassa 11 on esitetty keskikokoisen kaupan kylmälaitteiden lauhdutusteho talvella ja kesällä.



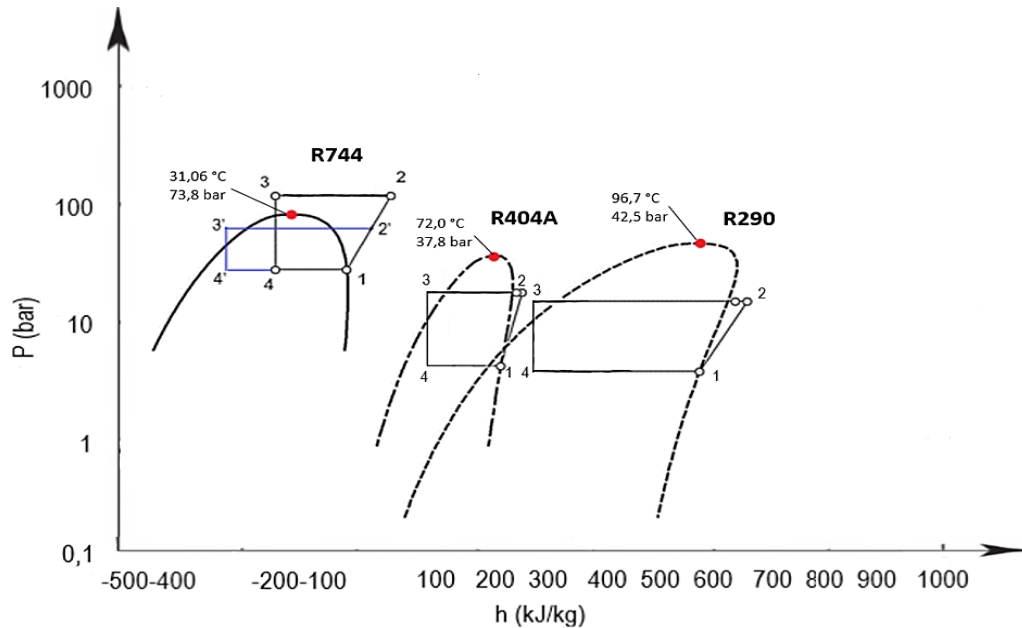
**Kuva 11** Keskikokoisen kaupan tyypillinen kylmälaitteiden teho talvi- (yllä) ja kesäpäivänä (alla) [83]

Kylmälaitteiden sähkönkulutus ja tehokkuus vaikuttavat syntyvään hukkalämpövirtaan. Sundellin [69] perusteella kaupan kylmälaitteista saatavaa hukkalämpöä  $E_{HL}$  (MWh) voidaan laskennallisesti arvioida kaupan kokonaissähkökulutuksen  $E_{tot}$  (MWh), kylmälaitteen kuluttaman sähkön osuuden  $k_{refr}$  ja kylmälaitteen lämpökertoimen, eli COP-arvon perusteella yhtälön 14 mukaisesti. Esimerkiksi nykyisten R744-järjestelmien COP-arvot vaihtelevat  $-10 - +25$  °C ulkolämpötiloissa 5,0–2,0 [84].

$$E_{HL} = E_{tot} k_{refr} COP \quad (14)$$

Hukkalämmön lämpötilataso riippuu ulkoilmalauhduttimen tapauksessa ulkolämpötilasta, ollen minimissään 5–10 °C tätä korkeampi [38]. Lämpötilaan vaikuttaa myös järjestelmässä käytetty jäähdytysaine. Kaupoissa kylmäaineena on käytetty pääasiassa kylmäainetta R404A [83]. Kuitenkin F-kaasuasetuksen vuoksi uusissa laitteissa kylmä-

aineena on tyypillisesti hiilidioksidi (R744) tai propaani (R290). [85] Kylmäaineiden termodynaamiset ominaisuudet vaihtelevat, vaikuttaen syntyvän lauhteen lämpötilaan. Kylmäaineen vaikutusta syntyvän lauhteen laatuun on havainnollistettu kuvassa 12.



**Kuva 12** Kylmäaineiden ideaalinen  $\log p, h$  -tilapiirros höyrystyslämpötilalla  $-10\text{ °C}$ . Puristuksen loppupaine vaikuttaa kylmäaineen loppulämpötilaan ja kompressorin sähkönkulutukseen [86] [87] [88]

R744 kylmäkoneella operoidaan ulkolämpötilasta riippuen kriittisen paineen ja lämpötilan alapuolella, eli alikriittisissä olosuhteissa, tai yläpuolella, eli transkriittisissä olosuhteissa. R744-järjestelmä toimii yleensä transkriittisesti ulkolämpötilan ollessa yli  $20\text{--}25\text{ °C}$ . [88] R744:llä tulistuksen osuus ja lämpötila ovat korkeammat kuin muilla jäähdytysaineilla. Alikriittisessä prosessissa kompressoitun kylmäaineen lämpötila voi olla jopa  $83\text{ °C}$ . Tulistuksen poiston jälkeen R744 lauhtuu alikriittisessä prosessissa noin  $20\text{ °C}$ :ssa ja alijäähdytys on tyypillisesti noin  $5\text{ °C}$ . Jos R744:llä operoidaan transkriittisissä olosuhteissa, on lauhtumislämpö tällöin kokonaan tulistumlämpöä. Transkriittisessä prosessissa kompressoitun kylmäaineen lämpötila voi olla jopa  $150\text{ °C}$ . [89, s.212–213] Kompressoitun kylmäaineen lämpötila riippuu ulkolämpötilasta, joka määrittelee tarvittavan puristussuhteen. Tyypillisesti kylmäaine jäähtyy noin  $120\text{ °C}$ :sta  $40\text{ °C}$ :een. R404A:lla ja R290:lla operoidaan kriittisen pisteen alapuolella. R404A ja R290 ovat kompressoitun jälkeen noin  $60\text{--}70\text{ °C}$  ja ne lauhtuvat tyypillisesti noin  $40\text{ °C}$ :ssa, jonka jälkeen alijäähdytys on tyypillisesti  $5\text{--}10\text{ °C}$ : [87]. Kylmäaineilla on kuitenkin myös mahdollista käyttää korkeampaa painesuhdetta, jolloin saavutetaan korkeampia lauhtumislämpötiloja, mutta tämä heikentää COP-arvoa.



### 3.5 Jäähalli

Jäähalli on jääurheilulajien harrastamiseen tarkoitettu katettu rakennelma. Jäähallin tehtävä on tarjota käyttäjille hyvät olosuhteet jääurheilun harrastamiseen. Jäähallin ideaalisten jääurheilu olosuhteiden ylläpitäminen vaatii jatkuvaa jään jäädyttämistä. [90] Jäänpinnan lämpötila on tyypillisesti  $-3 - 6$  °C [91]. Jääradan jäädyttäminen toteutetaan tyypillisesti jään alla sijaitsevalla kylmäliuosputkistolla. Jäärata voidaan jäädyttää välillisesti, jolloin jäädytyksessä kierrätetään kylmää rataliuosta (esim. glykolivesi), tai suoraohyrysteisesti, jolloin järjestelmässä kiertää kylmäaine. Kylmälaitteiden toiminta perustuu tyypillisesti kompressoripohjaiseen jäädytyslaitteistoon, jonka sähkön käytön sivutuotteena syntyy lauhdelämpöä. [90] Jokainen jäähalli ympäristöineen on erilainen, jonka takia halleja tulee tarkastella tapauskohtaisesti.

Hukkalämmön suuruusluokka ja ajallinen vaihtelu riippuu kylmälaitteiden sähkönkulutuksesta, joka riippuu jään jäädytyksen tarpeesta. Kylmälaitteiden kompressorin sähkönkulutus riippuu jäähallin koosta sekä tyypistä (kylmä/lämmin). [38] Tyypillisesti lämpimällä katsomolla varustettu jäähalli vaatii enemmän jäädytystä, kuin kylmä katsomollinen halli [91]. Ison jäähallin kokonaisenergiankulutus on keskimäärin 3342 MWh/vuosi, josta sähkön osuus on 64 % (~ 2138 MWh/vuosi). Kilpahallin kokonaisenergiankulutus on keskimäärin 1667 MWh/vuosi, josta sähkön osuus on 55 % (~ 917 MWh/vuosi). Pienhallien kokonaisenergiankulutus on keskimäärin 1250 MWh/vuosi, josta sähkön osuus on 65 % (~813 MWh/vuosi). [91] Jäädytysenergian lisäksi sähköä kuluu mm. valaistukseen, ilmanvaihdon puhaltimiin sekä ilman kuivatukseen. Jäähallien ostoenergiakulutuksen jakauman perusteella voidaan arvioida, että noin 60 % sähkön kokonaiskulutuksesta kuluu jäädytykseen. [92] Jäädytystarve on tyypillisesti melko vakio, mutta yleisötapahtumien yhteydessä jäädytystarve kasvaa, sillä tällöin jäähallin sisäinen lämpökuorma on suurempi, isomman ihmismäärän ja lämpimän (30–60 °C) jäänhoitoveden käytön seurauksena [38] [90]. On myös tyypillistä, että jäähallit ovat kesäaikaan suljettuja, jolloin ei ole jäädytystarvetta, tyypillisesti hallit ovat auki 240-360 pv/vuosi [38] [91].

Jäähallien kylmälaiteista saatavaa hukkalämpöä  $E_{HL}$  (MWh) voidaan arvioida jäähallin kokonaissähkönkulutuksen  $E_{tot}$  (MWh), kylmälaitteen kuluttaman sähkön osuuden  $k_{refr}$  ja kylmälaitteen COP-arvon perusteella yhtälön 15 mukaisesti [69].

$$E_{HL} = E_{tot} k_{refr} COP \quad (15)$$

Syntyvän hukkalämmön lämpötila riippuu ulkoilmalauhduttimen tapauksessa ulkolämpötilasta. Se seuraa ulkoilman lämpötilaa, ollen minimissään 5–10 °C tätä korkeampi. [38]

Lämpötilaan vaikuttaa myös järjestelmässä käytetty jäähdytysaine. Suomalaisissa jäähalleissa käytetään tyypillisesti R404A:ta, R717:ää (ammoniakki) sekä R744:ää [91] [93]. R717:n kriittinen piste on 113 bar ja 132,4 °C ja kylmäaineella operointi tapahtuu kriittisen pisteen alapuolella [94].

## 4. HUKKALÄMPÖJEN TEKNIS-TALOUDELLINEN HYÖDYNTÄMINEN

Olemassa olevat hyödyntämisteknologiat vaikuttavat siihen, mitkä hukkalämmöistä ovat hyödynnettävissä kaukolämpöjärjestelmässä. Hukkalämmön lämpötilatasosta riippuen lämmöntalteenotto ja hyödyntäminen tapahtuu suoraan lämmönvaihtimen avulla tai välillisesti hyödyntäen lämmön priimausta. Hukkalämpö on suoraan hyödynnettävissä kaukolämpöverkossa, mikäli sen lämpötila ylittää putkistossa virtaavan kaukolämpöveden lämpötilan. Muissa tapauksissa hukkalämmön hyödyntämiseen tarvitaan priimausta, joka toteutetaan tyypillisesti lämpöpumpulla. Hukkalämmön tarjonnan ja tarpeen ajoittamisen ollessa ristiriidassa, voidaan hyödyntää erilaisia lämmönvarastointiteknologioita. Lisäksi kaukolämpöliiketoiminta, eli taloudellisuus vaikuttaa hukkalämpöjen hyödyntämiseen, sillä lämmön hyödyntämisen ratkaisee viimekädessä taloudellinen kannattavuus.

Taloudelliseen kannattavuuteen vaikuttaa hukkalämpöjen hyödyntämisestä kaukolämpöyhtiölle aiheutuvat kiinteät- ja muuttuvat kustannukset, hukkalämpöjen käytön sivuuttamat polttoainekustannukset sekä, hukkalämmön korvatussa yhteistuotantoa, sähkönmyyntitappiot. Kustannusten muodostumiseen vaikuttavat hukkalämmön lämpötila, teho, ajoitus sekä sijainti, sillä näiden perusteella muodostuu hyödyntämisteknologian hankinnasta ja käytöstä sekä verkon rakentamisesta ja liitännästä aiheutuvat kustannukset. Nämä edelleen muodostavat arvon hukkalämmölle, sillä ne vaikuttavat siihen, kuinka paljon lämmöstä on taloudellisesti mahdollista maksaa. Kaukolämpöyhtiön maksama hinta ulkopuoliselle tuottajalle määritellään tyypillisesti energiahintana (€/MWh) ja se on kytköksissä kaukolämmön tuotannon kustannuksiin [9]. Investointi- ja käyttökustannukset kasvavat tyypillisesti sen mukaan, mitä matalalämpöisempää hukkalämpö on.

### 4.1 Lämmönvaihdin – tekniikka ja talous

Lämmön hyödyntäminen lämmönvaihtimen (LV) avulla on yksinkertaisin tapa hyödyntää hukkalämpöä. Lämmönvaihtimessa lämpöenergia siirtyy hukkalämmöstä kaukolämpövedeen. Yleensä lämmönsiirtoon osallistuvat fluidit on erotettu väliseinällä, joka toimii lämmönsiirtopintana. Lämmönvaihtimet jaotellaan virtaustavan mukaan tyypillisesti, myötävirta- ja vastavirtalämmönsiirtimiin. [95] Suomessa kaukolämpöjärjestelmissä käytettävät lämmönvaihtimet ovat usein vastavirtasiirtimiä, eli fluidit virtaavat lämmönvaihtimessa eri suuntiin [21]. Lämmönsiirtimen valintaan ja mitoittamiseen vaikuttavat lämpö-

teho ja lämpötilan muutos. Lämmönvaihtimen lämpöteho  $Q_{LV}$  (W) on riippuvainen lämmönvaihtimen lämmönsiirtopinta-alasta  $A_{LV}$  (m<sup>2</sup>), fluidien logaritmisesta lämpötilaerosta  $\Delta T_{ln}$  (K) sekä lämmönsiirtymistä kuvaavasta lämmönvaihtimen kokonaislämmönsiirtokertoimisesta  $U$  (Wm<sup>-2</sup>K<sup>-1</sup>), yhtälön 16 mukaisesti.

$$Q_{LV} = UA_{LV}\Delta T_{ln} \quad (16)$$

Vastavirtalämmönvaihtimelle  $\Delta T_{ln}$  voidaan esittää seuraavasti:

$$\Delta T_{ln} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} \quad (17)$$

, missä  $\Delta T_1$  on fluidien välinen lämpötilaero lämmönvaihtimen alkuosassa ja  $\Delta T_2$  on fluidien välinen lämpötilaero lämmönvaihtimen loppuosassa. [95]

Lämmön hyödyntämisestä lämmönvaihtimen avulla syntyy kiinteitä ja muuttuvia kustannuksia. Merkittävin kiinteä kustannus on investointikustannus. Investointikustannukset riippuvat monesta eri tekijästä. Lämmönvaihtimella investointikustannukset kasvavat lämmönsiirtopinta-alan kasvaessa. Tarvittava lämmönsiirtopinta-ala kasvaa, kun virtausten välinen lämpötilaero pienenee. Lisäksi mm. fluidit vaikuttavat lämmönsiirtokertoimeen ja edelleen lämmönsiirtopinta-alaan. Lämmönvaihtimen tyyppi riippuu sovelluskohteesta. Tarkkaa investointikustannusta suhteessa lämpötehoon tai lämmönvaihtimen pinta-alaan on vaikeaa arvioida. Bühler et al. [47] sekä Ommen et al. [96] mukaan levylämmönvaihtimien investointikustannuksia  $I_{LV}$  (€) voidaan arvioida kapasiteettiekspONENTTIMENETELMÄLLÄ alle 80 m<sup>2</sup> lämmönvaihtimelle seuraavasti:

$$I_{LV} = 780,66 A_{LV}^{0,8} \quad (18)$$

Ja yli 80 m<sup>2</sup> vaihtimelle Bühler et al. [47] ja Andreasen et al. [97] mukaan seuraavasti:

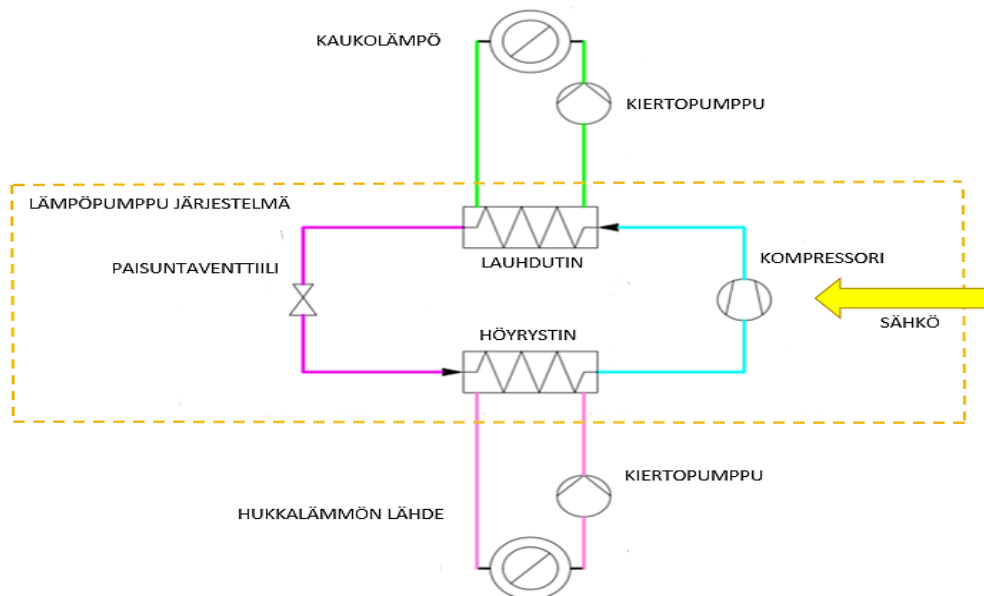
$$I_{LV} = 2776,18 A_{LV}^{0,68} \quad (19)$$

, kun oletetaan että 1 USD on 0,98 EUR.

Suoralla siirrolla hukkalämpöjen hyödyntämisestä muuttuvia kustannuksia syntyy pääosin vain muuttuvista huolto- ja kunnossapitokustannuksista ja pienemmissä määrin kiertopumpun kuluttamasta sähköstä. Muuttuvien huolto- ja kunnossapitokustannusten voidaan arvioida olevan ~ 5000 € MW<sup>-1</sup> vuosi<sup>-1</sup> [47]. Lund et al. mukaan pumppaus kuluttaa sähköä noin 6 kWh<sub>el</sub>/MWh<sub>th</sub> [19]. Sähkön käytön synnyttämät muuttuvat kustannukset ovat melko pienet koko kaukolämpöjärjestelmän tasolla, eikä sähkön markkinahinta vaikuta merkittävästi lämmönvaihtimella hyödynnettävään hukkalämpöön.

## 4.2 Lämpöpumppu – tekniikka ja talous

Lämpöpumppujen (LP) avulla voidaan hyödyntää matalalämpöisiä hukkalämpöjä. Lämpöpumppujen perusidea on siirtää lämpöä matalasta lämpötilasta korkeampaan lämpötilaan. [98] Yleisin lämpöpumpputyyppi on suljettuun kiertoon perustuva mekaaninen lämpöpumppu, joissa kiertävän kylmäaineen avulla saadaan lämpötila nostettua ulkoista työtä (sähköä) käyttäen sellaiselle tasolle, että lämpöenergiaa voidaan hyödyntää kaukolämpöverkossa. Kylmäaineena käytetään kylmäkoneikoiden tapaan mm. hiilidioksidia ja ammoniakkaa. [99] [18] Kuvassa 13 on esitetty miten mekaanisen lämpöpumpun avulla saadaan hukkalämpöä hyödynnettyä kaukolämpöverkossa. Mekaanisissa lämpöpumpuissa kylmäaineen painetta säädetään siten, että se höyrystyy matalassa paineessa sitoen lämpöä hukkalämmön lähteestä ja lauhtuu takaisin nesteeksi korkeammassa paineessa luovuttaen lämpöä kaukolämpöveeten. Tämän jälkeen kylmäaine kulkee paisuntaventtiin kautta takaisin höyrystimelle ja kiertoprosessi jatkuu. [99]



**Kuva 13** Hukkalämpöjen hyödyntäminen mekaanisen lämpöpumpun avulla [99]

Lämpöpumppujen suorituskyky määritetään COP-arvon (coefficient of performance) eli lämpökertoimen avulla. COP kertoo, kuinka moninkertaisesti lämpöpumpusta saadaan lämpöä suhteessa sen kuluttamaan sähköenergian määrään. Arvoon vaikuttaa käytetty lämpöpumppuprosessi, lämmönlähteen lämpötila sekä se, miten paljon lämpötilaa nostetaan lämpöpumpulla. Mitä pienempi lämpötilaero on lämmönlähteen ja lämpönielun välillä, sitä parempi COP saavutetaan. Ideaalisessa tilanteessa COP-arvo voidaan määrittellä prosessista poistetun lämmön lämpötilan  $T_H$  (K) ja prosessiin tuodun lämmön lämpötilan  $T_C$  (K) avulla yhtälön 20 mukaisesti. Mekaanisilla lämpöpumpuilla todelliset COP-arvot ovat tyypillisesti noin 65–75 % ideaalisesta. [18] [99]

$$COP = \frac{T_H}{T_H - T_C} \quad (20)$$

Lämmön hyödyntämisestä lämpöpumpun avulla syntyy kiinteitä ja muuttuvia kustannuksia. Merkittävimpiä kiinteitä kustannuksia ovat investointikustannukset sekä kiinteät huolto- ja kunnossapitokustannukset. Lämpöpumpuinvestoinneille on haastavaa antaa investointikustannusten yleispäteviä suuruuksia, koska ratkaisut ovat tapauskohtaisia. Lämpöpumpujen investointikustannuksiin vaikuttavat mm. lämpöpumpujärjestelmän teho sekä järjestelmässä käytettävät väliaineet. Tyypillisesti lämpöpumpun investointikustannus vaihtelee noin 400–1500 €/kW. [100]

Bühler et al. [47] perusteella lämpöpumpun investoinnin suuruutta  $I_{LP}$  (€/kW) voidaan alle 1,5 MW<sub>th</sub> lämpötehon  $Q_{LP}$  (kW) omaavalle lämpöpumpulle, lämpöpumpputyypistä riippumatta, arvioida kapasiteettiekspONENTTImenetelmällä seuraavasti:

$$I_{LP} = 1716 Q_{LP}^{-0,12} \quad (21)$$

Ja yli 1,5 MW<sub>th</sub> tehoiselle lämpöpumpulle seuraavan yhtälön perusteella:

$$I_{LP} = 8493 Q_{LP}^{-0,33} \quad (22)$$

Pieper et al. [100] mukaan lämpöpumpun investoinnin suuruutta voidaan myös arvioida spesifimmin lämpöpumppujärjestelmässä käytettävän lämmönlähteen perusteella tehtyjen sovitteiden perusteella. Tyypillisesti voidaan arvioidaan, että kiinteät huolto- ja kunnossapito kustannukset per vuosi ovat noin 1 %:n hankinnan hinnasta [101] tai noin 2 € MWh<sup>-1</sup> vuosi<sup>-1</sup> [47]. Lämpöpumppujen tekninen käyttöikä on tyypillisesti noin 20 vuotta [101]. Lämpöpumpun käytössä syntyy muuttuvia käyttökustannuksia pääosin muuttuvista huolto- ja kunnossapitokustannuksista, sekä lämpöpumpun kompressorin sähkönkulutuksesta. Muuttuvat huolto ja kunnossapitokustannukset ovat tyypillisesti noin 2000 € MW<sup>-1</sup> vuosi<sup>-1</sup> [47]. Lisäksi muuttuvia kustannuksia aiheuttaa kiertopumpun sähkönkulutus (~ 6 kWh<sub>el</sub>/MWh<sub>th</sub>) [19]. COP-arvon ja hyödyksi saatavan lämpövirran  $O_{ulos}$  (W) avulla saadaan selvitettyä kompressorin teho  $W_{komp}$  (W) yhtälön 23 mukaisesti.

$$W_{komp} = \frac{Q_{ulos}}{COP} \quad (23)$$

Edelleen  $O_{ulos}$  saadaan selvitettyä lämpöpumpun höyrystimeen menevän lämpövirran,  $Q_{sisään}$  ja  $W_{komp}$  avulla yhtälön 24 mukaisesti. [102]

$$O_{ulos} = Q_{sisään} + W_{komp} \quad (24)$$

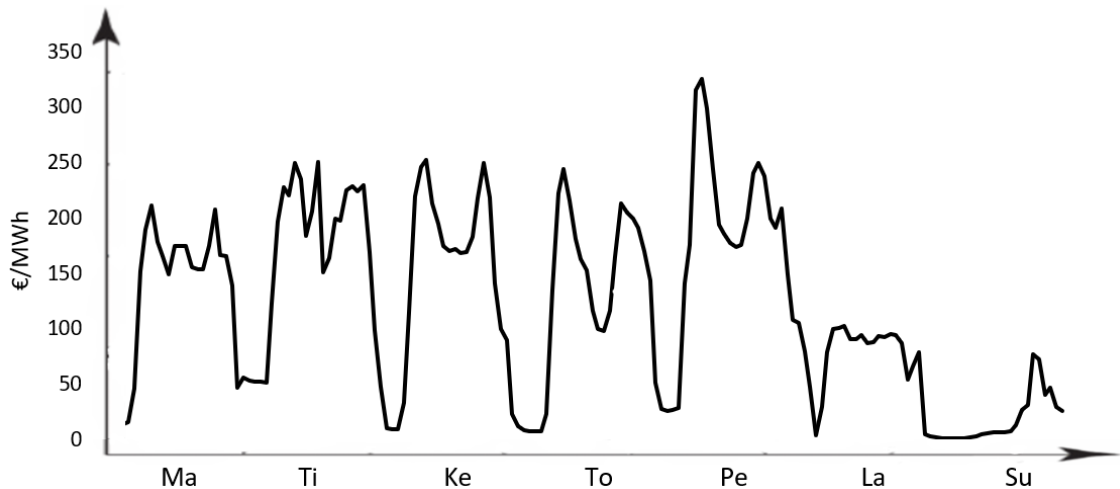
Yhtälöiden 23 ja 24 perusteella  $W_{komp}$  saadaan ratkaistua seuraavasti:

$$W_{komp} = \frac{Q_{sisään}}{COP - 1} \quad (25)$$

Sähkön hinta muodostuu sähköenergiasta  $H_{sähköenergia}$  (€/MWh), sähkön siirrosta  $H_{siirto}$  (€/MWh) sekä sähköverosta  $H_{sähkövero}$  (€/MWh). Sähkön kokonaishinta voidaan siis esittää seuraavasti:

$$H_{sähkö} = H_{sähköenergia} + H_{siirto} + H_{sähkövero} \quad (26)$$

Sähköenergian hintaan vaikuttaa erityisesti hetkellinen sähkön markkinahinta. Sähkön hinta vaihtelee tuntikohtaisesti. Tyypillisesti sähkön hinta on talvisin korkeampi kuin kesällä. Lisäksi tyypillisesti öisin sähkön kysyntä on matalampaa kuin päivällä, jonka seurauksena sähkön hinta on yöaikaan alaisempi kuin päivällä. Kuvassa 14 on havainnollistettu sähkön hinnan tuntivaihtelua. Vuonna 2021 sähkön keskihinta oli 72 €/MWh [103].



**Kuva 14** Sähkön Nord Pool spot -sähköpörssin hintojen tuntivaihtelu yhden viikon ajalta vuonna 2021 [103]

Sähkön siirron kustannukset riippuvat sijainnista sekä kuluttajatyypistä. Vuonna 2021 0,5–2,5 MW tehontarpeen tyypikäyttäjillä sähkön siirtohintana oli keskimäärin noin 26 €/MWh (sis. alv. 24 %). [104] Kaukolämpöverkkoon lämpöä tuottavat, yli 500 kW<sub>th</sub>, lämpöpumput ovat oikeutettuja alemman veroluokan II sähköveroon, joka on 0,781 €/MWh (sis. alv. 24 %) vuoden 2022 verotietojen perusteella [28] [105].

### 4.3 Kausilämpövarasto – tekniikka ja talous

Mikäli hukkalämmön tarjonnan ja kysynnän ajoittuminen ovat ristiriidassa, voidaan hyödyntää erilaisia lämmönvarastointiratkaisuita, joiden avulla saadaan lisättyä lämmön hyödynnettävyyttä. Lämpövarasto (TES, thermal energy storage) voi olla lyhyt- tai pitkä-

aikainen. Lyhytaikaisessa varastossa varastointiaika on tunneista päiviin. Pitkäaikaisvarastoinnissa (i.e. kausivarastointi) varastointiaika voi olla viikoista kuukausiin. Lyhytaikaiset varastot ovat tyypillisesti maanpäällisiä lämpövarastoja, kun taas pitkäaikaisvarastot maanalaisia. [106] [107] Lyhyt- ja pitkäaikaisen päätoimintaperiaate on sama, mutta tietyt ominaisuudet vaihtelevat. Lämpöenergian varastointitekniikat voidaan jakaa tuntuvaan lämpövarastoon, latenttiin lämpövarastoon ja termokemialliseen lämpövarastoon. [107] Lämpöenergian varastointi kaukolämpöjärjestelmissä perustuu tyypillisesti tuntuvaan lämpöön. Tuntuvaan lämpövarastossa lämpöenergian varastointi perustuu varastoväliaineen ominaislämpökapasiteettiin. Väliaineena käytetään tyypillisesti vettä, sillä veden lämpökapasiteettiominaisuudet ovat suotuisat. Varastoinnin tärkeimpiä ominaisuuksia ovat varastokapasiteetti, lataus- ja purkuteho, varastoitava aika, sekä varastoinnin lämpötila. [106] [107]

Kausilämpövaraston (STES, seasonal thermal energy storage) avulla lämpöenergiaa voidaan varastoida esimerkiksi kesältä talvelle. Kausivarasto mahdollistaa erityisesti aika- ja kausiluoteisten hukkalämpöjen laajamittaisen hyödyntämisen, sillä kaukolämmön kysyntä- ja kulutusvaihtelusta (vrt. kuva 1) johtuen, ei kaikki muodostuva hukkalämpö välttämättä ole muuten hyödynnettävissä. [108] [109] Varastoimalla lämpöä myöhempään käyttöön, kun kysyntä on suuri, voidaan välttää huippukapasiteetin tarve kokonaan [22, s.13]. Yleisiä kaukolämpöjärjestelmässä hyödynnettäviä, tuntuvaan lämpöön perustuvia, kausivarastointityyppejä ovat: säiliölämpövarasto (TTES, Tank Thermal Energy Storage) kaivantovarasto (PTES, Pit Thermal Energy Storage), kallioluolavarasto (CTES, Cavern Thermal Energy Storage), pohjavesivarasto (ATES, Aquifer Thermal Energy Storage) sekä porakaivovarasto (BTES, Borehole Thermal Energy Storage). [107] [110] Varastojen energianvarastointikapasiteetti vaihtelee tyyppin mukaan, esimerkiksi TTES:llä ominainen varastointikyky tilavuutta kohden on 60–80 kWh/m<sup>3</sup>, PTES:llä 60-80 kWh/m<sup>3</sup> ja ATES:lla 30–40 kWh/m<sup>3</sup> [111].

Varaston koko  $V_{TES}$  (m<sup>3</sup>) määräytyy useiden parametrien perusteella. Viime kädessä kyse on taloudellisesta arvioinnista, jossa tulee analysoida mm. varastoitavana olevan ylituotannon osuus ja tulevaisuuden kysyntä/tarjontaprofiilit. Kausivarasto voidaan suunnitella esimerkiksi suuriksi eristetyiksi altaaksi, joissa veden syvyys on noin 10–15 m. [22, s.161] Lämpövaraston merkittävin kustannus on investointikustannus. Investointikustannukseen vaikuttaa mm. varaston tilavuus, varastointiaika, lämpötila ja purkuteho. [107] Kiinteät vuosittaiset huolto- ja kunnossapitokustannukset ovat Kiviluoma et al. [112] mukaan noin 0,04 €/kW/vuosi ja Bühler et al. [47] perusteella noin 0,7 % hankinnan hinnasta. Lämpövaraston tekninen käyttöikä on noin 45 vuotta [22]. Investointikustannukset



vaihtelevat varaston tyypistä riippuen 20–100 €/m<sup>3</sup> [106] [111] tai 0,1–10 €/kWh [107] [113].

Bühler et al. [47] perusteella alle 150 m<sup>3</sup> lämpövaraston investointikustannuksia  $H_{TES}$  (€) voidaan arvioida myös kapasiteettiekspONENTTI menetelmällä seuraavasti:

$$H_{TES} = 2238,72 V_{TES}^{0,65} \quad (27)$$

Alle 5000 m<sup>3</sup> lämpövaraston investointikustannuksia seuraavasti:

$$H_{TES} = 3634,51 V_{TES}^{0,55} \quad (28)$$

Ja yli 5000 m<sup>3</sup> lämpövaraston investointikustannuksia seuraavasti:

$$H_{TES} = 950,94 V_{TES}^{0,70} \quad (29)$$

Tyypillisin ratkaisu investointien jakamiseen on, että lämmön myyjä investoi vaadittaviin lämmöntalteenotto laitteistoihin ja liityntöihin. Kaukolämpöyhtiö investoi tyypillisesti verkkoon, eli tarvittaviin verkon rakennusinvestointeihin. [114] [98] Kuitenkin myös erilaisia investointien jakoperiaatteita voi olla. Sopimus ja hinnoittelu voivat vaihdella sen mukaan, kumpi on investoinut mihinkin. Esimerkiksi tehohinnoittelua (i.e. perusmaksu) yhdistettynä energiahinnoitteluun voidaan käyttää, mikäli kaukolämpöyhtiö investoi asiakaspäässä myös lämmön talteenottoon. Jos kaukolämpöyhtiö on pelkästään investoiva osapuoli, voidaan hinnoittelussa ottaa se huomioon esim. veloittamalla vuokraa laitteistosta. [98] Mikäli myös lämmön myyjä osallistuu investointeihin, tulisi hinnan muodostumisen mekanismin oltava tiedossa, kuin myös hinnan vaihteluväli suuntaa antavasti [9].

Bühler et al. [47] perusteella hukkalämmön ominaiskustannus  $H_{HL,ominaiskust.}$  (€/MWh) voidaan selvittää annuiteettitekijän  $c_{n/i}$ , investointikustannuksien  $I$  (€) sekä vuosittaisten kiinteiden  $H_{kikku}$  (€/a) ja muuttuvien  $H_{muku}$  (€/a) kustannusten, hyödyntämisteknologian pitoajan  $n$  (a) ja energiamäärän  $E_{HL}$  (MWh/a) avulla seuraavasti:

$$H_{HL,ominaiskust.} = \left( c_{n/i} I + \frac{\sum_n H_{muku} + H_{kikku}}{n} \right) \frac{1}{E_{HL}} \quad (30)$$

missä  $c_{n/i}$  voidaan esittää pitoajan  $n$  ja laskentakorkokannan  $i$  avulla seuraavasti:

$$c_{n/i} = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (31)$$

Yhtälöiden 30 ja 31 perusteella voidaan selvittää hukkalämmön käytöstä syntyvät yksikkökustannukset verkkoon syötettävää energiamäärää kohden.

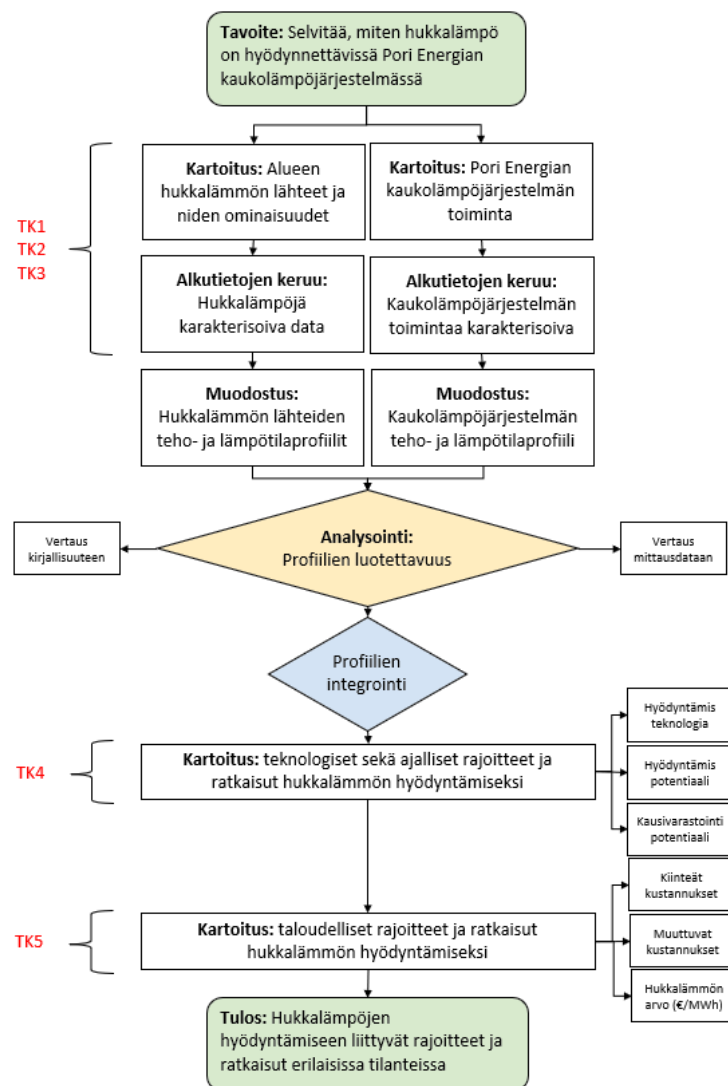
## 5. AINEISTO JA MENETELMÄT

Työn tarkoitus on luoda Pori Energialle esitietovalmiudet, joiden avulla voidaan lähteä kehittämään hukkalämpöjen hyödyntämistä runkoverkossa taloudellisin perustein. Luvussa luodaan pohja menetelmälle, jonka avulla voidaan määrittellä erilaisten hukkalämpöjen hyödynnettävyys kaukolämpöjärjestelmässä. Työssä luodaan laskentatyökalu, joka luo ulkolämpötiladatan perusteella tuntitason tehoprofiilin tarkasteltavalle kaukolämpöjärjestelmälle sekä hukkalämmön lähteiden ominaisten piirteiden perusteella tuntitason tehoprofiilin erilaisille hukkalämmön lähteille. Lisäksi luodaan lämpötilaprofiilit. Muodostettujen teho- ja lämpötilaprofiilien avulla selvitetään erilaisten hukkalämpöjen ajallinen, sekä taloudellinen hyödynnettävyys kaukolämpöjärjestelmässä. Lisäksi tarkastellaan kausilämpövarastointiratkaisun vaikutusta hukkalämpöjen hyödyntämispotentiaaliin. Menetelmä luo perustan sille, miten määrittellä hyödynnettävän hukkalämmön määrä (MWh) ja arvo (€/MWh) kaukolämpöjärjestelmässä eri ajanhetkinä. Menetelmän tarkoitus on luoda laskentatyökalu, jonka avulla voidaan nyt ja myös tulevaisuudessa arvioida mahdollisimman yleispätevästi hukkalämpöjen hyödyntämistä Pori Energian kaukolämpöjärjestelmässä. Näin ollen, vaikka mittausdataa olisi saatavilla aiemmilta vuosilta, ei menetelmässä hyödynnetä suoraan sitä, vaan luodaan laskentamalli, jonka avulla voidaan mallintaa kaukolämpöjärjestelmän ja hukkalämmön lähteiden ajallista käyttäytymistä. Näin laskentamallin pohjalle muodostuvan laskentatyökalun avulla voidaan esimerkiksi ulkolämpötilaennusteen avulla arvioida tulevan päivän tai viikon hukkalämmön hyödyntämispotentiaalia kaukolämpöjärjestelmässä.

Ensin luvussa 5.1 esitellään tutkimuksen rakenne, eteneminen ja työn tärkeimmät komponentit. Tämän jälkeen luvussa 5.2 esitellään tarkasteltava kaukolämpöjärjestelmä ja profiloinnin alkuarvot, eli tarkasteltavaa kaukolämpöjärjestelmää karakterisoiva data. Lisäksi esitetään kaukolämpöjärjestelmän mallintamiseen liittyvä menetelmä ja laskentatyökalun rakentamiseen liittyvät vaiheet yksityiskohtaisemmin. Tämän jälkeen luvussa 5.3 esitellään tarkasteltavien hukkalämpökohteiden ominaispiirteet ja profiloinnissa käytettävät alkuarvot, eli tarkasteltavia hukkalämmön lähteitä karakterisoiva data. Lisäksi käsitellään erilaisten hukkalämmön lähteiden mallintamisen liittyvät menetelmät ja laskentatyökalun rakentamiseen liittyvät vaiheet yksityiskohtaisemmin. Viimeiseksi luvussa 5.4 esitetään, miten työssä selvitetään hukkalämmön hyödynnettävyys tarkasteltavassa kaukolämpöjärjestelmässä.

## 5.1 Tutkimuksen rakenne

Ensin työssä tutustutaan tarkasteltavan kaukolämpöjärjestelmän ominaispiirteisiin ja analysoidaan tärkeimmät kaukolämpöjärjestelmän ajallista toimintaa kuvaavat parametrit, joita hyödynnetään profiilin luomisessa. Lisäksi tutustutaan kaukolämpöverkon ympäristöön ja analysoidaan, missä kohteissa voisi muodostua hukkalämpöä ja millaista se olisi ominaisuuksiltaan. Tehdyn kartoituksen perusteella tutustutaan vastaaviin hukkalämpökohteisiin kirjallisuuden avulla ja analysoidaan hukkalämpökohteiden tyypilliset parametrit, jotka vaikuttavat ajallisesti kohteessa syntyvään hukkalämpövirtaan. Valittujen parametrien perusteella luodaan profiilit tarkasteltaville hukkalämpökohteille. Profiilien luonti suoritetaan Microsoft Excel -laskentataulukko-ohjelmiston avulla. Profiilien luonti suoritetaan niin, että tuloksia pystytään analysoimaan sekä tunti-, että kuukausitasolla. Työn rakennetta ja etenemistä on havainnollistettu kuvassa 15. Lisäksi kuvasta näkee, missä vaiheissa tutkimusta vastataan määritelyihin tutkimuskysymyksiin (TK).



Kuva 15 Tutkimuksen rakenne ja eteneminen

Kaukolämpöjärjestelmän profiilin luonti perustuu lämmön kysynnän ja -kulutuksen, lämmöntuotannon sekä lämmönsiirron mallintamiseen. Teoriaosuuden ja tarkasteltavan kaukolämpöjärjestelmän ominaispiirteiden perusteella luodaan menetelmä kaukolämpöjärjestelmän toiminnan mallintamiselle. Profiilin avulla saadaan selville kaukolämpöjärjestelmän asettamat vaatimukset hukkalämpökohteille ja nähdään, milloin ja millaisten ratkaisuiden avulla kaukolämpöjärjestelmässä on mahdollista hyödyntää hukkalämpöä. Hukkalämpökohteiden profiilien luonti perustuu hukkalämmön lähteen karakterisointiin. Hukkalämmön lähteiden tyypilliset ominaisuudet selvitetään. Hukkalämpökohteiden hukkalämpövirran lämpötilataso, suuruusluokka sekä tyypillinen ajallinen vaihtelu ja lämpövirran pysyvyys selvitetään tapauskohtaisesti teorian perusteella. Ominaisuuksien perusteella luodaan tuntitason profiili hukkalämmön muodostumisesta.

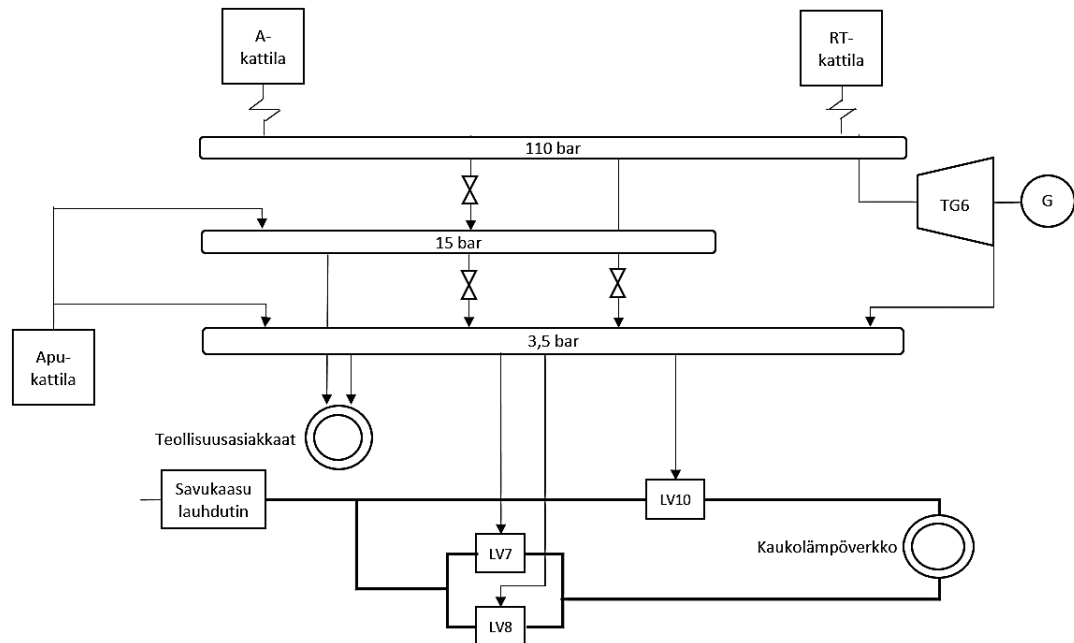
Profiilien luomisen jälkeen erilaiset hukkalämpöprofiilit integroidaan kaukolämpöjärjestelmän profiiliin. Vertaamalla kaukolämpöjärjestelmän ja hukkalämpökohteiden profiilia muodostetaan hukkalämmön hyödyntämiseen liittyvät rajoitteet ja ratkaisut. Profiileita vertaamalla valitaan hyödyntämisteknologia sekä tarkastetaan hyödynnettävissä oleva hukkalämpö ja varastointikapasiteetin tarve. Lisäksi hukkalämmön hyödyntämisestä syntyvät kustannukset selvitetään. Valitun teknologian kiinteät- ja muuttuvat kustannukset, sekä kaukolämpöverkkoon kohdistuvat kustannukset selvitetään. Muodostuneet kustannukset antavat arviota perusmaksukomponentin (i.e. tehomaksu) suuruudesta. Lisäksi arvioidaan (€/MWh) hukkalämpö kaukolämpöjärjestelmässä ulkolämpötilan funktiona. Kaukolämpöjärjestelmän hetkelliset energiantuotantokustannukset määrittävät pohja-arvon hukkalämmölle ja arvoa muokataan hukkalämmön hyödyntämisestä kaukolämpöyhtiölle aiheutuvien sähkön myyntitappioiden perusteella. Muodostunut arvo määrittelee hukkalämmöstä hetkellisesti hukkalämmön tuottajalle maksettavan hinnan.

## **5.2 Kaukolämpöjärjestelmän mallintaminen**

### **5.2.1 Tarkastelun kohteena oleva kaukolämpöjärjestelmä**

Tarkasteltavan kaukolämpöjärjestelmän kaukolämpö tuotetaan kahdella CHP-laitoksella sekä tarvittaessa erillistuotannolla lämpökeskuksilla. Tarkasteltavaan kaukolämpöverkkoon on kytketty neljä kevyellä polttoöljyllä (POK) toimivaa lämpökeskusta. CHP-laitoksissa tuotetaan kaukolämmön ja sähkön lisäksi prosessihöyryä voimalaitosten läheisyydessä olevan teollisuuden tarpeisiin. Lisäksi tarkasteltavassa kaukolämpöverkossa on välipumppaamo, jonka kautta kaukolämpöä siirretään Ulvilan kaukolämpöverkkoon. Keskustan tuntumassa, Aittaluodon teollisuusalueella, sijaitsevassa voimalaitoksessa

kiinteän polttoaineen leijupetikattila (A-kattila) ja turbiini (TG6) muodostavat yhteistuotannon päälaitteiston. A-kattila tuottaa pääosan vuosittaisesta tuorehöyryenergiasta ja toimii kaukolämpöjärjestelmän pääenergianlähteenä. Lisäksi A-kattilassa hyödynnetään savukaasulauhdutinta (SKL), jonka avulla savukaasujen sisältämä lämpö saadaan hyödynnettyä kaukolämmön tuotannossa. Voimalaitosta on havainnollistettu kuvassa 16.



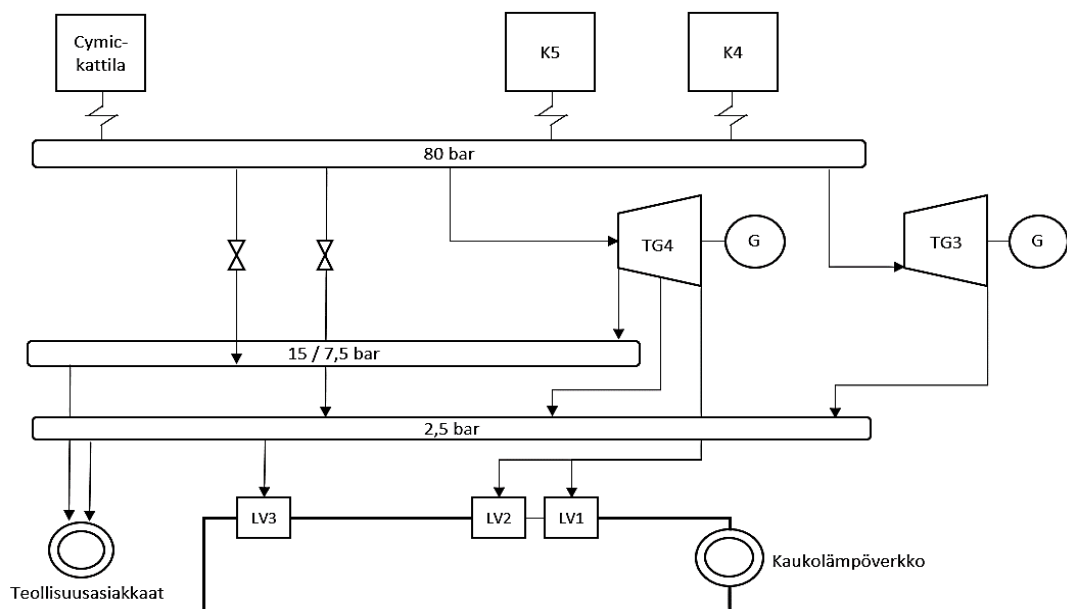
**Kuva 16** Kaukolämpöjärjestelmän ensisijaisen päätuotantolaitoksen prosessikaavio.

A-kattilan polttoaineena käytetään pääasiallisesti puuperäisiä polttoaineita (metsähake / teollisuuden puutähte). Perinteisesti kesäkuukausina lämmön tuotanto pystytään toteuttamaan kokonaisuudessaan teollisuuden puutähteen avulla, kun taas talvikuukausina hyödynnetään lisäksi myös suurissa määrin metsähaketta. Kevyttä polttoöljyä käytetään tyypillisesti käynnistys- ja tukipolttoaineena. A-kattilan lisäksi voimalaitoksella on käytössä toinen leijupetikattila (RT-kattila) ja kevyellä polttoöljyllä toimiva apukattila. Kattilat mahdollistavat höyryntuotannon A-kattilan vikatilanteissa ja revisioissa. RT-kattilaa hyödynnetään pääosin vain A-kattilan ollessa revisiossa. Apukattilaa käytetään myös talvisin huippukuorman tuottajana. Taulukossa 4 on esitetty voimalaitoksen tuotantolaitteistoiden pääparametreja. Laitoksen rakennusaste on noin 0,2 ja toimitushyötysuhde, eli hetkellisen nettohöyryn suhde toimitettuihin tuotteisiin, on noin 90 % laitoksen mitausdatan perusteella.

**Taulukko 4** Voimalaitoksen tuotantolaitteistoiden kattilahiötösuhteet ( $\eta_k$ ), nimellistehot ( $\phi_{max}$ ), minimitehot ( $\phi_{min}$ ), sekä kattiloissa hyödynnettävät polttoaineet

Lämmönlähde	Polttoaine	$\eta_k$	$\phi_{max}$ (MW <sub>th</sub> )	$\phi_{min}$ (MW <sub>th</sub> )
A-kattila	Puu	0,90	80	20
Savukaasulauhdutin	-	-	20	-
RT-kattila	Puu	0,85	86	46
Apukattila	Kevyt polttoöljy	0,93	46	6

Toinen CHP-laitos sijaitsee noin 16 km päässä keskustasta, Kaanaan teollisuusalueella. Voimalaitoksen yhteistuotannon päälaitteet muodostaa kiertopetikattila (Cymic-kattila) ja turbiini (TG4). Kattilassa hyödynnetään polttoaineena puuta, turvetta ja kierrätyspolttoainetta (REF, Recovered Fuel). Kattilan polttoainejakauma vaihtelee hetkellisesti ja on tyypillisesti kesäkuukausina hieman erilainen, kuin talvikuukausina. Kuitenkin pääsääntöisesti noin 70 % hyödynnettävästä polttoaineesta on metsähaketta tai teollisuuden puutähdettä, 15 % turvetta ja 15 % kierrätyspolttoainetta. Lisäksi voimalaitoksella on lisäkäytössä oleva turbiini (TG3), maakaasukattila (K5) sekä öljykattila (K4). Kuvassa 17 on esitetty voimalaitoksen yksinkertaistettu prosessikaavio.



**Kuva 17** Kaukolämpöjärjestelmän toisen päätuotantolaitoksen prosessikaavio

Cymic-kattilalla tuotetaan tyypillisesti kaukolämpöverkkoon se kapasiteetti, joka vielä A-kattilan ja savukaasulauhduttimen tuotantokapasiteetin jälkeen tarvitaan kattamaan kaukolämmön tarve. Voimalaitokselta kaukolämmön maksimisiirtokapasiteetti  $P_{max,siirto}$

(MW) on noin 110 MW. Laitoksen rakennusaste on noin 0,3 ja toimitushyötysuhde, eli hetkellisen nettöhöyryn suhde toimitettuihin tuotteisiin, noin 90 % voimalaitoksen mittausdatan perusteella. Voimalaitoksen kattiloiden pääarvot on esitetty taulukossa 5.

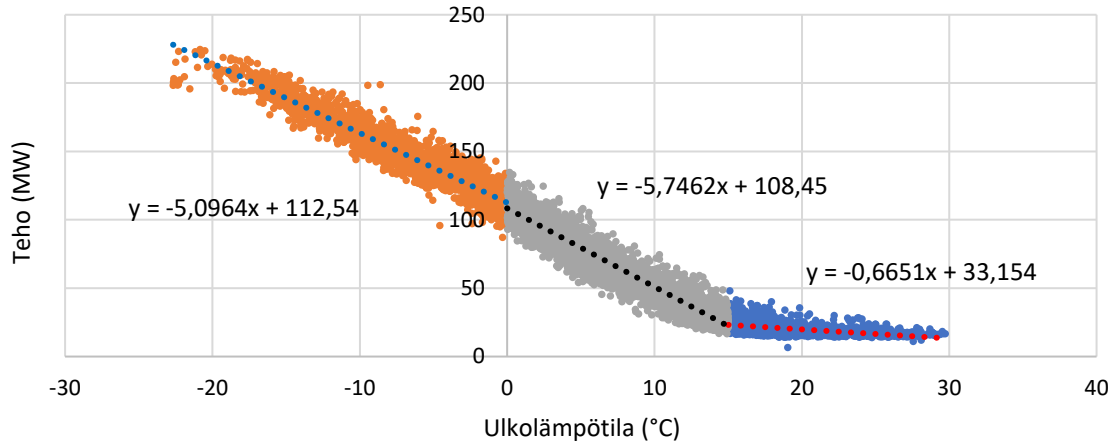
**Taulukko 5** Voimalaitoksen kattiloiden kattilahyötysuhteet ( $\eta_k$ ), nimellistehot ( $\phi_{max}$ ), minimitohot ( $\phi_{min}$ ), sekä kattiloissa hyödynnettävät polttoaineet

Lämmönlähde	Polttoaine	$\eta_k$	$\Phi_{max}$ (MW <sub>th</sub> )	$\Phi_{min}$ (MW <sub>th</sub> )
Cymic-kattila	Puu / Turve / REF	0,85	177	75
K5	Maakaasu	0,90	36	3
K4	Kevyt polttoöljy	0,90	41	12

Kattiloita K5 ja K4 hyödynnetään tarvittaessa huippukuorman tuottajina, ja poikkeustilanteissa Cymic-kattilan ollessa alhaalla.

## 5.2.2 Kaukolämpöjärjestelmän profilointi

Laskentatyökalussa kaukolämpöjärjestelmän profiili rakennetaan päivämäärän ja kellon ajan (*dd.mm.yyyy hh.mm.ss*) sekä ulkolämpötilan perusteella. Aika-askeleeksi valitaan yksi tunti ja ulkolämpötilana käytetään Porin lentoaseman havaintoasemalla mitattua tuntitason ulkolämpötila dataa vuodelta 2021 [115]. Kaukolämpöjärjestelmän profiilin luonti perustuu kaukolämpöjärjestelmän toiminnan mallintamiseen. Aittaluodon voimalaitoksen prosessihöyryn tuotannon  $\phi_H$  (MW) oletetaan mittausdatan perusteella olevan vuoden joka tunti 25 MW ja Kaanaan voimalaitoksen 30 MW. Kaukolämmön tuotantomallin avulla määritellään kaukolämmön tuotannon tarve  $\phi_{KL}$  (MW) jokaiselle aika-askeleelle. Tuotannon tarve selvitetään kuvassa 18 esitettyjen sovitteiden avulla. Tuotantomalli perustuu tuotantolaitosten kaukolämmön mittausdataan, jonka pohjalta on luotu kolme dataa kuvaavaa funktiota. Mittausdatassa on havaittavissa vaihtelua ulkolämpötilan funktiona, sillä todellisuudessa kaukolämmöntuotannon optimointiin vaikuttaa myös muut muuttujat (esim. vuorokauden aika, sekä muut sääolosuhteet kuten pilvisyys ja sade).



**Kuva 18** Kaukolämmön tuotanto tarkasteltavassa kaukolämpöjärjestelmässä ulkolämpötilan funktiona, kun  $T_{ulko} \leq 0$ ,  $0 < T_{ulko} < 15$  tai  $T_{ulko} \geq 15$

Kaukolämmön tuotantomäärä jaetaan eri voimalaitoksilla tuotettavaksi voimalaitosten tyypillisen ajojärjestyksen perusteella. Mikäli kaukolämmön tuotannon tarve on pienempi, kuin Aittaluodon voimalaitoksen kaukolämmön tuotantokapasiteetti (A-kattila + SKL), tuotetaan kaukolämpö vain kyseisellä voimalaitoksella. Jos kysyntä on suurempi, tuotetaan tarvittava osuus Kaanaan tuotantokapasiteetilla (Cymic-kattila). Mikäli tuotannon tarve on suurempi kuin näiden kahden kaukolämpöpotentiaali, hyödynnetään huipukapasiteettia.

Kun kaukolämmön tarve on suurempi, kuin Aittaluodon kokonaiskaukolämpöpotentiaali, on kaukolämmön tuotanto A-kattilalla  $\phi_{KLA-kattila}$  (MW) joko hetkellinen kaukolämmön tuotannon tarve tai laitoksen maksimi kaukolämpökapasiteetti. Tämä selvitetään seuraavasti:

$$\phi_{KLA-kattila} = \begin{cases} \phi_{KL}, & \phi_{KL} \leq \phi_{max} - \phi_{häviö} - \phi_H - P_g \\ \phi_{max} - \phi_{häviö} - \phi_H - P_g, & \phi_{KL} > \phi_{max} - \phi_{häviö} - \phi_H - P_g \end{cases} \quad (32)$$

, missä  $P_g$  voidaan edelleen esittää yhtälön (1) mukaisesti ja  $\phi_{häviö}$  kuvaa prosessihäviöitä, jotka ovat toimitushyötysuhteen perusteella 10 % nettöhöyrytehosta.

Savukaasujen lämmöntalteenottojärjestelmästä saatava lämpöteho  $\phi_{SKL}$  (MW) vaihtelee laitoksen lämmöntuotannon mukaan. Näin ollen se selvitetään seuraavasti:

$$\phi_{SKL} = (\phi_H + \phi_{KLA-kattila}) \frac{\phi_{maxSKL}}{\phi_{maxA-kattila}} \quad (33)$$

Kaukolämmön tuotanto Aittaluodossa kokonaisuudessaan ratkaistaan näiden kahden summana seuraavasti:

$$\phi_{KL, Aittaluoto} = \phi_{KLA-kattila} + \phi_{SKL} \quad (34)$$



Yllä oleva laskenta pätee kuitenkin vain kun  $\phi_{KL, Aittaluoto}$  on pienempi kuin  $\phi_{KL}$ , joten kun savukaasulauhduttimen ja A-kattilan yhteenlaskettu tuotto on suurempi kuin kyseisellä ajanhetkellä kaukolämmön tarve, selvitetään  $\phi_{KL, Aittaluoto}$  seuraavasti:

$$\phi_{KL, Aittaluoto} = \left[ \phi_{KL} - (\phi_H + \phi_{KL}) \frac{\phi_{maxSKL}}{\phi_{maxA-kattila}} \right] + \left[ (\phi_H + \phi_{KL}) \frac{\phi_{maxSKL}}{\phi_{maxA-kattila}} \right] \quad (35)$$

, jossa yhtälön ensimmäinen osa kuvaa  $\phi_{KLA-kattila}$  ja jälkiosa  $\phi_{SKL}$  käyttäytymistä kyseisessä tilanteessa.

Aittaluodossa kokonaisuudessaan A-kattilalla tuotettu nettohöyryteho jokaiselle aika-askeleelle ratkaistaan seuraavasti:

$$\phi_{A-kattila} = \phi_{KLA-kattila} + \phi_H + P_g + \phi_{häviö} \quad (36)$$

Mikäli Aittaluodon tuotantokapasiteetti ei riitä vastaamaan lämmön kysyntään, tuotetaan tarvittava kaukolämpökapasiteetti Kaanaassa  $\phi_{KL, Kaanaa}$  (MW) seuraavasti:

$$\phi_{KL, Kaanaa} = \begin{cases} 0, & \phi_{KL} - \phi_{KL, Aittaluoto} < 0 \\ \phi_{KL} - \phi_{KL, Aittaluoto}, & \phi_{KL} - \phi_{KL, Aittaluoto} < P_{max,siirto} \\ P_{max,siirto}, & \phi_{KL} - \phi_{KL, Aittaluoto} \geq P_{max,siirto} \end{cases} \quad (37)$$

Jonka pohjalta ratkaistaan yhtälön (1) perusteella laitoksen sähköteho. Tämän avulla ratkaistaan Kaanaassa kokonaisuudessaan Cymic-kattilalla tuotettu nettohöyryteho seuraavasti:

$$\phi_{Cymic} = \phi_{KL, Kaanaa} + \phi_H + P_g + \phi_{häviö} \quad (38)$$

Kuitenkin tilanteissa, joissa edellisessä yhtälössä esitetty summa on pienempi kuin Cymic-kattilan minimiteho  $\phi_{minCymic-kattila}$  ajetaan laitosta sen minimiteholla (75 MW) ja apujäähdytetään ylijäämä lämpöosuus. Apujäähdytyksen teho ratkaistaan seuraavasti:

$$\phi_{apujäähd..} = \frac{\phi_{minCymic-kattila} - \phi_H - r \phi_H}{1 + r} \quad (39)$$

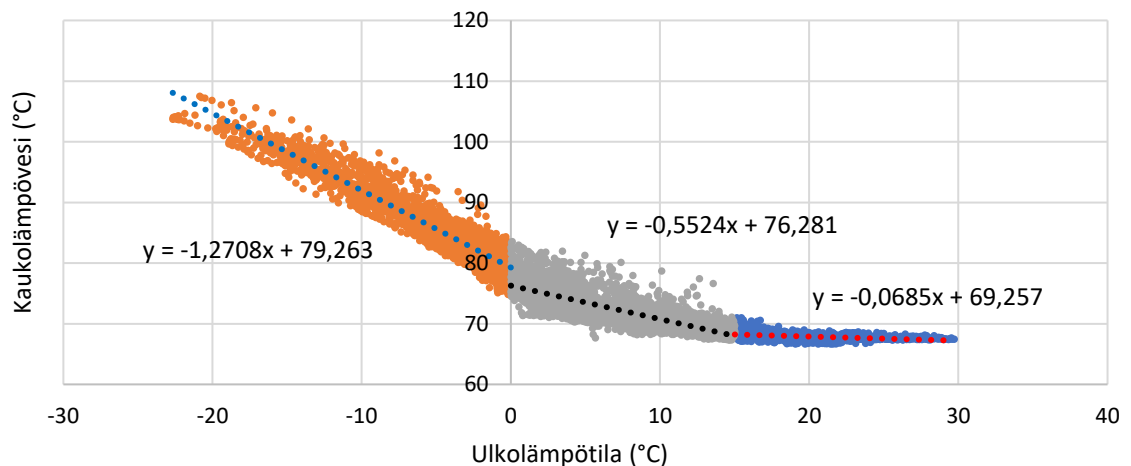
, jolloin apujäähdytystilanteissa sähköteho selvitetään yhtälön (1) mukaisesti,  $\phi_{tot}$  (MW) ollen nyt apujäähdytyksen ja prosessihöyryn lämpötehojen summa.

Mikäli Kaanaan voimalaitoksella tuotettavaksi kaukolämpötehoksi jää suurempi kuin Cymic-kattilan maksimiteho tai kaukolämpöverkon siirtokyky, jää loppu kaukolämpö tuotettavaksi lämpökeskuksilla. Hetkellinen lämpökeskuksilla tuotettu kaukolämpökapasiteetti ratkaistaan seuraavasti:

$$\phi_{KL, \text{ huippukap.}} = \phi_{KL} - \phi_{KL, \text{ Aittaluoto}} - \phi_{KL, \text{ Kaanaa}} \quad (40)$$

Kattiloiden kiinteän polttoaineen kulutus voimalaitoksilla ratkaistaan yhtälön (2) mukaisesti jokaiselle ajanhetkelle ratkaistujen  $\phi_{A-kattila}$ ,  $\phi_{Cymic}$  ja  $\phi_{KL, \text{ huippukap.}}$  arvojen, sekä taulukossa 4 ja taulukossa 5 esitettyjen kattilahyötysuhteiden perusteella. Kiinteän polttoaineen kulutus voimalaitoksilla eri polttoainelajien kesken ratkaistaan yhtälön (3) perusteella, olettaen polttoainejakaumien olevan luvussa 5.2.1 esitettyjen mukainen. Laskenta suoritetaan jokaiselle polttoainejakeelle (puu, turve, REF, POK). Polttoainejakauman avulla selvitetään yhtälön (4) perusteella kummankin voimalaitoksen sekä huipulämpökeskuksen polttoaineiden kokonaiskustannus  $H_{pa}$ , josta summaamalla kustannukset yhteen huomioiden polttoaineen käytetyn osuuden  $x_{i,,}$ , lasketaan kaukolämpöjärjestelmän muuttuva kokonaiskustannus. Laskennassa hyödynnetään taulukoissa 1 ja 2 esitettyjä arvoja. Päästöoikeuden hintana käytetään 80 €/tCO<sub>2</sub> ja kierrätyspolttoaineen hankintahinnan oletetaan vastaavan turpeen hankintahintaa.

Siirtomallin avulla mallinnetaan kaukolämmön siirtoa kaukolämpöverkossa. Siirtomallin avulla määritellään kaukolämpöverkossa virtaavan kaukolämpöveden hetkellinen lämpötila  $T_m$  (°C) jokaiselle aika-askelelle (*dd.mm.yyyy hh.mm.ss*). Tämä selvitetään kuvassa 19 esitettyjen sovitteiden avulla. Siirtomalli perustuu tuotantolaitoksilla mitattuun kaukolämpöveden lämpötilan mittausdataan, jonka pohjalta on luotu kolme dataa kuvaavaa funktiota. Mittausdatassa on havaittavissa vaihtelua, sillä kaukolämpöveden lämpötilaan vaikuttaa esim. lämmön varastoituminen kaukolämpöverkkoon, sekä muut sääolosuhteet kuten pilvisuus ja sade.



**Kuva 19** Kaukolämpöveden lämpötila tarkasteltavan kaukolämpöjärjestelmän menoputkessa ulkolämpötilan funktiona, kun  $T_{ulko} \leq 0$ ,  $0 < T_{ulko} < 15$  tai  $T_{ulko} \geq 15$

Paluuveden lämpötila  $T_p$  (°C) selvitetään jokaiselle aika-askelelle (*dd.mm.yyyy hh.mm.ss*) olettaen jäähtymän olevan joka ajanhetki 30 °C.

## 5.3 Hukkalämpökohteiden mallintaminen

### 5.3.1 Tarkastelun kohteena olevat hukkalämpökohteet

Tarkasteltavan kaukolämpöjärjestelmän ympäristön ja olemassa olevien yritysten perusteella valitaan tarkasteltavat hukkalämmön lähteet. Kirjallisuuskatsauksen perusteella analysoidaan ja valitaan hukkalämmön lähteiden todennäköiset ominaisuudet (lämpötila, lämpöteho, ajoitus). Kirjallisuuskatsauksen perusteella hukkalämmön lähteet muodostetaan suuruusluokaltaan ja ajoitukseltaan sellaisiksi, että ne olisivat mahdollisimman realistisia ja vastaisivat mahdollisimman paljon alueella potentiaalisesti esiintyviä hukkalämmön lähteitä. Alueen kartoituksen perusteella kaukolämpöverkon läheisyydessä on niin teollisuusalueita, kuin myös erilaisia julkisen- ja palvelusektorin rakennuksia. Työssä tarkemmin tarkasteltaviksi kohteiksi valitaan: datakeskus, teollisuuden jäähdytysvesi, krematorio, sekä päivittäistavarakauppa. Tarkasteltavien kohteiden hyödynnettävyyteen vaikuttavat ominaisuudet, sekä arvioitu etäisyys kaukolämpöverkosta on esitetty taulukossa 6.

**Taulukko 6** Tarkasteltavien hukkalämpökohteiden ominaisuudet

Hukkalämmön lähde	Hukkalämmön lähdettä karakterivoivat ominaisuudet	Etäisyys (km)
Datakeskus	Datakeskuksen sähköteho: 50 MW Sähkön kokonaiskulutus: 438000 MWh/a Hukkalämmön hyödyntämiskerroin $f_{DC}$ : 80 % Hukkalämmön lämpötila: 75 °C Hukkalämmön jäähdytys lämpötila: 20 °C	1,2
Teollisuuden jäähdytysvesi	Jäähdytysveden keskimääräinen virtaama: 130 m <sup>3</sup> /h / 1 138 800 m <sup>3</sup> /a Jäähdytysveden ka lämpötila ja lämpötilavaihtelu: 20 °C / 15–25 °C Jäähdytetyn veden lämpötila: 1 °C Veden ominaislämpökapasiteetti: 1,16 kWh/m <sup>3</sup> K Tuotantoaste: 3-vuorotyö	0,8
Kreamatorio	Savukaasun lämpötila: 600 °C Savukaasun jäähdytys lämpötila: 120 °C Savukaasun virtaama: 8380 m <sup>3</sup> /h Savukaasun ominaislämpökapasiteetti: 0,0001356 kWh/m <sup>3</sup> K Tuhkaus ajat: ma-pe: 8–16, la-su: kiinni	1,0
Kauppa	Sähkön kokonaiskulutus: 2280 MWh/vuosi Kylmälaitteiden osuus sähkön kokonaiskulutuksesta: 28 % Ruokakaupan aukioloajat: ma-la 7–22, su 9–22 Kylmälaitteen COP: 4	0,4

Hukkalämmön lähteiden päätetyt ominaisuudet pohjautuvat pääosin kirjallisuuskatsauksen, eli luvun 3, kirjallisuuteen. Lisäksi ominaisuuksien valintaan on vaikuttanut alueen yritysten ja rakennusten sekä alueiden sijainti, kokoluokka, sekä niiden tyypilliset toiminta- tai aukioloajat.

### **5.3.2 Hukkalämmön lähteiden profilointi**

Laskentatyökalu luodaan niin, että se ottaa käyttäjältä syötteen hukkalämmön lähteen ja olomuodon. Hukkalämmön lähteen ja olomuodon perusteella muodostuu seuraavat syötteen. Hukkalämmön lähteiksi kelpaavat syötteen ovat: datakeskus, teollisuus, krematorio ja kauppa. Olomuodoiksi kelpaavat syötteen ovat: vesi, savukaasu ja lauhde. Loput syötteen muodostuvat näiden perusteella, niin että ne kuvaavat kohteessa syntyvän hukkalämmön muodostumista. Lisäksi kohteen arvioitu etäisyys menoputkesta (km) tulee syöttää. Syötettyjen tietojen perusteella laskentatyökalu muodostaa kullekin hukkalämmön lähteelle ominaisen teho- ja lämpötilaprofiilin tietyn laskentamallin perusteella. Seuraavissa alakappaleissa on esitetty laskentamallit, joiden perusteella profiilit muodostuvat.

#### ***Datakeskus***

Laskentatyökalu luodaan niin, että syöttämällä laskentatyökaluun hukkalämmön lähteeksi datakeskus ja hukkalämmön olomuodoiksi lauhde, muodostaa laskentatyökalu seuraavat syötteen: "Kohteen sähkönkulutus (MWh/a)", "Hyödyntämiskerroin", "Hukkalämmön lämpötila (°C)". Syötettyjen arvojen perusteella datakeskuksissa syntyvän hukkalämmön tehoprofiili selvitetään yhtälöön (12) pohjautuen.

Yhtälön (12) perusteella lasketaan datakeskuksessa syntyvä vuotuinen hukkalämpömäärä. Tehoprofiili muodostetaan jakamalla muodostunut hukkalämpömäärä tasan vuoden jokaiselle tunnille, eli syntyvän hukkalämmön oletetaan olevan riippumaton vuorokauden- tai vuodenaajasta. Datakeskuksen hukkalämmön lämpötilan oletetaan olevan vakio, eli lämpötilaprofiili muodostuu vuoden jokaiselle tunnille suoraan käyttäjän syötteen perusteella. Työssä numeerinen tulos ratkaistaan taulukossa 6 esitettyjen arvojen perusteella.

#### ***Teollisuuden jäähdytysvesi***

Laskentatyökalu luodaan niin, että syöttämällä laskentatyökaluun hukkalämmön lähteeksi teollisuus ja hukkalämmön olomuodoiksi vesi, muodostaa laskentatyökalu seuraavat syötteen: "Veden keskimääräinen virtaama (m<sup>3</sup>/h)", Veden keskimääräinen virtaama

(m<sup>3</sup>/a), ”Veden ominaislämpökapasiteetti (kWh/m<sup>3</sup>K) ja ”Veden keskimääräinen lämpötila (°C)”. Lisäksi laskentatyökalu ottaa syötteenä sisäänsä kohteen toiminta-ajat viikonpäivän mukaan.

Tehoprofiili muodostetaan niin, että jokaiselle tunnille ratkaistun virtaaman  $V_{HL}$ , ominaislämpökapasiteetin  $c$  ja lämpötilan  $T_{HL}$  perusteella lasketaan syntyvän hukkalämmön hetkellinen teho yhtälön (13) perusteella. Teollisuuden oletetaan toimivan 3-vuoroisesti, eli maanantai - sunnuntai klo.00–23 ja 8760 h/vuosi. Hukkalämmön muodostumisen oletetaan olevan jatkuvatoimista vuodenajasta riippumatta. Jäähdytysveden hetkellistä virtaamaa skaalataan niin, että virtaus vaihtelee päivän sisällä syklisesti keskimääräisen virtaaman  $V_{HL,m3/h}$  (m<sup>3</sup>/h) ympärillä, niin että vuoden aikainen kokonaisvirtaama  $V_{HL,m3/a}$  (m<sup>3</sup>/a) on syötetyn mukainen. Keskimääräistä veden virtaama skaalataan aikakertoimien  $t_{skal}$  perusteella. Aikakertoimet vuorokauden jokaiselle tunnille määritellään taulukossa 7 esitetysti.

**Taulukko 7** Veden virtaaman skaalauksessa käytettävät aikakertoimet vuorokauden jokaiselle tunnille

Tunti	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
$t_{skal}$	0,45	0,45	0,45	0,5	0,5	0,5	0,55	0,8	0,85	0,9	0,9	0,75	0,8	0,85	0,9	0,9	0,9	0,9	0,8	0,7	0,7	0,6	0,5	0,45

Jäähdytysveden hetkellinen aikaskaalattu virtaama  $V_{HL,skal}$  ratkaistaan keskimääräisen virtaaman  $V_{HL,m3/h}$  ja aikakertoimen  $t_{skal}$  tulona. Tämän jälkeen skaalattu virtaama korjataan vuoden jokaiselta tunnilta korjauskertoimella, mikäli vuotuinen virtaama ei ole syötetyn mukainen skaalauksen jälkeen. Korjauskerroin  $k_{skal}$  määritellään seuraavasti:

$$k_{skal} = V_{HL,m3/a} - \sum V_{HL,skal}/8760 \quad (41)$$

, missä summan muodostaa vuoden jokaisen tunnin  $V_{HL,skal}$ . Korjauskerroin vähennetään skaalatusta virtaamasta. Näin muodostetun virtaaman avulla lasketaan hetkellinen hukkalämpöteho.

Veden lämpötila skaalataan niin, että se vaihtelee päivän sisällä keskilämpötilan ympärillä. Työssä oletetaan, että jäähdytetyn jäähdytysveden lämpötila on aina 1 °C. Skaalattun virtaaman ja lämpötilan, sekä ominaislämpökapasiteetin perusteella selvitetään vuoden jokaiselle tunnille hukkalämmön hetkellinen teho. Työssä numeerinen tulos ratkaistaan taulukossa 6 esitettyjen arvojen perusteella

## ***Krematorio***

Laskentatyökalu luodaan niin, että syöttämällä laskentatyökaluun hukkalämmön lähteeksi krematorio ja hukkalämmön olomuodoksi savukaasu, muodostaa laskentatyökalu seuraavat syötteen: "Savukaasun virtaama ( $m^3/h$ )", "Savukaasun ominaislämpökapasiteetti ( $kWh/m^3K$ )", "Savukaasun lämpötila ( $^{\circ}C$ )". Lisäksi laskentatyökalu ottaa syötteenä sisäänsä krematorion toiminta-ajat viikonpäivän mukaan

Laskentatyökalu muodostetaan niin, että virtaaman  $V_{HL}$ , ominaislämpökapasiteetin  $c$  ja lämpötilan  $T_{HL}$  perusteella lasketaan syntyvän hukkalämmön teho yhtälön (13) perusteella. Krematorion savukaasun lämpötilan oletetaan olevan vakio ja savukaasu jäähdytetään aina  $120^{\circ}C$ :een. Virtaaman oletetaan olevan vakio toiminta-aikoina ja toiminta-aikojen ulkopuolella nolla. Krematoriosta hukkalämpöä oletetaan muodostuvan vain laskentatyökalun käyttäjän syöttäminä toiminta-aikoina. Työssä numeerinen tulos ratkaistaan taulukossa 6 esitettyjen arvojen perusteella.

## ***Kauppa***

Laskentatyökalu luodaan niin, että syöttämällä laskentatyökaluun hukkalämmön lähteeksi "kauppa" ja hukkalämmön olomuodoksi "lauhde", muodostaa laskentatyökalu seuraavat syötteen: "Kohteen sähkönkulutus ( $MWh/vuosi$ )", "Kylmälaitteiden osuus sähkönkulutuksesta" ja "COP". Lisäksi laskentatyökalu ottaa syötteenä kaupan aukioloajat viikonpäivän mukaan

Kaupoissa syntyvän hukkalämmön tehoprofiili selvitetään yhtälöön (14) pohjautuen. Yhtälön perusteella selvitetään vuotuinen hukkalämpömäärä, joka jaetaan prosentuaalisin osuuksin vuoden jokaiselle kuukaudella. Jako-osuuksien oletetaan olevan lämpiminä kuukausina suurempi, johtuen jäähdytyksen suuremmasta tarpeesta. Taulukossa 8 on esitetty työssä käytettävät hukkalämmön jako-osuudet.

***Taulukko 8 Hukkalämmön kuukausittaiset jakokertoimet***

<b>Kuukausi</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<b>Jako-osuus (%)</b>	6,9	6,1	6,8	7,1	8,5	9,8	11,4	11,5	8,9	8,7	7,3	7,0

Kuukauden sisäinen energiamäärä jaetaan kuukauden jokaiselle tunnille. Hukkalämpömäärä jaetaan niin, että kaupan aukioloaikojen ulkopuolella muodostuu noin 30 % vähemmän hukkalämpöä, kuin kaupan aukioloaikoina. Kaupassa syntyvän hukkalämmön

lämpötilaprofiiliin oletetaan seuraavan ulkolämpötilaa. Kaupassa syntyvän lauhteen lämpötila  $T_{HL}$  (°C) selvitetään seuraavasti:

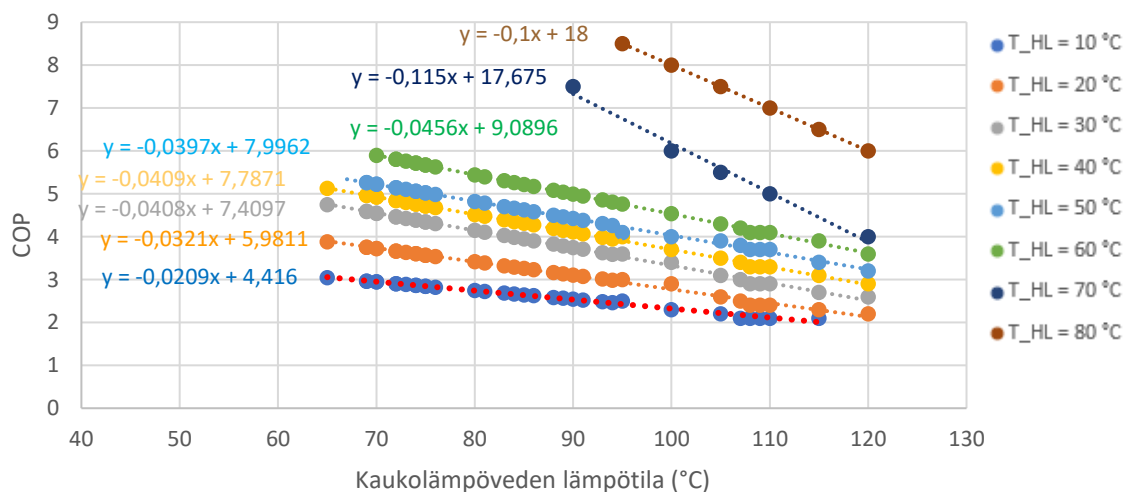
$$T_{HL} = \begin{cases} 0, & T_{ulko} \leq -10 \\ T_{ulko} + 10, & T_{ulko} > -10 \end{cases} \quad (42)$$

Työssä numeerinen tulos selvitetään taulukossa 6 esitettyjen arvojen ja Porin lentoaseman havaintoasemalla mitatun tuntitason ulkolämpötila datan [115] perusteella.

## 5.4 Hukkalämpöjen hyödyntäminen kaukolämpöjärjestelmässä

### 5.4.1 Temporaalinen analyysi

Hyödyntämisteknologia (lämpöpumppu/lämmönvaihdin) valitaan hukkalämmön lämpötilan ja hetkellisen kaukolämpöverkossa virtaavan kaukolämpöveden lämpötilan perusteella. Hukkalämmön lämpötilan oltaessa korkeampi, kuin kaukolämpöveden lämpötila, hyödynnetään lämmönvaihdinta. Tarvittavan lämmönvaihtimen pinta-ala selvitetään yhtälöiden (16) ja (17) perusteella. Lämmönvaihtimen kokonaislämmönsiirtokertoimen,  $U$  oletetaan olevan  $60 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Hukkalämmön lämpötilan ollessa alhaisempi kuin kaukolämpöveden hetkellinen lämpötila, valikoituu teknologiaksi lämpöpumppu. Tällöin hukkalämmön lämpötila nostetaan kaukolämpöverkossa virtaavan veden hetkelliseen lämpötilaan. Lämpöpumpun hetkellinen COP-arvo selvitetään kuvassa 20 esitettyjen funktioiden avulla, hyödyntäen sovitetta, joka on lähimpänä hukkalämmön lämpötilaa (pyöristäen lämpötilaa alaspäin heikomman COP-arvon suuntaan, mikäli tarvetta). COP-arvon perusteella selvitetään lämpöpumpusta hyödyksi saatava lämpövirta  $Q_{ulos}$  (i.e.  $Q_{LP}$ ) ja kompressorin hetkellinen teho  $W_{komp}$  yhtälöiden (24) ja (25) perusteella.



**Kuva 20** COP-arvojen selvitys hukkalämmönlähteen lämpötilan  $T_{HL}$  (°C) ja kaukolämpöveden lämpötilan  $T_m$  (°C) perusteella [116][117]

Kaukolämpöjärjestelmän ja erilaisten hukkalämpökohteiden tuntikohtaisia profiileita vertaamalla, selvitetään ideaalinen ja todellinen hyödyntämispotentiaali. Ideaaliseksi potentiaaliksi määritellään se, kuinka paljon verkossa olisi mahdollista hyödyntää hukkalämpöä kaukolämmön kysynnän pohjalta (vrt. kuva 18). Kaukolämpöjärjestelmän ja hukkalämpökohteen profiileita vertaamalla tarkastetaan teoreettisesti hyödynnettävissä oleva hukkalämpö sekä varastointikapasiteetin tarve. Todelliseksi potentiaaliksi määritellään se, kuinka paljon verkossa olisi mahdollista hyödyntää hukkalämpöä ottaen huomioon kaukolämpöjärjestelmän asettamat rajoitteet. Tarkasteltavassa kaukolämpöjärjestelmässä todellinen hyödyntämispotentiaali selvitetään pohjautuen kaukolämmön minimituottovaatimukseen voimalaitoksilla, oletuksien mukaan voimalaitoksia ei kytketä pois päältä jatkuvan prosessihöyryn tuotannon tarpeen takia milloinkaan, vaikka hukkalämpöä olisi tarjolla. Kaukolämmön minimituottovaatimus Aittaluodossa selvitetään A-kattilalle seuraavasti:

$$\phi_{KLmin, A-kattila} = \phi_{minA-kattila} - \phi_H - P_g - \phi_{häviö} \quad (43)$$

ja savukaasulauhduttimelle seuraavasti:

$$\phi_{KLmin, SKL} = \phi_H \frac{\phi_{max, SKL}}{\phi_{max, A-kattila}} \quad (44)$$

A-kattilan ja savukaasulauhduttimen minimituottojen summana, saadaan Aittaluodon kaukolämmön minimituottovaatimus seuraavasti:

$$\phi_{KLmin, Aittaluoto} = \phi_{KLmin, A-kattila} + \phi_{KLmin, SKL} \quad (45)$$

Kaanaassa kaukolämmön minimituottovaatimus Cymic-kattilalla selvitetään seuraavasti:

$$\phi_{KLmin, Kaanaa} = \phi_{minCymic-kattila} - \phi_H - P_g - \phi_{häviö} \quad (46)$$

, jossa  $P_g$  ratkaistaan edelleen yhtälön (1) avulla.

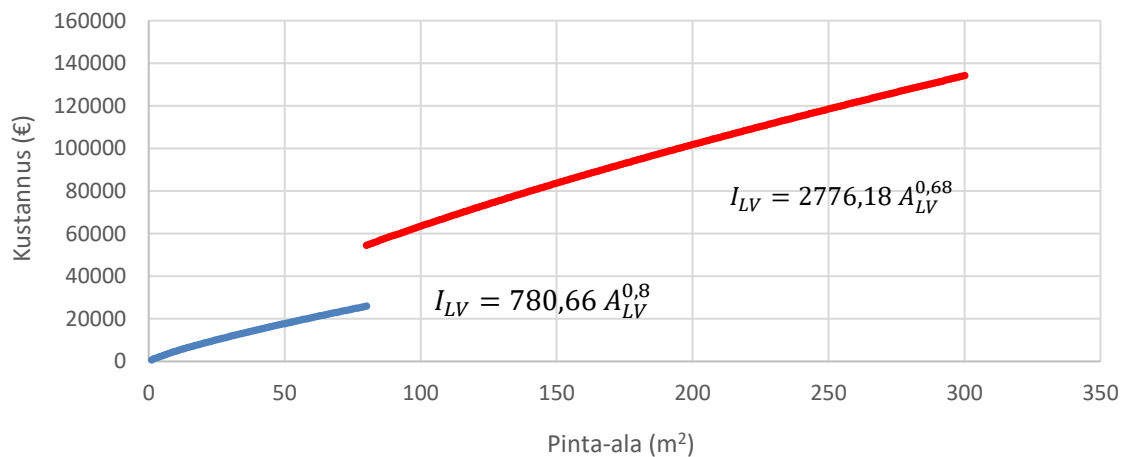
Vähentämällä minimituottovaatimus kaukolämmön hetkellisestä kokonaistuotantomäärästä, saadaan selville todellinen hyödyntämispotentiaali. Todellisen hyödyntämispotentiaalilla selvitetään tämänhetkinen hukkalämmön hyödyntämispotentiaali. Vertaamalla todellista hyödyntämispotentiaalia hukkalämpökohteen profiiliin kanssa, saadaan selvitettyä todellisesti hyödynnettävissä oleva hetkellinen hukkalämpö  $Q_{HL,verkko}$  (MW) sekä hetkellinen varastointikapasiteetin tarve  $Q_{HL,varasto}$  (MW). Kausivaraston koon  $V_{TES}$  (m<sup>3</sup>) oletetaan vastaavan Vaasan kausivarastoa (210 000 m<sup>3</sup>), sillä Vaasan kaukolämpöjärjestelmän suuruusluokka on melko vastaava, kuin Pori Energian kaukolämpöjärjestelmän [118]. Varaston energiavarastointikapasiteetin oletetaan olevan 80 kWh/m<sup>3</sup>, eli



kokonaisenergianvarastointikapasiteetti tarkasteltavalla varastolla on 16,8 GWh. Varastoa oletetaan ladattavan vain lämmityskauden ulkopuolella (toukokuu-syyskuu) kun hukkalämpöjen oletettu hyödyntämispotentiaali on pienimmillään. Varaston energiasisältöä hyödynnettävän lämmityskaudella (lokakuu-huhtikuu).

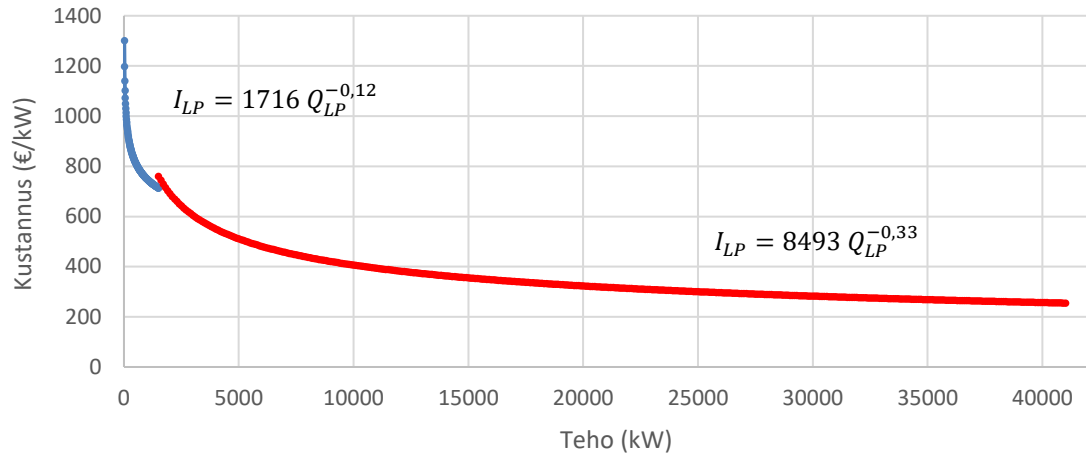
## 5.4.2 Taloudellinen analyysi

Lisäksi suoritetaan taloudellinen analyysi, eli hukkalämmön hyödyntämisestä syntyvät kustannukset selvitetään. Kustannukset lasketaan perustuen hukkalämmön hetkelliseen maksimitehoon  $Q_{HL}$  (MW) eli sen perusteella mitoitetaan tarvittavat hyödyntämisteknologiat ja selvitetään tarvittavat investoinnit. Lämmönvaihtimen hyödyntämisestä syntyvät investointikustannukset selvitetään pinta-alan perusteella. Yhtälöiden (18) ja (19) perusteella ratkaistaan lämmönvaihtimen investoinnista syntyvät kustannukset kuvan 21 mukaisesti. Lämmönvaihtimen huolto- ja kunnossapitokustannusten  $HK_{LV}$  oletetaan olevan  $500 \text{ € MW}^{-1} \text{ vuosi}^{-1}$ .



**Kuva 21** Lämmönvaihtimen investointikustannus  $I_{LV}$  (€) lämmönvaihtimen pinta-alan funktiona

Lämpöpumpun hyödyntämisestä syntyvät investointikustannukset (€/kW) selvitetään yhtälöiden (21) ja (22) perusteella, kuvan 22 mukaisesti. Lisäksi investointikustannukset kokonaisuudessaan (€) selvitetään. Lämpöpumpun huolto- ja kunnossapitokustannusten  $HK_{LP}$  oletetaan olevan 0,6 % investoinnin hinnasta per vuosi.



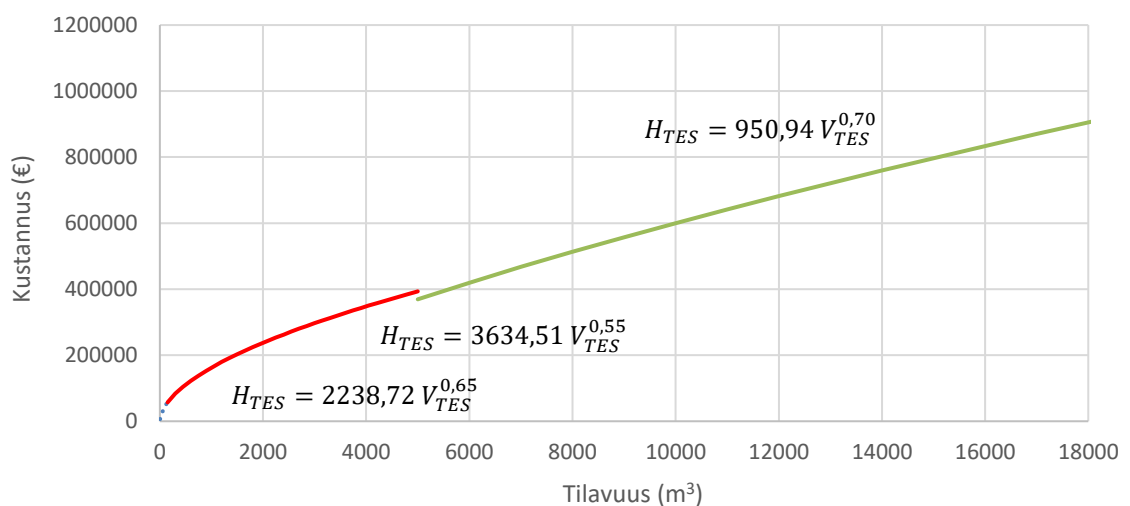
**Kuva 22** Lämpöpumpun investointikustannukset  $I_{LP}$  (€/kW) lämpöpumpun tehon funktiona

Lämpöpumpun kompressorin sähkön käytöstä syntyvät muuttuvat kustannukset selvitetään COP-arvon avulla. Lämpöpumpun sähkönkäytön muuttuva kustannus  $MK_{LP}$  (€/h) selvitetään seuraavasti sähkön hinnan perusteella

$$MK_{LP} = W_{komp} H_{sähkö} \quad (47)$$

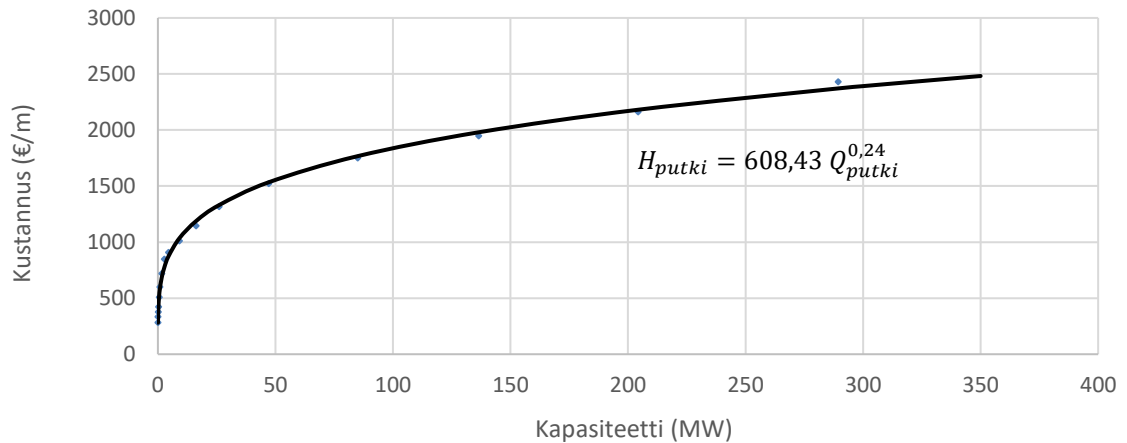
Sähkön hinta ratkaistaan yhtälön (26) perusteella, missä  $H_{siirto}$  on 26 €/MWh,  $H_{sähkövero}$  on 0,781 €/MWh ja  $H_{sähköenergia}$  arvona käytetään kolmea skenaariota: 25 €/MWh, 75 €/MWh ja vuoden 2021 toteutuneita Nord Pool spot -sähköpörssin sähkön hintoja [103].

Varaston koon perusteella selvitetään yhtälöiden (27), (28) ja (29) mukaan lämpövaraston investoinnista syntyvät kustannukset  $H_{TES}$  (€) kuvassa 23 esitettyjen funktioiden mukaan. Muita lämpövaraston hyödyntämisestä syntyviä kustannuksia ei työssä huomioida.



**Kuva 23** Lämpövaraston investointikustannukset (€) lämpövaraston tilavuuden funktiona

Hukkalämpökohteen ja kaukolämpöverkon sijainnin avulla selvitetään verkon rakentamisesta syntyvät kustannukset. Putkikustannukset  $H_{putki}$  (€/m) arvioidaan putken kapasiteetin  $Q_{putki}$  (MW) avulla, kuvassa 24 esitetyn, [119] tietoihin perustuvan, funktion perusteella. Investointifunktiossa on huomioitu projektointi-, kenttätö-, putkityö-, materiaali- ja kaivuukustannukset. Putken kapasiteetti määritellään hukkalämmön maksimi tehon  $Q_{HL}$  (MW) perusteella.



**Kuva 24** Putkikustannukset (€/m) putken kapasiteetin funktiona [119]

Hukkalämmön käytöstä syntyvät kiinteät kustannukset jaetaan annuiteetteihin pitoajan ja korkokannan perusteella, jonka jälkeen muodostetaan hukkalämmön hyödyntämisestä syntyvät yksikkökustannukset (€/MWh) hyödyntämisteknologialle ja kaukolämpöverkolle yhtälön (30) ja (31) perusteella. Hyödyntämisteknologialle ja kaukolämpöverkolle pitoaikana  $n$  käytetään 20 vuotta ja lämpövarastolle 45 vuotta. Korkokantana käytetään 8 %. Hukkalämpöjen hyödyntämisestä syntyvien kustannusten, eli hyödyntämisteknologian ja verkkoon kohdistuvien kustannusten perusteella muodostetaan suuntaa antava perusmaksu komponentti (€/MWh) verkon rakentamiskustannuksille sekä hukkalämpöjen hyödyntämisteknologiasta syntyville kustannuksille.

Hukkalämmöstä maksettava energiahinta määritellään hukkalämmön arvoon pohjautuen. Pohja-arvon muodostaa kaukolämpöjärjestelmän muuttuva tuotantokustannus. Lisäksi otetaan huomioon menetetyt CHP-tuotannon sähkönmyynti tappiot. Hetkelliset menetetyt sähkönmyynti tappiot saadaan selvitettyä, kun tuotannon jakautuminen CHP-laitoksille ja huippukapasiteetille tiedetään. Sähkön tuotantoon vaikuttava hukkalämpöteho  $Q_{HL, sähköhäviö}$  (MW) jokaisella tunnilla selvitetään seuraavasti:

$$Q_{HL, sähköhäviö} = \begin{cases} 0, & Q_{HL,verkko} - \phi_{KL, huippukap.} \leq 0 \\ Q_{HL,verkko} - \phi_{KL, huippukap.}, & Q_{HL,verkko} - \phi_{KL, huippukap.} > 0 \end{cases} \quad (48)$$

Hukkalämmön oletetaan korvaavan Aittaluodossa ja Kaanaassa tuotettua lämpöä vastaavilla osuuksilla (%), kuin niillä hetkellisesti tuotetaan lämpöä kokonaislämmöntuotannosta. Aittaluodossa hävitty sähkösaalis  $Q_{\text{sähköhäviö,Aittaluoto}}$  sekä Kaanaassa hävitty sähkösaalis  $Q_{\text{sähköhäviö,Kaanaa}}$  (MW) ratkaistaan  $Q_{HL, \text{ sähköhäviö}}$  ja rakennusasteen tulona. Tämän perusteella sähkönmyyntitappion arvo korvattua energiaa kohden selvitetään seuraavasti:

$$H_{\text{sähköhäviö}} = \frac{Q_{\text{sähköhäviö,Aittaluoto}} \cdot H_{\text{sähköenergia}} + Q_{\text{sähköhäviö,Kaanaa}} \cdot H_{\text{sähköenergia}}}{Q_{HL, \text{ sähköhäviö}}} \quad (49)$$

Sähkönmyyntitappion arvo selvitetään sähkön hinta -skenaarioilla: 25 €/MWh, 75 €/MWh, sekä vuoden 2021 toteutuneilla Nord Pool spot -sähköpörssin hinnoilla [103].

Hukkalämmön arvo selvitetään jokaiselle vuoden tunnille seuraavasti:

$$H_{HL} = H_{pa} - H_{\text{sähköhäviö}} \quad (50)$$

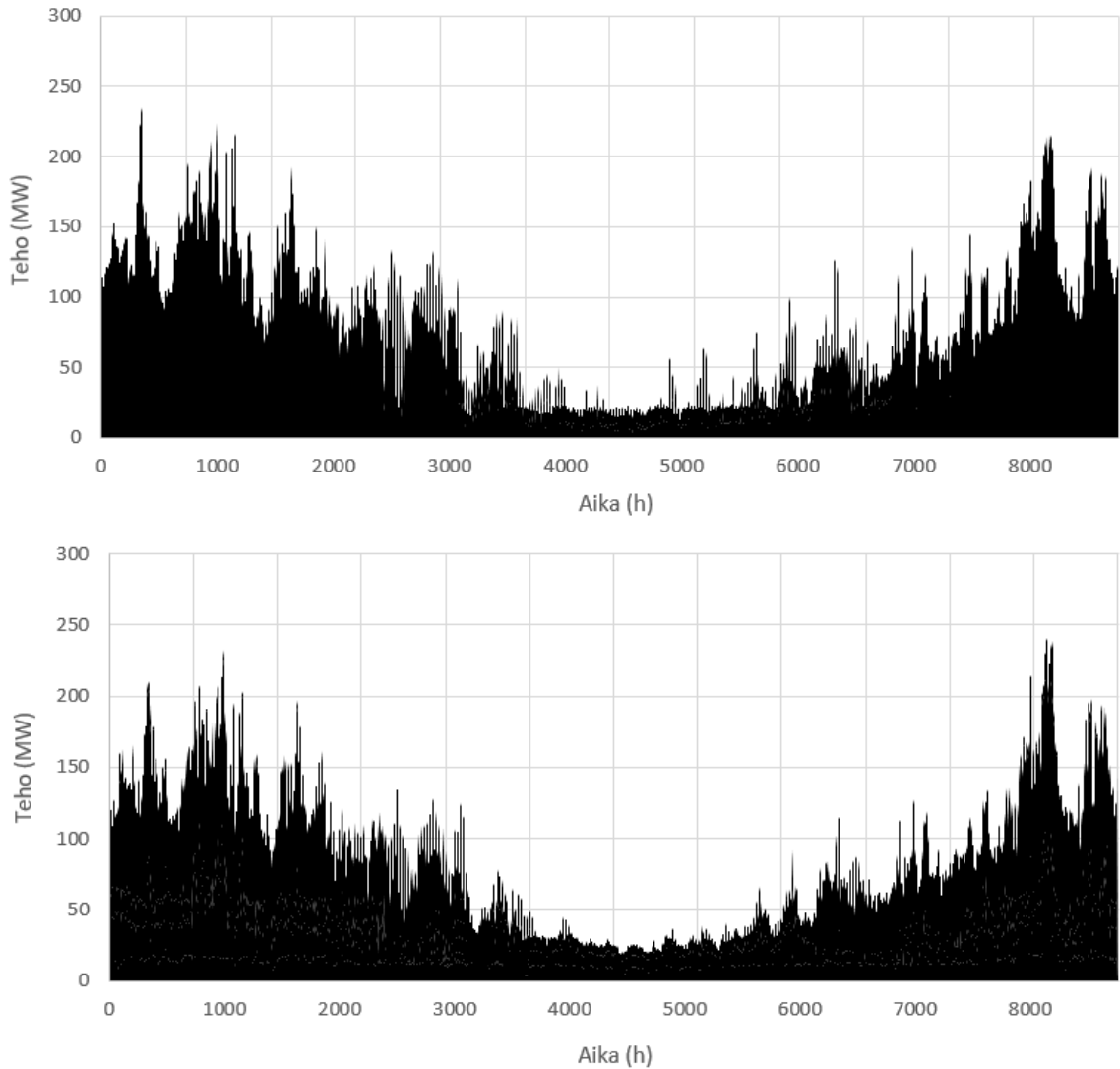
Hukkalämmön hetkellinen arvo esitetään ulkolämpötilan funktiona.

## 6. TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU

Tässä luvussa esitetään kaukolämpöjärjestelmälle sekä erilaisille hukkalämmön lähteille muodostetut profiilit, sekä hukkalämpöjen hyödyntämiseen liittyvät rajoitteet ja ratkaisut. Tuloksena saadaan Excel-laskentatyökalu, joka muodostaa Pori Energian kaukolämpöjärjestelmälle sekä erilaisille hukkalämpökohteille määriteltujen syötteiden perusteella teho- ja lämpötilaprofiilit, vertaa näitä ajallisesti toisiinsa ja muodostaa tämän perusteella hyödyntämiskäytännöt. Ensin luvussa 6.1 esitellään kaukolämpöjärjestelmän teho- ja tuotantoprofiili, jonka jälkeen luvussa 6.2 esitellään hukkalämmön lähteiden teho- ja tuotantoprofiilit. Tämän jälkeen luvussa 6.3 esitetään hyödynnettävyyteen liittyvät tulokset, eli hukkalämpöjen hyödyntämispotentiaali erilaisissa tilanteissa, hyödyntämisestä muodostuvat kustannukset, sekä hukkalämmön arvo.

### 6.1 Kaukolämpöjärjestelmän profiili

Kaukolämpöjärjestelmän kaukolämmöntuotannon tarve selvitettiin eri ajanhetkinä. Kaukolämmön tuotannon tarpeessa ei huomioitu muuta kuin ulkolämpötilan vaikutus. Tuloksissa tulee huomioida, että todellisuudessa tilan lämmityksen tarve määräytyy ulkolämpötilan funktiona, mutta käyttöveden kaukolämmön tarve rakennustyyppin perusteella. Lisäksi myös vuorokauden aika vaikuttaa tuotannon tarpeeseen ulkolämpötilan lisäksi. On myös huomioitavaa, että kaukolämmön tarve on laskettu mittausdatan perusteella tehdyn keskiarvo sovitteen perusteella (vrt. kuva 18), näin ollen on mahdollista, että hetkellinen kaukolämmöntuotantoteho voisi olla joissakin tapauksissa jopa noin  $\pm 20$  MW, kuin nyt muodostetussa tehoprofiilissa. Kuvassa 25 on esitetty Excel-työkalulla muodostettu ulkolämpötilariippuvainen kaukolämmön tehoprofiili, sekä oikea, mittausdataan perustuva, kaukolämmön tehoprofiili vuonna 2021. Kuvaajista nähdään, että ne pääasiassa kaukolämpöjärjestelmän tehoprofilointi on onnistunut, sillä kuvaajat seurailevat toisiaan melko hyvin. Huippukulutuspiikit ovat nähtävissä ja huomattavasti pienempi tuotantotarve havaittavissa samoina ajanhetkinä. Kuvaajista voidaan kuitenkin havaita myös eroavaisuuksia, joista merkittävimpana muutamat piikit, joissa profiilin perusteella tuotanto olisi huomattavasti pienempi tai suurempi, kuin todellisuudessa on ollut.



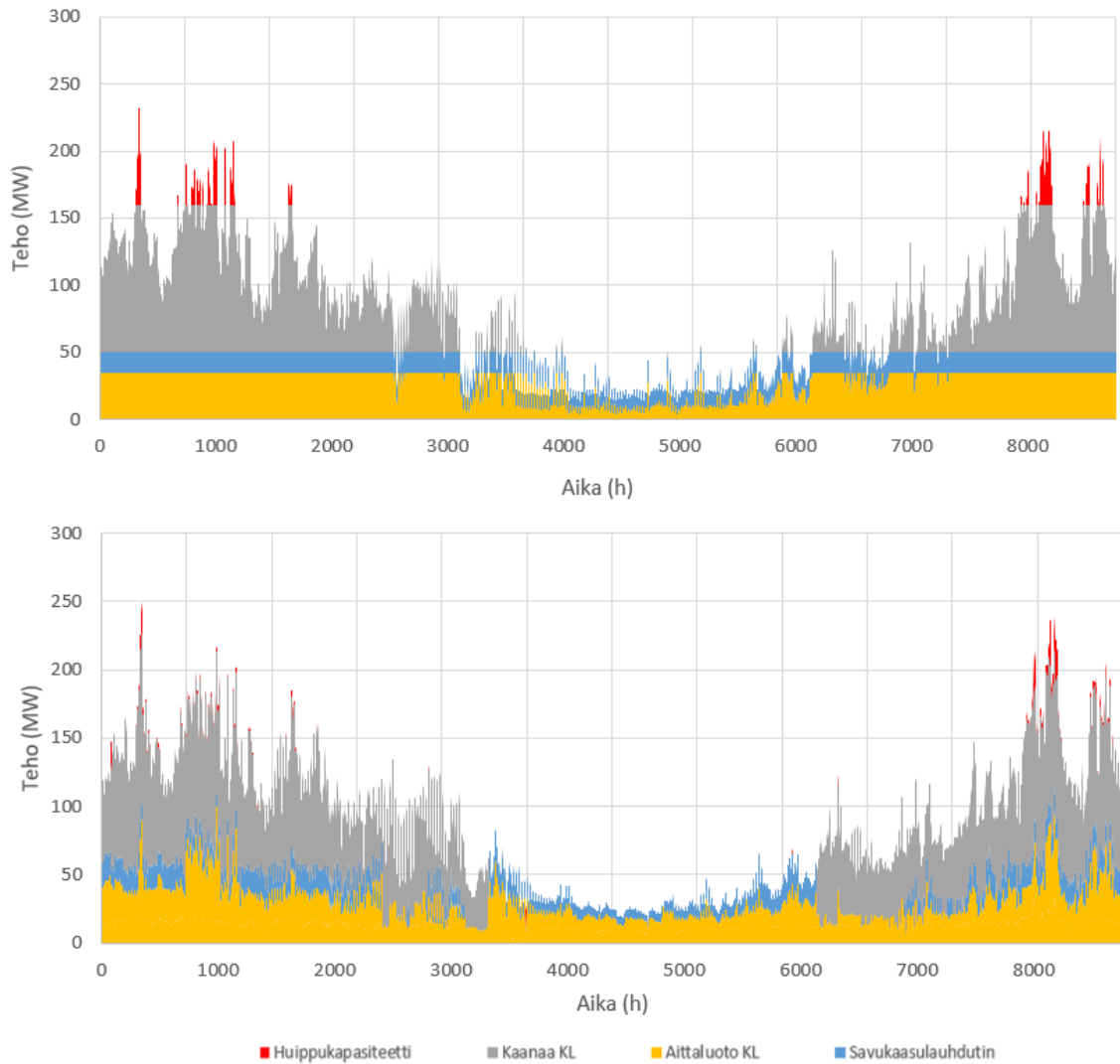
**Kuva 25** Kaukolämpöjärjestelmälle muodostettu tehoprofiili (yllä) sekä kaukolämpöjärjestelmän todellinen kaukolämmön hetkellinen tuotanto (alla) ajan funktiona

Tuloksen perusteella voidaan kuitenkin todeta, että luodulla mallilla voidaan melko realistisesti ennustaa hetkellistä kaukolämmön tuotantomäärää ja työssä luotu menetelmä on kyseiseen käyttötarkoitukseen sopiva. Kuitenkin tulee huomioida, että malli pohjautuu mittausdataan, joten jos kaukolämpöjärjestelmän asiakaskunta suurenee tai pienenee merkittävästi, tulee laskentamallin sovitteet päivittää. Vertaamalla työssä luotua kaukolämpöjärjestelmän profilointimenetelmällä saatuja tuloksia Bühler et al. [47] tutkimuksessa käytettyyn kaukolämpöjärjestelmän profilointimenetelmällä muodostettuun profiiliin, voidaan todeta, että työssä luodulla menetelmällä saadaan vastaavanlaisesti luotettavia tuloksia, vaikka profiili on luotu vain ulkolämpötilariippuvaiseksi. Sillä vastaavalla tavalla, kuin Bühler et al. [47] tutkimuksessa, on keinotekoinen profiili suunnilleen todellinen ja vuodenajat ovat samaa suuruusluokkaa. Näin ollen työssä luotu yksinkertaisempi malli soveltuu hyvin käytettäväksi kaukolämpöyhtiössä alustavaan hukkalämpöjen

hyödynnettävyyteen liittyvään arviointiin, sillä energiayhtiöiltä tyypillisesti löytyy mittausdataa, joiden pohjalta voidaan luoda menetelmän mukaiset sovitteet (vrt. kuva 18).

Kaukolämmön tuotantomäärän lisäksi kaukolämmöntuotannon jakautuminen voimalaitoksille ajan funktiona selvitettiin, jotta pystytään tekemään tarkempi analyysi, mitä tuotantoa verkkoon syötettävä hukkalämpö korvaisi. Jako suoritettiin tyypillisen ajojärjestyksen perusteella. Kuitenkaan laskennassa ei huomioitu, että Aittaluodossa ja Kaanaassa voidaan hyödyntää huippukulutushetkinä myös öljykattiloita (apukattila ja K4). Laskentatyökalu ei myöskään ota huomioon voimalaitosten revisioita tai vika- ja poikkeustilanteita. On huomioitavaa, että tuotantolaitosten ajotapa on revisioiden ja vika- tai poikkeustilanteiden aikaan erilainen, mutta myös se, että ero tuotantokustannuksessa ei ole kovin merkittävä, mikäli revision tai poikkeusajotilanteen aikana ei lämmön tuotannossa tarvitse hyödyntää öljyä. Kuvassa 26 on esitetty Excel-työkalulla muodostettu tuotannon jakautuminen eri voimalaitoksille, sekä oikea, mittausdataan perustuva kaukolämmön tuotanto voimalaitoksittain vuonna 2021. Lisäksi liitteessä 1 on esitetty tehoprofiiliin perusteella muodostettu vuotuinen tuotantoprofiili kuukauden funktiona.

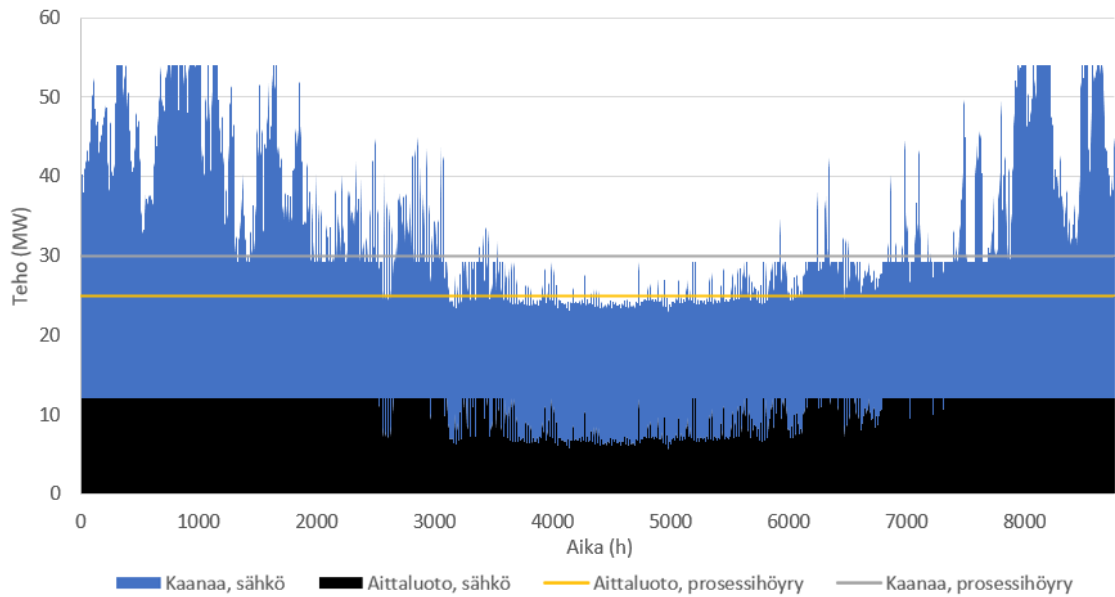
Kuvasta voidaan havaita erityisesti se, että laskentatyökalulla muodostetun mallin mukaan huippulämpökeskuksilla tuotettu kaukolämpöteho on suurempi, kuin se mittausdataan perustuvassa kuvaajassa on. Kuitenkin vastaavissa kohdissa, kuin huippukapasiteetin kaukolämpöteho on isompi laskentatyökalulla luodussa mallissa, kuin se todellisuudessa, voidaan havaita, että mittausdataan perustuvassa kuvassa vastaavasti Kaanaan ja Aittaluodon kaukolämpöteho on suurempi. Eroavaisuus siis johtuu siitä, että laskentatyökalussa ei huomioida apukattilan tai K4:n käyttöä Aittaluodon ja Kaanaan voimalaitoksilla. Kuitenkin apukattilassa ja K4:ssä hyödynnetään polttoaineena kevyttä polttoainetta, vastaavasti kuin huippulämpökeskuksilla, joten tämä ei vaikuta arvioitaessa kaukolämmöntuotannon polttoainejakaumaa ja tuotantokustannusta. Todellisen tuotannon kuvaajasta voidaan myös havaita touko-kesäkuun sekä elo-syyskuun vaihteessa öljynkäytön piikki, joka vaikuttaisi hetkelliseen polttoainekustannukseen merkittävästi. Laskentatyökalun laskentamallissa ei myöskään huomioida savukaasulauhduttimen vaihtelevaa ajotapaa, joka on osakseen riippuvainen sähkön markkinahinnasta, vaan oletetaan sen seuraavan vakio arvoisesti A-kattilan tuotantoa. Tuloksen perusteella voidaan todeta, että tuotantoyksiköittäin luotu tehoprofiili antaa melko hyvän, mutta kuitenkin yksinkertaistetun, käsityksen hetkellisestä tuotannosta.



**Kuva 26** Kaukolämpöjärjestelmälle muodostettu tehoprofiili (yllä), sekä kaukolämpöjärjestelmän todellinen tuotanto (alla) tuotantoyksiköittäin ajan funktiona

Lisäksi sähköntuotannon määrä Aittaluodon ja Kaanaan CHP-laitoksilla selvitettiin ja prosessihöyrylle arvioitiin tuotantomäärät. Työssä oletettiin, että prosessihöyryn tuotanto on vakio arvoista joka ajanhetki, mikä aiheuttaa virhettä tulokseen, sillä todellisuudessa myös prosessihöyryntuotanto vaihtelee tuntitasolla. Lisäksi, kuten Wahlroos et al. [120] mainitsee, olisi kaukolämpöjärjestelmän mallintamisessa oleellista huomioida sähkön hetkellinen markkinahinta ja sen vaikutus CHP-laitoksen ajotapaan. Kuitenkin tässä työssä sähkön tuotanto laskettiin yksinkertaistetusti vain rakennusasteen perusteella, eikä huomioitu sähkön markkinahinnan vaikutuksia sähköntuotantoon, eli esimerkiksi apujäähdytystä markkinahinnan ollessa korkea tai höyryn reduktiota turbiinin ohi markkinahinnan ollessa alhainen. Sähkön ja prosessihöyryn tehoprofiilit voimalaitoksilla on esitetty kuvassa 27.



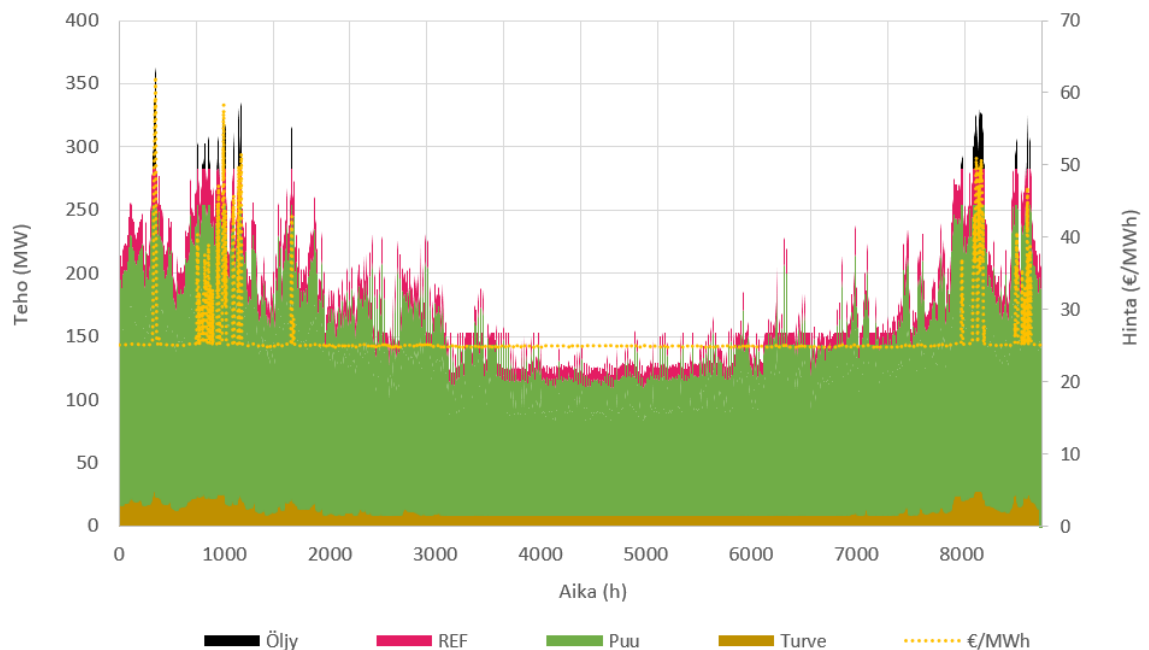


**Kuva 27** Kaukolämpöjärjestelmässä laskentatyökalulla muodostettu prosessihöyryn tuotantoprofiili, sekä sähkön tuotantoprofiili voimalaitoksilla

Todellisuudessa tuotanto, varsinkin sähkön osalta, voi siis olla huomattavasti erilaisempaa, kuin nyt havainnollistetussa profiilissa. Kuitenkin luodun profiilin avulla saadaan karkea arvio siitä, kuinka paljon sähköntuotantokapasiteettia ja niistä saatavia tuloja menettäisiin, mikäli hukkalämpö korvaisi CHP-tuotannolla tuotettua kaukolämpöä, jonka seurauksena kokonaislämmöntuotantoa vähennettäisiin laitoksilla. Kuvien 26 ja 27 mukainen tuotantokokonaisuusmalli antaa siis yksinkertaistetun käsityksen hetkellisestä tuotannosta ja olisi oikeaoppisempaa mallintaa kaukolämpöjärjestelmää huomioiden myös sähkön hetkellinen hinta, kuten Wahlroos et al. [120] Kuitenkin, koska työn tavoite oli muodostaa laskentatyökalu, jonka avulla on mahdollista arvioida alustavasti, nopeasti ja yksinkertaistetusti, hukkalämpöjen hyödynnettävyyttä kaukolämpöjärjestelmässä, soveltuu malli käyttötarkoitukseen, kunhan tuloksissa huomioidaan kriittisesti sähkön hinnan todellinen vaikutus laitosten ajotapaan. Tulosten luotettavuutta tulee siis erityisesti miettiä niissä tilanteissa, kun sähkön hinta voisi olla erityisen alhainen tai korkea. Tarkempien tulosten saavuttamiseksi, tulisi työssä luotua laskentamallia kehittää tai vaihtoehtoisesti tehdä simuloitteja kaupallisten energianoptimointijärjestelmien avulla, vastaavasti kuin Wahlroos et al. [120]

Lisäksi voimalaitosten kokonaislämmöntuotannon pohjalta luotiin polttoainejakauma, sekä muuttuva tuotantokustannus koko kaukolämpöjärjestelmälle. Kaukolämpöjärjestelmän polttoainejakauma ja kokonaistuotantokustannus on esitetty kuvassa 28. Lisäksi liitteessä 2 on esitetty vuotuinen polttoaineprofiili ja keskimääräinen tuotantokustannus kuukauden funktiona. Vuosina 2021–2022 tuotantokokonaisuus ja näin myös polttoaine-

kokonaisuus on muuttunut, jonka takia ei ole tarkoituksenmukaista verrata luotua polttoaineprofiliia viime vuoden mittausdataan. Esimerkiksi vuoden 2021 alussa A-kattilassa hyödynnettiin turvetta, Kaanaassa oli vielä kivihiilikattila käytössä ja kesäaikainen prosessihöyryn tuotanto toteutettiin maakaasukattilalla. Olemassa olevaan tietoon pohjautuen voidaan sanoa, että muodostettu polttoaineprofili vastaa vuoden 2022 polttoainejakaumaa melko hyvin. Tuloksessa tulee kuitenkin huomioida, että polttoainejakauma on laskettu vakio kattilahiötysuhteella, vaikka todellisuudessa osakuorma ajolla kattilahiötysuhde heikkenee. Työssä ei myöskään otettu huomioon eroa teollisuuden puutähteen ja metsähakkeen välillä, vaikka todellisuudessa näillä on usein eri polttoainekustannus. Myös kierrätyspolttoaineen oletettiin vastaavan turpeen hintaa, vaikka todellisuudessa kierrätyspolttoaineen hinta voi vaihdella polttoaineen laadun mukaan, kuin myös päästökerroin (vrt. taulukko 2). Oletukset tehtiin kyseisten polttoaineiden julkisesti saatavilla olevien hinta-arvioiden puutteen takia. Myös hetkellinen polttoainejakauma on oletettu olevan prosentuaalisesti tietynlainen ja todellisuudessa kattiloiden polttoainejakauma voi vaihdella mm. polttoaineiden saatavuuden mukaan. Kuitenkin polttoainejakauma määriteltiin melko realistisesti toteutuneisiin tietoihin pohjautuen. Oletukset vaikuttavat muodostettuun kokonaiskustannukseen ja näin ollen edelleen myös hukkalämmön arvoon.

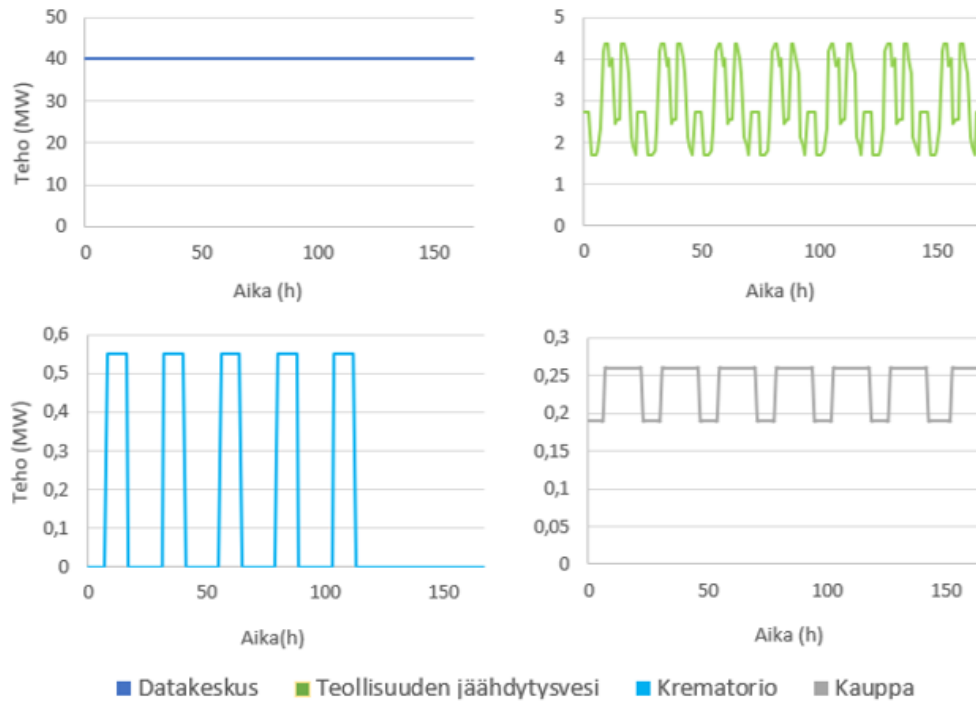


**Kuva 28** Kaukolämpöjärjestelmän profiloitu polttoainejakauma ja tuotantokustannus.

Lisäksi selvitettiin kaukolämpöveden meno- ja paluueden lämpötilaprofiilit jokaiselle aika-askeleelle. Mallissa menoveden hetkittäiset tuntitason lämpötilan muutokset ovat välillä melko isoja. Virhettä aiheuttaa myös sovitteiden epäsymmetrisyys toisiinsa nähden, jonka takia kaukolämpöveden lämpötila ei saa milloinkaan joitakin arvoja. Kuitenkin malli antaa melko realistista tietoa kaukolämpöverkossa virtaavan veden lämpötilasta.

## 6.2 Hukkalämmön lähteiden profiilit

Erilaisten hukkalämmön lähteiden vuotuinen hukkalämpökapasiteetti, sekä hetkellinen hukkalämpövirta selvitettiin eri ajanhetkinä. Hukkalämmönlähteiden tuotantoprofiileissa tulee huomioida, että jokainen teollisuuskohde, kuin myös julkisen- ja palvelusektorin rakennukset ovat todellisuudessa toiminnaltaan ja ominaisuuksiltaan erilaisia, jolloin myös niissä syntyvän hukkalämmön ominaisuudet vaihtelevat merkittävästi. Työssä lasketut hukkalämpömäärät ja niiden perusteella tehdyt profiilit antavat karkeaa suuntaa, kuinka paljon ja millaisella teholla sekä ajoituksella mahdollisesti kohteesta voisi syntyä hukkalämpöä. Kuitenkin tulee huomioida, että laskennat perustuvat teoreettisiin arvoihin ja luvun 3 karakterisoinnin tuloksiin, joten todellisuudessa tilanne voi olla hyvinkin erilainen. Lisäksi on huomioitavaa, että hukkalämpöjen hetkellinen teho- ja lämpötilavaihtelu on tehty työssä melko karkealla arviolla, esimerkiksi työssä ei ole huomioitu tuotannon pysähdyksiä, huoltoja tai lomakausia. Todellisuudessa hukkalämmön muodostuminen voisi siis olla paljon epäsymmetrisempää. Nämä virhelähteet tulee ottaa huomioon hukkalämpöjen hyödynnettävyyttä analysoidessa. Tarkempien tuloksien saavuttamiseksi tarvittaisiin yksityiskohtaisempaa tietoa hukkalämpökohteista. Kuitenkin luotujen hukkalämpökohteiden tehoprofiilien perusteella pystytään tarkastelemaan miten erilaisen kokoluokan ja aikavaihtelun omaavat kohteet sopisivat hyödynnettäväksi. Myös verratessa tämän työn menetelmää Bühler et al. [47] taktiikkaan luoda teollisuuden kohteille hukkalämpöprofiileita, voidaan todeta että on melko validia kirjallisuuden perusteella karakterisoida hukkalämmön lähteitä ja muodostaa näin profiileita, mikäli ei ole olemassa spesifiä mittaustietoa. Kuvassa 29 on esitetty erään viikon (ma-su) aikainen profiloitu hukkalämpövirta tarkasteltavista hukkalämpökohteista. Lukuun ottamatta kaupan hukkalämpövirtaa, on kohteiden vuotuinen tehoprofiili kuvan 29 mukainen (vrt. luku 5.3).



**Kuva 29** Tarkasteltavien hukkalämmön lähteiden tehoprofiilit yhden viikon ajalta

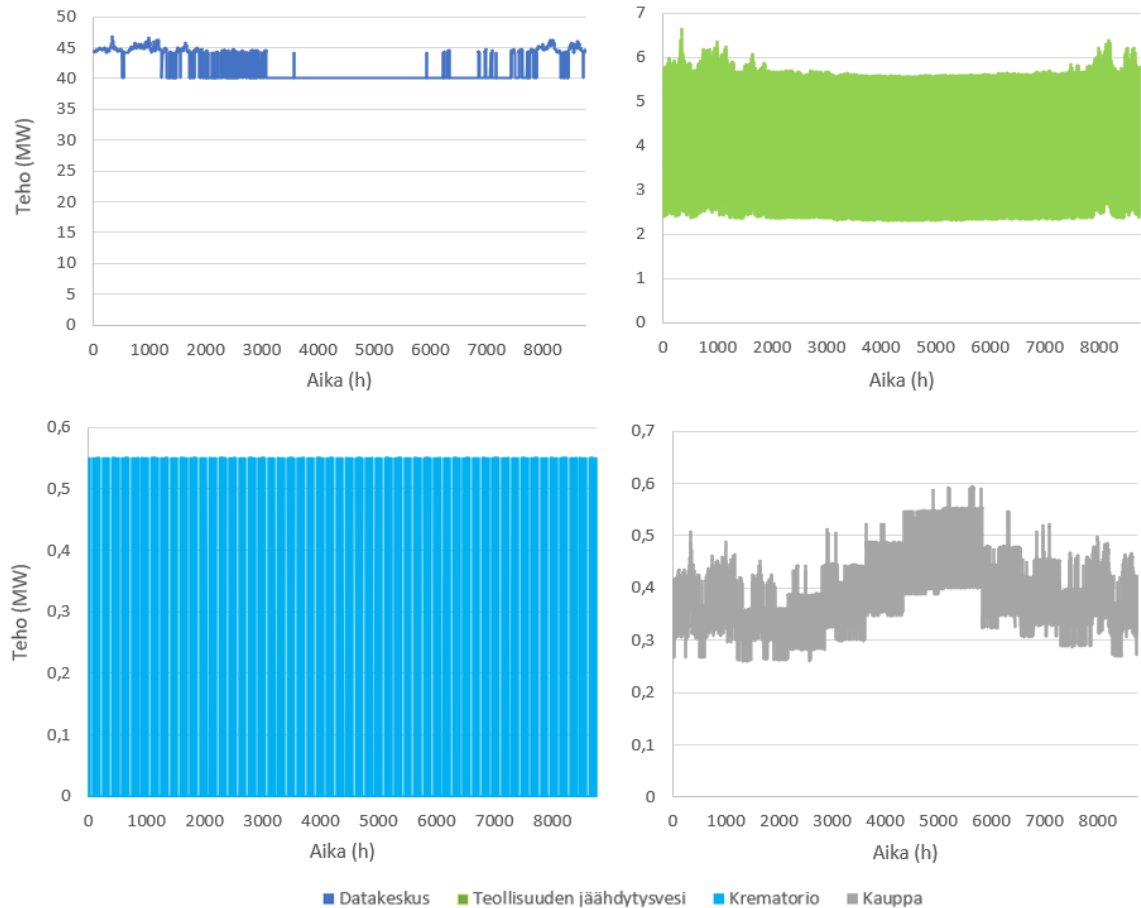
Kuvasta voidaan havaita selkeä ero kohteiden teholuokassa ja tehovaihtelussa. Tehovaihtelun kannalta datakeskus vaikuttaa potentiaalisimmilta, kun taas krematoriossa hukkalämmön saatavuuden vaihtelevuus on merkittävin. Vuotuisen hukkalämpömäärän kannalta datakeskus ja teollisuuden jäähdytysvesijärjestelmä vaikuttavat potentiaalisimmilta kohteilta. Datakeskuksesta hukkalämpöä muodostuisi noin 350 400 MWh/a, teollisuuden jäähdytysvesijärjestelmästä 25 800 MWh/a, krematoriosta 1 290 MWh/a ja kaupasta 2 550 MWh/a. Lisäksi liitteessä 3 on esitetty tarkasteltavien kohteiden vuotuinen tuotantoprofiili kuukauden funktiona. Hukkalämmön lähteiden profiileissa tulee kuitenkin huomioida, että todellisuudessa eri kohteista saatavaa hukkalämpövirtaa voidaan hyödyntää myös kohteen sisällä energiatehokkuustoimenpiteenä, mikäli se on kannattavaa, jolloin kaukolämpöverkkoon hyödynnettävä lämpömäärä olisi pienempi.

## 6.3 Hukkalämpöjen hyödyntäminen kaukolämpöjärjestelmässä

### 6.3.1 Hukkalämpöjen temporaalinen hyödynnettävyys

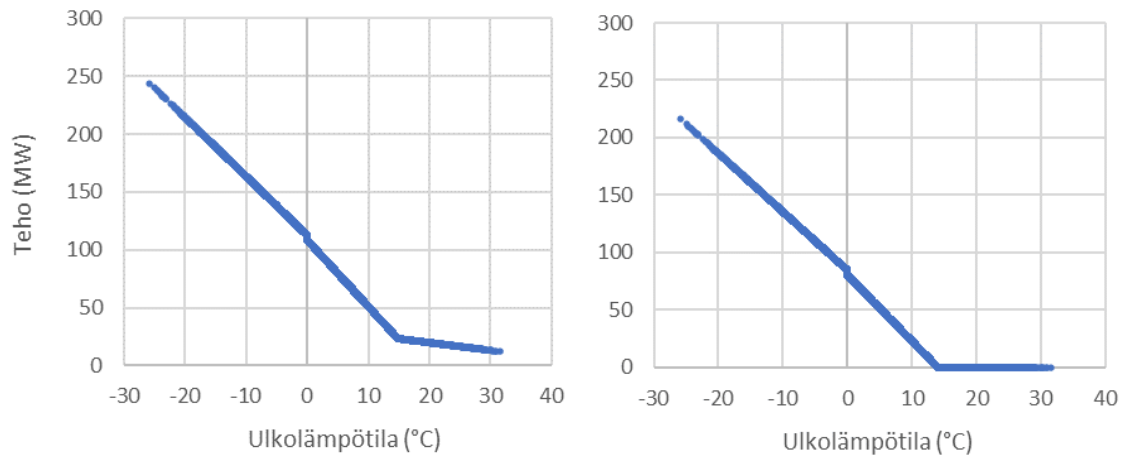
Hukkalämmön lähteen ja verkossa virtaavan kaukolämpöveden lämpötilan perusteella ratkaistiin jokaiselle ajanhetkelle tarvittava hyödyntämisteknologia (lämpöpumppu/lämmönvaihdin). Tämän perusteella datakeskuksen hukkalämpö saataisiin hyödynnettyä 5 508 h/a suoraan lämmönvaihtimella ja 3 252 h/a lämpöpumpulla, teollisuuden jäähdytysvesijärjestelmän ja kaupan hukkalämpö hyödynnettäisiin joka ajanhetki lämpöpumpulla, kun taas krematorion hukkalämpö saataisiin hyödynnettyä suoraan lämmönvaihtimen avulla. Liitteessä 4 on esitetty kuukauden funktiona valittu hyödyntämisteknologia ja kyseisellä teknologialla hyödynnettävä hukkalämpömäärä. Näin ollen erityisesti krematoriosta ja datakeskuksesta saatava hukkalämpövirta vaikuttaa potentiaaliselta. Hyödyntämisteknologian lisäksi selvitettiin teknologian vaikutus (vrt. yhtälö 24) hyödyksi saatavaan lämpövirtaan selvitettiin.

Kuvassa 30 on esitetty hyödyntämisteknologian vaikutus hukkalämpövirtaan. Kuvassa tulee huomioida, että hukkalämmön lämpötila ja kaukolämpöveden lämpötila vaihtelevat, joka edelleen vaikuttaa hetkelliseen COP-arvoon ja hyödyksi saatavaan hukkalämpövirtaan. Kuvasta voidaan havaita datakeskuksen tapauksessa, milloin hyödynnetään lämpöpumppua ja milloin lämmönvaihdinta. Lisäksi kuvasta näkee selkeän eron tehossa teollisuuden jäähdytysvesijärjestelmän sekä kaupan hukkalämmön tapauksessa (vrt. kuva 29). Lisäksi liitteessä 5 on esitetty hukkalämmön lähteiden tuotantoprofiilit kuukauden funktiona, huomioiden hyödyntämisteknologian vaikutus hukkalämpövirtaan. Vertaamalla liitteen 3 ja liitteen 5 kuvaajia voidaan havaita vaikutus selkeästi varsinkin koh-teissa, joissa lämpöpumppua hyödynnetään pääasiassa. Ottamalla huomioon hyödyntämisteknologian vaikutus muodostuvaan hukkalämpömäärään, muodostuu datakeskuksesta hukkalämpöä noin 365 760 MWh/a, teollisuuden jäähdytysvesijärjestelmästä 34 440 MWh/a, krematoriosta 1 290 MWh/a ja kaupasta 3 555 MWh/a.



**Kuva 30** Tarkasteltavien hukkalämmön lähteiden tehoprofiilit, ottaen huomioon hyödyntämisteknologian vaikutus lämpövirtaan, vuoden ajalta

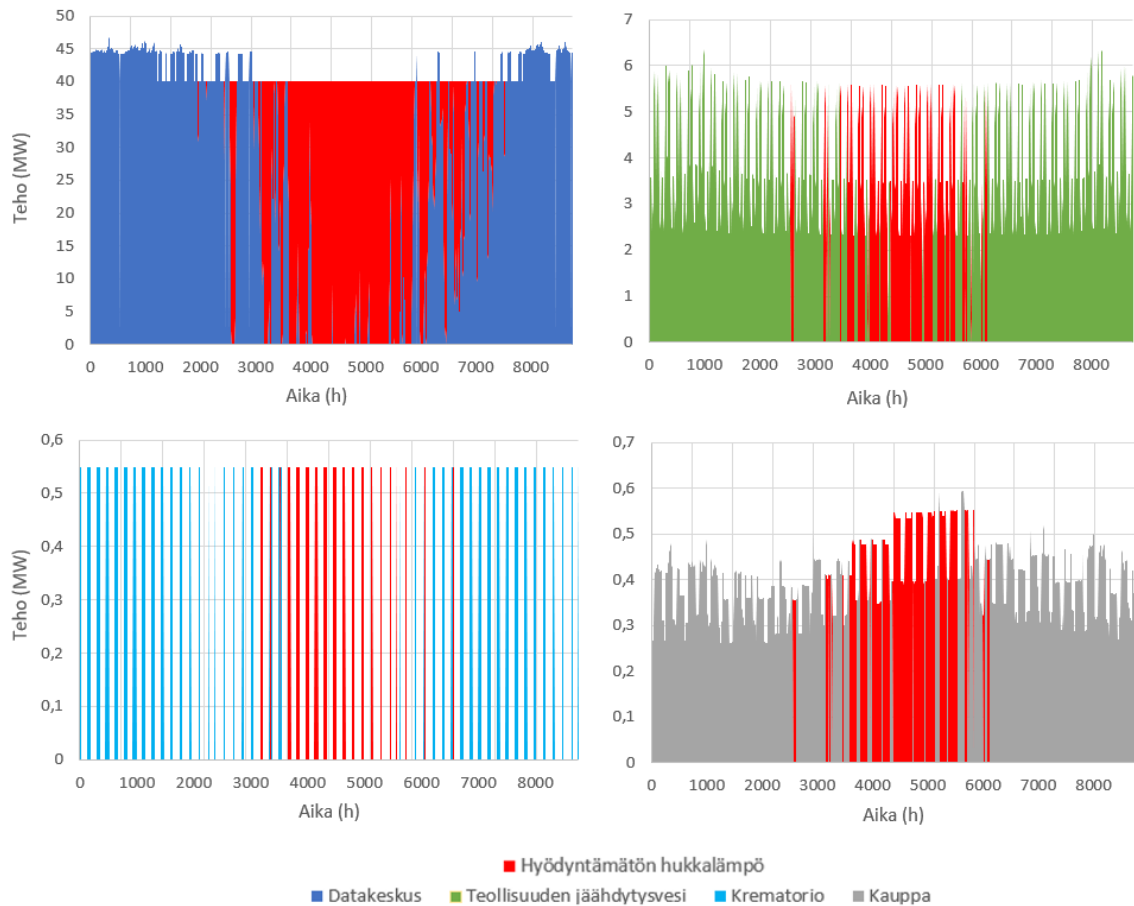
Hyödyntämisteknologian lisäksi hukkalämpöjen ideaalinen hyödynnettävyys (i.e. kysynnän määrittelemä) jokaisella ajanhetkellä selvitettiin. Liitteessä 6 on esitetty verkossa ideaalisesti hyödynnettävä hukkalämpö tarkasteltavista kohteista kuukauden funktiona. Kuitenkaan ideaalinen hyödynnettävyys ei ole kannattavaa nykyisellä tuotantorakenteella. Tämän takia hukkalämpöjen ajalliseen hyödynnettävyyteen liittyvät rajoitteet selvitettiin, jonka pohjalta määriteltiin hukkalämpöjen todellinen hyödynnettävyys, eli verkoon kannattavasti syötettävän hukkalämmön sekä tarvittavan varastointikapasiteetin määrä jokaisella ajanhetkellä. Ideaalista ja todellista hukkalämpöjen hyödynnettävyyttä on havainnollistettu kuvassa 31 ulkolämpötilan funktiona. Kuvasta voidaan havaita, että todellinen hyödynnettävyys on huomattavasti rajallisempi, kuin ideaalinen. Kuvaan 31 pohjautuen selvitettiin myös verkossa todellisesti hyödynnettävän hukkalämmön määrä kuukauden funktiona. Liitteessä 7 on esitetty verkossa todellisesti hyödynnettävä hukkalämpömäärä kuukauden funktiona. Vertaamalla ideaalista hyödynnettävyyttä Bühler et al. [47] tutkimukseen, voidaan todeta, että tulokset ovat melko vastaavia kuin tässä työssä saadut tulokset, eli mikäli vain kaukolämmön kysyntä rajoittaisi hukkalämmön vastaanottoa, saataisiin lähes kaikki hukkalämpö hyödynnettyä.



**Kuva 31** Hukkalämpöjen ideaalinen (vasen) ja todellinen (oikea) hyödynnettävyys

Muodostettu malli todellisesta hyödynnettävyydestä perustuu oletukseen, että voimalaitosten päätuotantokattiloita ajettaisiin niiden minimikapasiteetilla. Oletus on melko realistinen, johtuen jatkuvasta prosessihöyryn tarpeesta, joka toteutetaan CHP-laitoksilla A-kattilalla ja Cymic-kattilalla. Vaihtoehtoisesti prosessihöyryn tuotanto voitaisiin toteuttaa öljyllä tai maakaasulla. Tällöin hukkalämpöjen hyödynnettävyys olisi ideaalinen, sillä esimerkiksi kesällä ei olisi kaukolämmön minimituottotarvetta laitoksilla, vaan kaikki tarvittava kaukolämpö voitaisiin korvata hukkalämmöllä. Kuitenkaan tällä hetkellä ja todennäköisesti myöskään tulevaisuudessa tämä vaihtoehto ei ole potentiaalinen, johtuen energiakriisistä sekä ympäristötavoitteista. Tulee myös huomioida, että kattiloiden ajaminen niiden minimiteholla heikentää laitosten hyötysuhdetta, joten todellisuudessa laitoksia ei välttämättä olisi kannattavaa ajaa näin. Kuitenkin teoriassa tämä on teknisesti mahdollista, mikäli haluttaisiin maksimoida hukkalämmön käyttö.

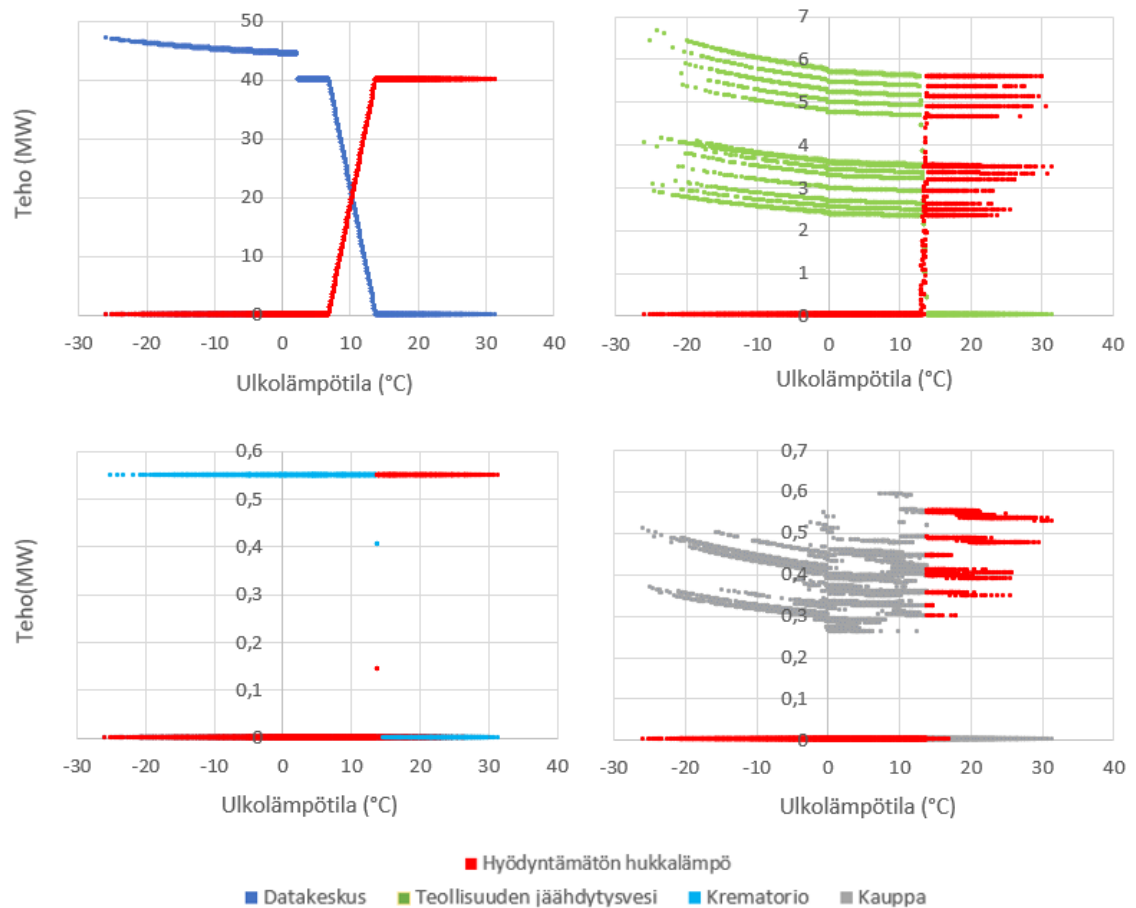
Tarkasteltavien hukkalämmön lähteiden todellinen hyödynnettävyys ja varastointikapasiteetin tarve (i.e. hukkaan menevä osuus tällä hetkellä) on esitetty kuvassa 32. Lisäksi liitteessä 8 on esitetty tehoprofiilien pohjalta luotu hukkalämpöjen todellinen hyödynnettävyys kuukauden funktiona. Kuvasta 32 ja liitteessä 8 esitetystä hyödynnettävyyden kuukausijakaumasta voidaan havaita, että noin toukokuun puolesta välistä syyskuun puoleen väliin hukkalämpöjä ei pystytä hyödyntämään lähes ollenkaan. Talvikuukausina (marraskuu-maaliskuu) hukkalämpö pystytään pääosin hyödyntämään täysitehoisesti. Pienet hukkalämmönlähteet pystytään pääosin hyödyntämään täysitehoisesti kesää lukuun ottamatta, kun taas suurempien hukkalämmön lähteiden hyödynnettävyydessä voidaan havaita selkeästi enemmän tunteja, jolloin hukkalämpöä ei pystytä hyödyntämään sen täydellä teholla.



**Kuva 32** Tarkasteltavien hukkalämpöjen todellinen hyödynnettävyys kaukolämpöjärjestelmässä

Datakeskuksen vuotuisesta hukkalämmöstä pystytään hyödyntämään noin 67 %, teollisuuden jäähdytysveden hukkalämmöstä noin 76 %, krematorion hukkalämmöstä noin 70 % ja kaupan hukkalämmöstä noin 74 %. Näin ollen varastointikapasiteetintarve datakeskuksesta olisi noin 118 930 MWh/a, teollisuuden jäähdytysvesijärjestelmästä noin 8 200 MWh/a, krematoriosta noin 390 MWh/a. ja kaupasta noin 930 MWh/a. Tulosten luotettavuudessa on myös huomioitava se, että todellisuudessa hyödynnettävyys riippuu myös kohteen sijainnista verkosta, sillä esimerkiksi siirtokapasiteetti voi myös rajoittaa hyödynnettävyyttä. Myös Bühler et al. [47] on tutkinut varastointikapasiteetin osuutta hukkalämpöjen hyödyntämisessä kaukolämpöjärjestelmässä, kuitenkin kyseisessä tutkimuksessa ei ole huomioitu mahdollisia tuotantokokonaisuuden asettamia rajoitteita. Tämän takia tässä työssä ajallinen epäsovivuus hukkalämmön lähteen ja kaukolämpöjärjestelmän lämmöntarpeen välillä on huomattavasti isompi. Todellista hyödynnettävyyttä on lisäksi havainnollistettu kuvassa 33 ulkolämpötilan funktiona. Kuvasta voidaan havaita selkeästi hyödyntämis- ”raja-arvon” olevan kaikissa tilanteissa noin 10 °C. Hyödynnettävyys heikkenee suurissa kohteissa asteittain, kun taas pienet kohteet pystytään hyödyntämään täysitehoisesti hyödyntämis- ”raja-arvoon” asti.





**Kuva 33** Tarkasteltavien hukkalämpöjen todellinen hyödynnettävyys ulkolämpötilan funktiona.

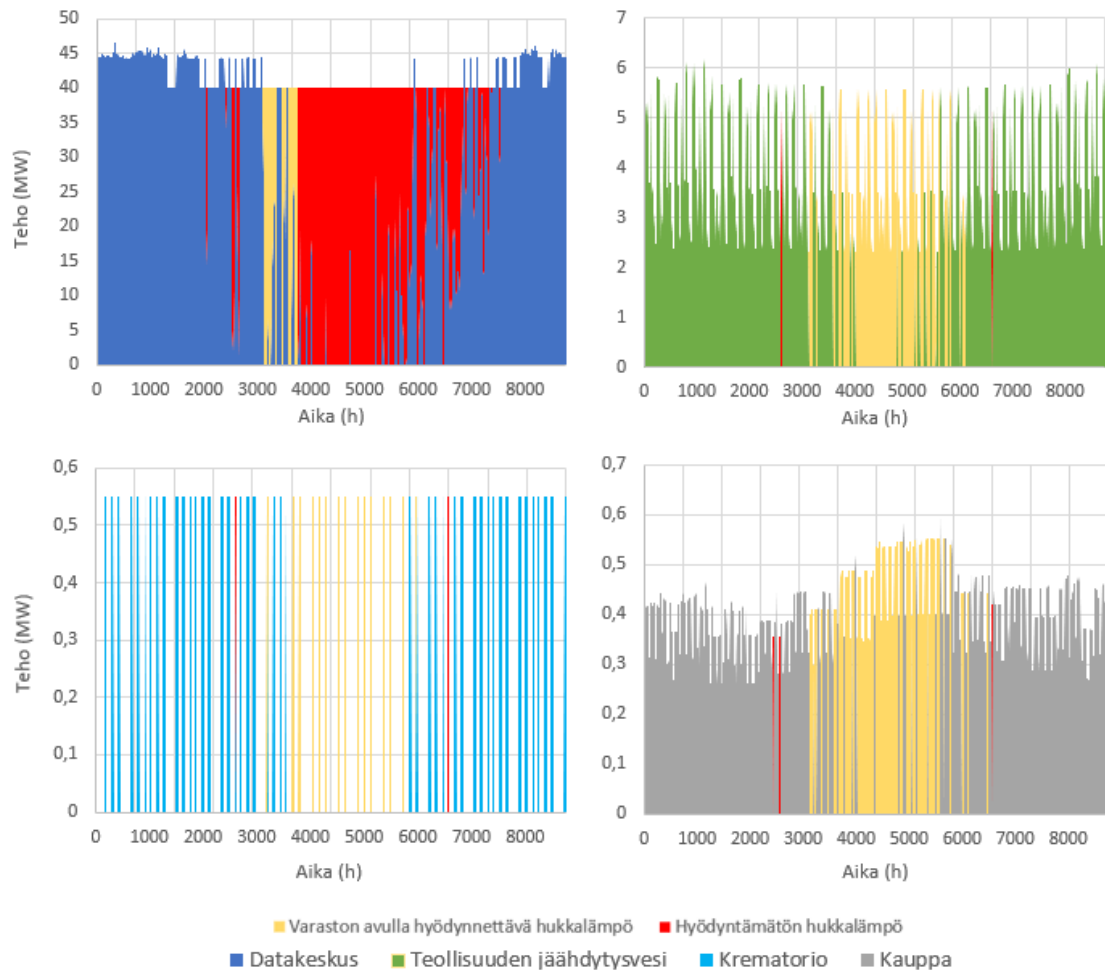
Porin lentoasemalla mitatun ulkolämpötilan perusteella vuonna 2021 noin 3150 h/a lämpötila oli yli 10 °C. Hukkalämpöä pystyttäisiin siis tuotantorakenteen asettamat rajoitteet huomioiden hyödyntämään noin 5610 h/a. Näin ollen tilanteessa, jossa hukkalämpö hyödynnettäisiin johonkin muuhun käyttötarkoitukseen lämpötilan ollessa hyödyntämisen ”raja-arvoa” korkeampi, (esim. kohteen sisäisesti) olisi järkevin kaukolämpöyhtiön näkökulmasta. Vaihtoehtoisesti voitaisiin pyrkiä muokkaamaan nykyistä tuotantokokonaisuutta, niin että voimalaitosten minimikuormat eivät määrittäisi niin suurta osaa kaukolämmön pohjakuormasta, jolloin varsinkin kesäaikainen hukkalämpöjen hyödynnettävyys paranisi. Erityisesti liitettä 6 ja liitettä 8 vertaamalla voidaan havaita, että pienten kohteiden hyödynnettävyys paranisi tuotantorakennetta muokkaamalla huomattavasti ja voisi olla mahdollista, että tarvittava kaukolämpökuorma voitaisiin kesäaikaan tuottaa vain hukkalämpöjen avulla. Isompien kohteiden hyödynnettävyydessä kaukolämpöjärjestelmän koko, eli lämmön kysyntä, kuitenkin rajoittaisi ideaalisessakin tilanteessa hukkalämpöjen hyödyntämistä. Kuitenkin, koska ideaalisen hukkalämpöjen hyödyntäminen vaatisi muutoksia ja investointeja nykyiseen tuotantokokonaisuuteen tai suuria muutoksia asiakasrakenteessa, ei varsinkaan lähitulevaisuudessa hukkalämpöjen ideaalinen hyödyntäminen ole todennäköistä tarkasteltavassa kaukolämpöjärjestelmässä.

Tästä syystä tarkasteltiin miten hukkalämpöjen hyödynnettävyys paranisi, mikäli kaukolämpöjärjestelmä sisältäisi 16,8 GWh kausilämpövaraston. Datakeskuksesta määritellyn varaston kanssa saataisiin hukkaan menevästä hukkalämmöstä hyödynnettyä vain noin 14 %. Kausivarastolla kokonaishyödynnettävyys paranisi näin ollen 72 %. Määritellyllä lataussykillä saataisiin vain toukokuun hukkaan menevä osuus ja osa kesäkuun hukkalämmöstä varastoitua. Kuitenkin kyseisellä määrällä saataisiin lämmityskaudella korvattua huippukapasiteetin, eli öljyn käyttö (15 750 MWh), sekä huomattava määrä CHP-tuotantoa. Teollisuuden jäähdytysvedestävaraston avulla saataisiin hyödynnettyä hukkaan menevästä hukkalämmöstä lähes kaikki. Varaston kanssa kokonaishyödynnettävyys olisi noin 99 %. Myös krematoriosta ja kaupan hukkalämmön kokonaishyödynnettävyys olisi kausivarastolla noin 99 %. Taulukkoon 9 on koottu hukkalämpöjen hyödynnettävyyttä koskevat tulokset erilaisissa tilanteissa. Taulukossa on esitetty kohteessa syntyvä hukkalämpömäärä  $E_{HL}$  sekä hyödyntämisteknologian vaikutus siihen  $E_{HL,tod}$ . Lisäksi taulukossa on esitetty, kuinka suuri osuus ideaalisesti saataisiin hyödynnettyä  $\delta_{ideal}$ , kuinka paljon nykyisellään saadaan hyödynnettyä  $\delta_{tod}$ , sekä miten kausilämpövarasto vaikuttaisi hyödynnettävyyteen  $\delta_{TES}$ .

**Taulukko 9** Hukkalämpöjen hyödynnettävyys kaukolämpöjärjestelmässä

Hukkalämmön lähde	$E_{HL}$ (MWh/a)	$E_{HL,tod}$ (MWh/a)	$\delta_{ideal}$ (%)	$\delta_{tod}$ (%)	$\delta_{TES}$ (%)
Datakeskus	350 400	395 760	89	67	72
Teollisuuden jäähdytysvesi	25 800	34 440	100	76	99
Krematorio	1 290	1 290	100	70	99
Kauppa	2 550	3 555	100	74	99

Kuvassa 34 on havainnollistettu kausivaraston vaikutusta hukkalämpöjen hyödynnettävyyteen vuoden ajalta. Todellisuudessa varastoa voitaisiin pystyä purkamaan useammin sekä lataamaan myös lämmityskaudella, mikäli hukkalämpöä jäisi ylitse ja verkossa ei olisi samanaikaisesti tarvetta varaston purulle. Näin ollen hukkalämmöistä voitaisiin todellisuudessa pystyä hyödyntämään myös suurempi jae. Kuitenkin esimerkiksi datakeskuksesta hukkaan menevä hukkalämpö niin suurta, että kaikkea ei millään saataisi hyödynnettyä.



**Kuva 34** Tarkasteltavien hukkalämpöjen hyödynnettävyys kaukolämpöjärjestelmässä kausivaraston avulla

Lisäksi liitteessä 9 on esitetty kuukauden funktiona määritellyn varaston avulla varastoitava ja myöhempanä ajanhetkenä hyödynnettävä hukkalämpö, hukkaan menevä hukkalämpö, sekä verkkoon suoraan kyseisellä ajanhetkellä syötettävä hukkalämpö. Lukuun ottamatta datakeskusta voidaan havaita selkeä hyöty, mikäli kaukolämpöjärjestelmä sisältäisi kausivarastointiratkaisun.

### 6.3.2 Hukkalämpöjen taloudellinen hyödynnettävyys

Hukkalämpöjen hyödyntämisestä syntyvät kiinteät ja muuttuvat kustannukset selvitettiin. Varaston hankinta kustannus olisi noin 5 054 830 €, tuloksessa on kuitenkin huomiotava, että todelliset investointikustannukset riippuvat paljon varaston tyypistä ja ympäristöstä. Suomalaisten hankkeiden perusteella kuvan 23 funktioilla saadut investointikustannukset ovat esimerkiksi Helsingin Mustikkamaalle rakentuvan luolalämpövaraston tapauksessa selvästi alakanttiin, kun taas Vaasan Vaskiluodossa sijaitsevan lämmön kausivaraston investointikustannus vastaisi melko hyvin toteutuneita kustannuksia [118] [121]. Luotettavampien tulosten saamiseksi voisi tulevaisuudessa muodostaa varaston

tyypin perusteella olemassa olevien investointikustannusten perusteella kuvan 23 mukaiset investointikustannusfunktiot.

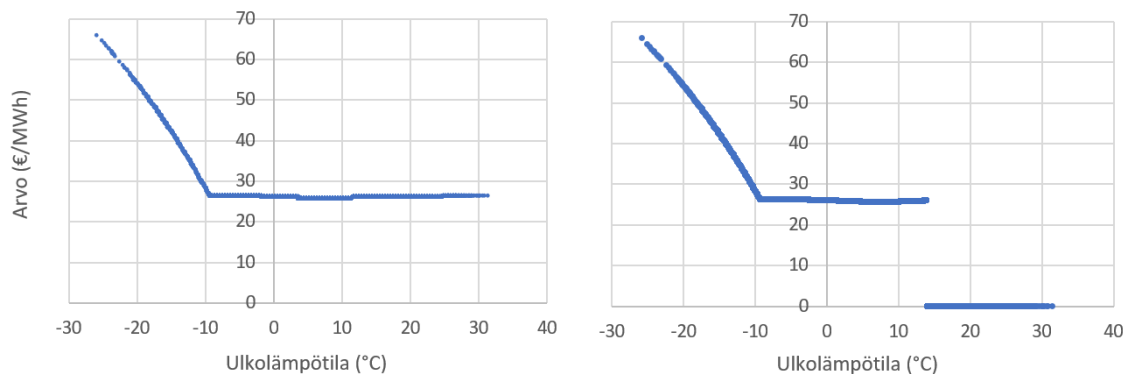
Taulukkoon 9 on koottu hyödyntämisteknologian kokonaiskustannukset, sisältäen investoinnin, huollon sekä lämpöpumpun tapauksessa sähkön tarpeen. Hyödyntämisestä syntyvät kokonaiskustannukset on esitetty hyödynnettävää energiamäärää kohden. Syntyvät kustannukset antavat suuntaa sille, minkä suuruinen tehomaksu voisi olla, mikäli kaukolämpöyhtiö investoisi kohteeseen. Kustannuksissa tulee huomioida, että hukkalämmön lähteiden profiloinnissa lämpötila oletukset tehtiin melko karkeasti. Sillä lämpötila oletukset vaikuttavat esimerkiksi COP-arvoon, joka edelleen vaikuttaa lämpöpumpun sähkön tarpeesta syntyviin kustannuksiin. On myös huomioitavaa, että laskennassa käytetyt COP-sovitteet ovat vain suuntaa antavia, sillä työssä ei ole huomioitu lämpöpumpussa käytettävää kylmäainetta tai hukkalämmön lähteen olomuodon vaikutusta COP-arvoon tarkemmin.

**Taulukko 10** Hukkalämpöjen hyödyntämisestä muodostuvat kustannukset (sähkön hinta skenaariolla 25 €/MWh) verkkoon syötettävää energiamäärää kohden.

Hukkalämmön lähde	LP €/MWh	LV €/MWh	KL-verkko €/MWh	Yhteensä €/MWh
Datakeskus	13,96	6,70	0,73	21,39
Teollisuuden jäähdytysvesi	29,73	-	2,69	32,42
Krematorio	-	5,41	59,51	64,92
Kauppa	39,24	-	7,73	49,97

Taulukon 11 voidaan havaita, että kustannuksiin vaikuttaa voimakkaasti kohteesta saatava kokonaishukkalämpömäärä suhteessa investointiin, sekä hukkalämpökohteen etäisyys verkosta. Taulukon arvoista voidaan havaita, että hyödynnettävään energiamäärään nähden krematorio olisi hyödyntämisteknologialtaan potentiaalisin, jonka jälkeen datakeskus. Puolestaan verkkoon vaadittavien investointien kannalta krematorio olisi kannattamattomin, kun taas datakeskus potentiaalisin. Taulukon tietojen pohjalta voidaan todeta, että datakeskuksesta saatava hukkalämpö olisi hyödyntämiskustannuksiltaan potentiaalisinta. Taulukon tuloksista voidaan päätellä, että yleistä perusmaksu hinnoittelua mietittäessä, tulisi perusmaksu määritellä tietyn laskentamallin avulla, joka perustuisi etäisyyteen (km) sekä hukkalämmön lähteen tehoon (MW).

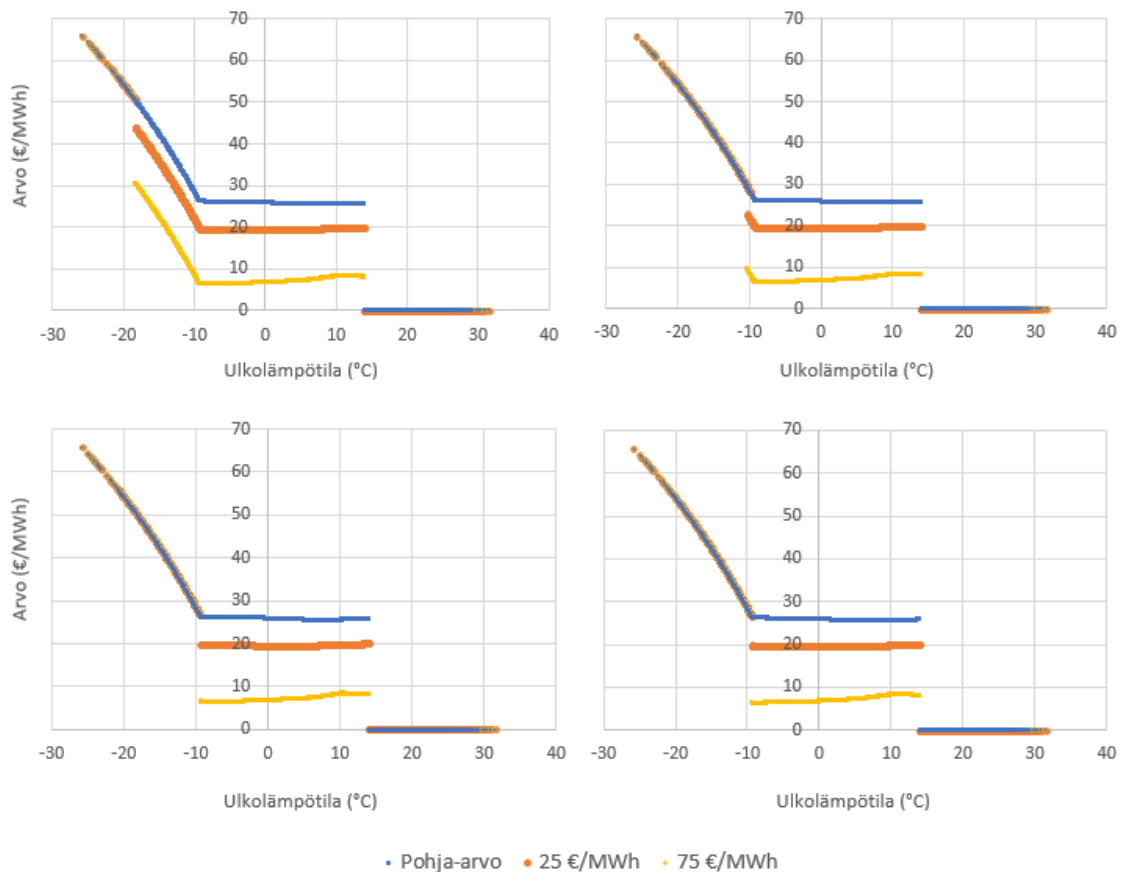
Hukkalämmön hyödyntämisestä syntyvien kustannusten lisäksi hukkalämmön taloudellinen arvo ulkolämpötilan funktiona selvitettiin. Taloudellinen arvo antaa arviota sille, kuinka paljon energiamaksua voitaisiin hukkalämmön tuottajalle maksaa eri ajanhetkinä. Hukkalämmön pohja-arvoksi määriteltiin kaukolämpöjärjestelmän muuttuva tuotantokustannus, huomioiden todellinen hyödynnettävyys (vrt. kuva 31), eli mikäli hukkalämpöä ei tällä hetkellä todellisesti pystytä hyödyntämään on arvo nolla. Kuvassa 35 on esitetty pohja-arvo hukkalämmölle ulkolämpötilan funktiona. Kuvassa tulee huomioida, että mikäli polttoaineiden hinnat tai päästöoikeuden hinnat nousevat, tai laskevat huomattavasti, on vaikutus pohja-arvoon merkittävä.



**Kuva 35** Kaukolämpöjärjestelmän muuttuva tuotantokustannus ulkolämpötilan funktiona (vasemmalla) sekä sen pohjalta hukkalämmölle hyödynnettävyyden perusteella asetettu pohja-arvo (oikealla) ulkolämpötilan funktiona

Pohja-arvon perusteella hukkalämpövirran arvo olisi noin 25 €/MWh ulkolämpötilan ollessa yli -10 °C, mikäli hukkalämpöä pystytään kaukolämpöjärjestelmän rajoitteet huomioon ottaen hyödyntämään. Yli +10 °C esiintyvä hukkalämpö ei ole taloudellisesti potentiaalisesti hyödynnettävissä kaukolämpöjärjestelmässä, johtuen kaukolämpöjärjestelmän nykyisestä tuotantorakenteesta. Lämpötilan ollessa yli -10 °C korvautuu verkkoon syötettävä hukkalämpö CHP-tuotantoa. Ulkolämpötilan ollessa alle -10 °C alkaa kustannuskäyrä nousemaan jyrkästi, johtuen suurenevasta huippukapasiteetista, eli öljyn, käytöstä. Lämpötilan ollessa alle -10 °C hukkalämpö korvautuu ajoituksesta ja hukkalämpövirran suuruudesta riippuen huippukapasiteettia tai huippukapasiteettia sekä CHP-tuotantoa. Koska korvautuu CHP-tuotantoa hukkalämmöllä, menetettäisiin sähköntuotannosta saatavia tuloja, selvitettiin myös, miten sähkön markkinahinta vaikuttaa hukkalämmön arvoon, niinä ajanhetkinä, kun hukkalämpö korvautuu CHP-tuotannolla tuotettavaa kaukolämpöä.

Kuvassa 36 on esitetty sähkön markkinahinnan vaikutukset tarkasteltavien hukkalämmön lähteiden arvoon ulkolämpötilan funktiona. Lisäksi liitteessä 10 on esitetty tarkasteltavien hukkalämmön lähteiden keskimääräinen arvo kuukauden funktiona eri sähkön hinta -skenaarioilla. Kuvasta voidaan havaita ulkolämpötila raja-arvot, milloin hukkalämpö korvaisi CHP-tuotantoa, milloin CHP-tuotanto sekä huippukapasiteettia, sekä milloin vain huippukapasiteettia. Kuvasta voidaan havaita, että lämpötilavälillä -10 - +14 °C hukkalämpö korvaisi CHP-tuotantoa, ja hukkalämmön lähteen koosta riippuen ulkolämpötilan ollessa alle -10 °C hukkalämpö korvaisi joko vain huippukapasiteettia (pienet kohteet), tai huippukapasiteettia sekä CHP-tuotantoa (suuret kohteet). Kuvassa tulee huomioida, että johtuen laskentatavasta, jolla sähkötappio on laskettu (i.e. verkkoon syötettyä hukkalämpöä kohden), käyttäytyy arvokäyrä "raja-arvo" -lämpötilaa lähestyessä nousevasti, vaikka todellisesti arvoa kuvaisi paremmin vakio arvoinen arvokäyrä.



**Kuva 36** Tarkastellun datakeskuksen (vasen ylä), teollisuuden jäähdytysvesijärjestelmän (oikea ylä), krematorium (vasen ala), sekä kaupan (oikea ala) hukkalämmön arvo kaukolämpöjärjestelmässä eri sähkön hintaskenaarioilla

Tulosten perusteella kaikki tarkastellut hukkalämpökohteet ovat yhtä epäpotentiaalisia, kun ulkolämpötila on yli +14 °C. Kun taas lämpötilavälillä -10 °C - +14 °C ja sähkön markkinahinnan ollessa alle 100 €/MWh, mikäli otetaan huomioon hyödyntämisestä syntyvät kiinteät ja muuttuvat kustannukset sekä hyödyntämispotentiaalinen, olisi datakeskus potentiaalisin, kunhan hukkalämmön hinnoittelu on tehty sähkön markkinahinnasta riippuvaiseksi. Datakeskuksen jälkeen potentiaalisin olisi teollisuuden jäähdytysvesijärjestelmän hukkalämpö, jonka jälkeen edelleen kaupan ja krematorion hukkalämpö. Kun ulkolämpötila olisi -10 °C - -20 °C datakeskus olisi potentiaalisin, mikäli sähkön markkinahinta olisi alle 100–200 €/MWh kyseisellä ulkolämpötilaskaalalla ja hukkalämmöstä maksettava hinta olisi tehty sähkön markkinahinnasta riippuvaiseksi. Mikäli näin ei ole, olisi potentiaalisin teollisuuden jäähdytysvesijärjestelmän hukkalämpö, jonka jälkeen edelleen kaupan ja krematorion hukkalämpö, riippumatta sähkön hinnasta. Kaikki tarkastellut kohteet ovat riippumattomia sähkön markkinahinnasta, kun ulkolämpötila on alle -20 °C. Tällöin yksikkökustannusten ja hyödyksi saatavan energiamäärän perusteella potentiaalisin olisi datakeskus, jonka jälkeen edelleen teollisuuden jäähdytysvesijärjestelmä, kauppa ja krematorio.

Hukkalämmön potentiaalisessa hyödyntämisessä on näin ollen tärkeää määritellä hukkalämmön teho ja ajoitus sekä tuotanto, jota hukkalämpö korvaisi, jotta hukkalämpöä pystytään hyödyntämään taloudellisesti. Tämän perusteella on siis myös selitettävissä se, että jotkut energiayhtiöistä [10] [12] määrittelee julkisille ostohinnoille tehorojoituksia. Tulosten perusteella voidaan todeta, että mikäli hukkalämmöllä saadaan korvattua öljyn käyttöä, on hukkalämmön hyödyntäminen aina taloudellisesti kannattavaa. Kun taas hukkalämmön korvatussa yhteistuotannolla tuotettua kaukolämpöä, on kannattavuus vahvasti riippuvainen sen hetkisestä sähkön hinnasta. Pääsääntöisesti lämpötilaväleillä -10 - +14 °C esiintyvä hukkalämpö on lähteestä riippumatta potentiaalisesti hyödynnettävissä, kunhan sähkön markkinahinta on alle 100 €/MWh. Kun ulkolämpötila on alle -10 °C pienen teholuokan lähteet (< 1 MW) ovat potentiaalisempia, mikäli sähkön hinta on korkea (~ 100–200 €/MWh), mikäli sähkön hinta on alhainen, ovat suuremman teholuokan kohteet potentiaalisempia suuremman potentiaalisen ansiosta. Sähkön hinnan ollessa korkea hukkalämpöä kannatta taloudellisessa mielessä hyödyntää korvaamaan vain huippukapasiteettia. Hukkalämmön lähteiden syöttöä verkkoon tulisi näin ollen optimoida sähkön markkinahinnan perusteella. Luodessa hinnoittelumallia hukkalämmöille, tulisi eri teholuokan hukkalämpökohteille muodostaa hinnoittelumallit korvaavan tuotannon perusteella. Korvatussa yhteistuotantoa tulisi maksettavan hinnan olla riippuvainen sähkön markkinahinnasta, kun taas korvatussa lämpökeskusten tuotantoa, voisi hinnoittelu olla riippuvainen vain kaukolämpöjärjestelmän muuttuvasta tuotantokustannuksesta.

## 7. YHTEENVETO

Työssä selvitettiin, miten hukkalämpö olisi hyödynnettävissä Pori Energian kaukolämpöjärjestelmässä. Työ antaa suuntaa kohdeyritykselle siitä, miten hukkalämmön hyödyntäminen olisi kaupallisesti perusteellisesti mahdollista tarkasteltavassa kaukolämpöjärjestelmässä. Työssä kehitetyn menetelmän ja laskentatyökalun avulla voidaan tuntitasolla melko luotettavasti muodostaa hukkalämmön hyödyntämistä koskevat temporaaliset ja ekonomiset ratkaisut tarkasteltavassa kaukolämpöjärjestelmässä. Kaukolämpöjärjestelmän toiminnan perusteella saadaan selvitettyä erilaisten teoreettisen hukkalämmön lähteiden suuntaa antava hyödynnettävyys, aiheutuvat kustannukset sekä hukkalämmön tuottajalle hukkalämmöstä maksettava hinta. Lisäksi laskentatyökalu mahdollistaa sen, että myöhemmin voidaan analysoida todellisten hukkalämpöjen hyödynnettävyyttä, esimerkiksi mittausdataan pohjautuen, tai luoda uusia profiileita, jotka kuvaavat spesifimmin hukkalämmön lähteitä. Myös erilaisten muuttujien, kuten polttoaineiden hinnannousu, polttoainejakauman muutokset tai sähkön hinnan kehitys, vaikutuksia hukkalämmöstä maksettavaan hintaan ja hukkalämpöjen hyödynnettävyyden kannattavuuteen voidaan tarkastella laskentatyökalun avulla. Työn avulla saadaan parempi ymmärrys muuttujista, jotka rajoittavat hukkalämpöjen hyödyntämistä kaukolämpöjärjestelmissä.

Työssä tutustuttiin kaukolämpöjärjestelmän toimintaan sekä erilaisiin hukkalämmön lähteisiin ja niiden ominaisuuksiin. Kaukolämpöjärjestelmälle muodostettiin ulkolämpötilariippuvainen teho- ja lämpötilaprofiili vuoden jokaiselle tunnille Pori Energian mittausdatan sekä Ilmatieteenlaitoksen ulkolämpötiladatan avulla. Lisäksi teorian pohjalta määriteltiin neljälle erilaiselle hukkalämmön lähteelle (datakeskus, teollisuuden jäähdytysvesi, krematorio ja kauppa) aika- ja lämpötilavaihtelu, jonka pohjalta luotiin hukkalämmön lähteitä kuvaavat teho- ja lämpötilaprofiilit. Hyödynnettävyyteen liittyvät rajoitteet ja ratkaisut muodostettiin teho- ja lämpötilaprofiileita vertaamalla. Työssä selvitettiin kaukolämmön kysynnän rajoittaman hukkalämmön määrä (ideaalinen), sekä tuotantorakenteen asettamien vaatimusten rajoittaman hukkalämmön määrä (todellinen) ja tarkasteltiin miten hukkalämpöjen hyödynnettävyys muuttuisi, mikäli kaukolämpöjärjestelmä sisältäisi kausivastointiratkaisun. Lisäksi selvitettiin hukkalämpöjen hyödyntämisestä syntyvät kiinteät ja muuttuvat kustannukset, sekä muuttuvaan tuotantokustannukseen perustuva arvo hukkalämmölle, joiden pohjalta arvioitiin perusmaksukomponentin suuruutta ja hukkalämmöstä hukkalämmön tuottajalle maksettavaa energiahintaa.



Tulosten perusteella Pori Energian kaukolämpöjärjestelmässä kaukolämmön tarve sekä nykyinen tuotantorakenne rajoittavat hukkalämpöjen hyödyntämistä. Ideaalisessa tilanteessa alle 10 MW hukkalämmöt pystyttäisiin hyödyntämään sataprosenttisesti ja suuremman teholuokan lähteet lähes kokonaan. Ideaalinen hukkalämpöjen hyödyntäminen ei kuitenkaan ole tällä hetkellä mahdollista. Tällä hetkellä hukkalämpöä ei ole kannattavaa hyödyntää, kun ulkolämpötila on yli +14 °C, johtuen tuotantokokonaisuuden asettamista rajoitteista. Ulkolämpötilan ollessa -10 °C - +14 °C hukkalämpö korvaisi lämmön- ja sähkön yhteistuotantolaitoksilla tuotettua kaukolämpöä. Tämän takia hukkalämmön kannattava hyödyntäminen ja arvo on kyseisellä lämpötilaskaalalla voimakkaasti riippuvainen sähkön markkinahinnasta, sillä vähentämällä yhteistuotantolaitoksen lämmöntuotantoa, myös sähköntuotannon kokonaispotentiaali pienenee. Sähkön markkinahinnan ollessa alle 100 €/MWh hukkalämpöä olisi kannattavaa hyödyntää ja siitä maksettava hinta hukkalämmön tuottajalle voisi olla 25–0 €/MWh. Pääosin kun ulkolämpötila on alle -10 °C hukkalämpö korvaisi huippukapasiteettia (i.e. öljyä), jolloin hukkalämmön hyödyntäminen olisi aina kannattavaa ja sen arvo voisi olla ulkolämpötilasta riippuen 25–60 €/MWh

Lämmön kausivarastointiratkaisun avulla mahdollistettaisiin hukkalämpöjen täysipainotteisempi hyödyntäminen. Erityisesti pienemmät hukkalämmön lähteet olisivat hyödynnettävissä paremmin, mikäli kaukolämpöjärjestelmä sisältäisi kausilämpövaraston. Suurempien hukkalämpökohteiden täysimittaiseen hyödyntämiseen tarvittaisiin kausilämpövarasto, sekä muutoksia tuotantorakenteessa, sillä nykyisellään suuren teholuokan hukkalämpöjen hyödyntämispotentiaali on niin rajallinen, että kausilämpövarastollakin saataisiin hyödynnettyä vain pieni osa kokonaispotentiaalista. Tulevaisuudessa hukkalämpöjen hyödynnettävyyden parantamiseksi tulisi selvittää erilaisia ratkaisuja, jotka mahdollistaisivat hukkalämpöjen hyödyntämisen mahdollisimman ideaalisesti. Näin ollen tulevaisuudessa kannattaisi selvittää olisiko muutoksia tuotantorakenteessa taloudellisesti kannattavaa tehdä, sekä selvittää kaukolämpöjärjestelmään sopivia kausivarastointiratkaisuja. Erilaisia ratkaisuita hukkalämpöjen parempaan hyödynnettävyyteen kannattaisi harkita varsinkin, mikäli polttoaineiden hinnat nousevat tai saatavuus vaikeutuu vallitsevan energiakriisin seurauksena, sekä myös siinä tapauksessa, mikäli sähkön hinta laskee voimakkaasti. Myös ilmastotavoitteiden kiristyessä täysin hiilineutraalia tuotantoa tavoitellessa ja polttoon perustuvasta lämmöntuotannosta eroon haluttaessa kasvaa hukkalämmön taloudellinen arvo kaukolämpöjärjestelmässä merkittävästi.

## LÄHTEET

- [1] Suomen virallinen tilasto (SVT): Kasvihuonekaasut [verkkojulkaisu]. ISSN=1797–6049. 2020, Suomen kasvihuonekaasupäästöt 2020. Helsinki: Tilastokeskus [viitattu: 15.9.2022]. Saatavissa: [http://www.stat.fi/til/khki/2020/khki\\_2020\\_2021-05-21\\_kat\\_001\\_fi.html](http://www.stat.fi/til/khki/2020/khki_2020_2021-05-21_kat_001_fi.html) (Viitattu: 15.9.2022).
- [2] Suomen virallinen tilasto (SVT): Kasvihuonekaasut [verkkojulkaisu]. Kasvihuonekaasupäästöjen raportoinnissa alkaa uusi kausi. Helsinki. Tilastokeskus Saatavissa: <https://www.stat.fi/julkaisu/cktlew2c03aln0a515eyjyxe8> (Viitattu: 15.9.2022)
- [3] Energiateollisuus ry, Energiavuosi 2021 Kaukolämpö, 2022, s.22, Saatavissa: [https://energia.fi/files/5650/Kaukolampovuosi\\_2021\\_v1.4\\_FINAL.pdf](https://energia.fi/files/5650/Kaukolampovuosi_2021_v1.4_FINAL.pdf) (Viitattu: 15.9.2022)
- [4] Ympäristöministeriö, Hiilineutraali Suomi 2035. 2022. Saatavissa: <https://ym.fi/hiilineutraalisuomi2035> (Viitattu 15.9.2022).
- [5] Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi (EU) 2018/ 2001. Uusiutuvista lähteistä peräisin olevan energian käytön edistämisestä, 2018, s.128. Saatavissa: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L2001&from=en>. (Viitattu 15.9.2022)
- [6] Heikkilä I., Kiuru T., Ylijäämälämmön taloudellinen hyödyntäminen, Ylijäämälämpöenergia analyysit, Motiva, 2014, s.60, Saatavissa: [https://www.motiva.fi/files/10216/Ylijaamalammon\\_taloudellinen\\_hyodyntaminen\\_Ylijaamalamponenergia-analyysit.pdf](https://www.motiva.fi/files/10216/Ylijaamalammon_taloudellinen_hyodyntaminen_Ylijaamalamponenergia-analyysit.pdf) (Viitattu: 15.9.2022)
- [7] Prizztech, Teknologiaselvitys hukkalämmöstä hyötyenergiaa, 2020, s.20, Saatavissa: <https://www.prizz.fi/media/energiaratkaisut/energiaratkaisut-materiaalit/teknologiaselvitys-hukkala-cc-88mmo-cc-88sta-cc-88-hyo-cc-88tyenergiaa.pdf> (Viitattu: 15.9.2022)
- [8] Nummelin J., Hankalin V., Raiko M., Ylijäämälämmön taloudellinen hyödyntäminen polttoaineen kuivaustekniikat, Motiva, 2014, s.58, Saatavissa: [https://www.motiva.fi/files/13514/Ylijaamalammon\\_taloudellinen\\_hyodyntaminen\\_Polttoaineen\\_kuivaustekniikat.pdf](https://www.motiva.fi/files/13514/Ylijaamalammon_taloudellinen_hyodyntaminen_Polttoaineen_kuivaustekniikat.pdf) (Viitattu 15.9.2022)
- [9] Pöyry Management Consulting Oy, Kaksisuuntaisen kaukolämmön liiketoimintamallit, Sitra, 2016, s. 54, Saatavissa: [https://media.sitra.fi/2017/02/27175247/Kaksisuuntaisen\\_kaukolammon\\_liiketoimintamallit-2.pdf](https://media.sitra.fi/2017/02/27175247/Kaksisuuntaisen_kaukolammon_liiketoimintamallit-2.pdf) (Viitattu 15.9.2022)
- [10] Fortum, Avoin kaukolämpö ostohinnat, Saatavissa: <https://www.fortum.fi/yriyksille-ja-yhteisoille/lammitys-ja-jaahdytys/kaukolampo/avoin-kaukolampo/avoin-kaukolampo-ostohinnat> (Viitattu 15.9.2022).
- [11] Helen Oy, Avoin kaukolämpö. Saatavissa: <https://www.helen.fi/yriyksiset/lampoayriyksille/avoin-kaukolampo> (Viitattu 15.9.2022).

- [12] Tampereen Sähkölaitos, Avoin kaukolämpöverkko > Oma Lämpö-hinnasto. Saatavissa: <https://www.sahkolaitos.fi/yrityksille-ja-taloyhtiolle/lamporatkaisut/omalampo/hinnasto/> (Viitattu: 15.9.2022).
- [13] Fortum, Datakeskusten hukkalämpö kaukolämmöksi. Saatavissa: <https://www.fortum.fi/datakeskusten-hukkalampo-kaukolammoksi> (Viitattu: 15.9.2022).
- [14] Fortum, Puhdasta lämpöä jätevedestä. Saatavissa: <https://www.fortum.fi/puhdasta-lampoa-jatevedesta> (Viitattu: 15.9.2022).
- [15] Helen, Konesalien hukkalämmöstä hiilineutraalia kaukolämpöä: Telian datakeskus lämmittelee helsinkiläisiä koteja 2021. Saatavissa: <https://www.helen.fi/uutiset/2021/konesalien-hukkalammosta-hiilineutraalia-kaukolampoa> (Viitattu 15.9.2022)
- [16] Energiatehokkuussopimukset, Paulig ja Helen: Kahvinpaahtimo lämmittelee tuhat kaksiota. Energiatehokkuussopimukset 2017–2025, Saatavissa: <https://energiatehokkuussopimukset2017-2025.fi/paulig-ja-helen-kahvinpaahtimo-lammittaa-tuhat-kaksiota/> (Viitattu 15.9.2022).
- [17] Energiatehokkuussopimukset, Nivos: Kaukolämpöä Yandexin datakeskuksen hukkalämmöstä. Saatavissa: <https://energiatehokkuussopimukset2017-2025.fi/nivos-kaukolampoa-yandexin-datakeskuksen-hukkalammosta/> (Viitattu 15.9.2022)
- [18] Pöyry Management Consulting Oy, Esiselvitys - Ylijäämälämmön potentiaali teollisuudessa, Motiva, 2019, s.38, Saatavissa: [https://www.motiva.fi/files/16214/Esiselvitys\\_-\\_Ylijaamalammon\\_potentiaali\\_teollisuudessa.pdf](https://www.motiva.fi/files/16214/Esiselvitys_-_Ylijaamalammon_potentiaali_teollisuudessa.pdf) (Viitattu: 16.9.2022)
- [19] Lund H. et al. 4th Generation District Heating (4GDH) Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems. *Energy Oxf* 2014; 68:1–11. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.02.089>.
- [20] Energiateollisuus ry, Tekniset toimintaohjeet verkkoon liittämistä Hukkalämpöjen hyödyntäminen kaukolämpöjärjestelmässä, 2018, s. 5, Saatavissa: [https://energia.fi/files/3127/Hukkalammot\\_kaukolampoverkkoon\\_tekniset\\_ohjeet\\_20181016.pdf](https://energia.fi/files/3127/Hukkalammot_kaukolampoverkkoon_tekniset_ohjeet_20181016.pdf) (Viitattu: 16.9.2022)
- [21] Koskelainen L, Nuorkivi A, Saarela R, Sipilä K. Kaukolämmön käsikirja. Helsinki: Energiateollisuus, 2006. Print.
- [22] Wiltshire R, *Advanced District Heating and Cooling (DHC) Systems*, Burlington: Elsevier Science, 2015. Print.
- [23] Gadd H, Werner S. Heat load patterns in district heating substations. *Appl Energy* 2013;108:176–83. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.02.062>
- [24] Energiateollisuus ry. Etusivu > Energiasta > Energiantuotanto > Kaukolämmön tuotanto. Saatavissa: <https://energia.fi/energiasta/energiantuotanto/kaukolammontuotanto> (Viitattu: 16.9.2022).
- [25] Energiateollisuus ry. Etusivu > Energiasta > Energiantuotanto > Yhteistuotanto. Saatavissa: <https://energia.fi/energiasta/energiantuotanto/yhteistuotanto> (Viitattu: 16.9.2022).

- [26] Huhtinen M. Höyrykattilatekniikka. 5. uus. p. Helsinki: Edita; 2000.
- [27] Tilastokeskus, Energianhinnat [verkkajulkaisu]. Viiteajankohta: 2022, 1. vuosineljännes. ISSN=1799–7984. Helsinki: Tilastokeskus. Saatavissa: <https://www.stat.fi/julkaisu/cktydqubc244b0c58p19g8qbh> (Viitattu: 16.9.2022).
- [28] Verohallinto. Yritykset ja yhteisöt > Verot ja maksut > Valmisteverotus > Sähkövero > Sähkön ja eräiden polttoaineiden verotaulukot. Saatavissa: <https://www.vero.fi/yritykset-ja-yhteisot/verot-ja-maksut/valmisteverotus/sahko-vero/verotaulukot/> (Viitattu: 16.9.2022).
- [29] Verohallinto. Yritykset ja yhteisöt > Verot ja maksut > Valmisteverotus > Nestemäisten polttoaineiden valmistevero > Nestemäisten polttoaineiden verotaulukot. Saatavissa: <https://www.vero.fi/yritykset-ja-yhteisot/verot-ja-maksut/valmisteverotus/nestemaiset-polttoaineet/verotaulukot/> (Viitattu: 16.9.2022)
- [30] Energiavirasto. Toimialat / Päästökauppa. Saatavissa: <https://energiavirasto.fi/paastokauppa> (Viitattu: 16.9.2022).
- [31] Trading economics, EU Carbon Permits - 2022 Data - 2005-2021 Historical - 2023 Forecast - Price – Quote. Saatavissa: <https://tradingeconomics.com/commodity/carbon> (Viitattu: 16.9.2022).
- [32] Tilastokeskus. Etusivu > Tuotteet ja palvelut > Kasvihuonekaasuinventaarit > Polttoaineluokitus 2022 > Voimassa oleva luokitus > Polttoaineluokitus 2022 (xlsx). Saatavissa: [https://www.stat.fi/tup/khkinv/khkaasut\\_polttoaineluokitus.html](https://www.stat.fi/tup/khkinv/khkaasut_polttoaineluokitus.html) (Viitattu: 16.9.2022).
- [33] Energiateollisuus ry, Kaukolämmön käyttötaloudelliset tunnusluvut 2018, Energiateollisuus ry, 2019, s. 26, Saatavissa: [https://energia.fi/files/4158/Kayttotaloudelliset\\_tunnusluvut\\_2018.pdf](https://energia.fi/files/4158/Kayttotaloudelliset_tunnusluvut_2018.pdf) (Viitattu: 16.9.2022)
- [34] YIT Teollisuus- ja verkkopalvelut Oy. Teollisuuden ylijäämälämmön hyödyntäminen kaukolämmityksessä. Energiateollisuus ry / Työ- ja elinkeinoministeriö, 2010. s.59. <https://docplayer.fi/2968184-Tyo-ja-elinkeinoministerio.html> (Viitattu: 16.9.2022).
- [35] Energiateollisuus ry. Etusivu > Energiasta > Energiaverkot > Kaukolämpöverkot. Saatavissa: <https://energia.fi/energiasta/energiaverkot/kaukolampoverkot> (Viitattu: 16.9.2022).
- [36] Energiateollisuus ry, Maanalaisten kiinnivaahdotettujen kaukolämpöjohtojen rakentamiskustannukset 2019, Energiateollisuus ry, 2020, s. 18, Saatavissa: [https://energia.fi/files/5329/Johtorakennuskustannukset\\_2019.pdf](https://energia.fi/files/5329/Johtorakennuskustannukset_2019.pdf) (Viitattu: 16.9.2022)
- [37] Mäkelä V-M, Tuunanen J. Suomalainen kaukolämmitys. Mikkeli: Mikkelin ammattikorkeakoulu. 2015. Print.
- [38] Rämä M, Klobut K, Asiakasraportti - Hukkalämpö kaukolämpöjärjestelmässä. VTT. 2020. s. 29, Saatavissa: [https://energia.fi/files/4831/Hukkalampo\\_kaukolampojarjestelmissa\\_-\\_maarittely\\_ja\\_luokittelu\\_VTT\\_2020.pdf](https://energia.fi/files/4831/Hukkalampo_kaukolampojarjestelmissa_-_maarittely_ja_luokittelu_VTT_2020.pdf) (Viitattu 16.9.2022)

- [39] Martin K, Koikkalainen J. Suomen kaupan alan hukkalämpö potentiaali - Selvitys, Granlund, 2021, s. 45, Saatavissa: [https://www.motiva.fi/files/19507/Kauppan\\_alan\\_hukkalampopotentiali\\_-\\_Selvitys\\_08.11.2021.pdf](https://www.motiva.fi/files/19507/Kauppan_alan_hukkalampopotentiali_-_Selvitys_08.11.2021.pdf) (Viitattu: 16.9.2022) .
- [40] Suomen virallinen tilasto (SVT): Teollisuuden energiankäyttö [verkojulkaisu]. ISSN=1798-775X. 2020, Liitetaulukko 2. Teollisuuden energiankäyttö toimialoitain vuonna 2020 . Helsinki: Tilastokeskus. Saatavissa: [https://www.stat.fi/til/tene/2020/tene\\_2020\\_2021-11-01\\_tau\\_002\\_fi.html](https://www.stat.fi/til/tene/2020/tene_2020_2021-11-01_tau_002_fi.html) (Viitattu 16.9.2022).
- [41] Berthou M, Bory D. Overview of waste heat in the industry in France. ECEEE 2012 SUMMER STUDY on Energy efficiency in industry. 2012.
- [42] Fang H, Xia J, Jiang Y. Key issues and solutions in a district heating system using low-grade industrial waste heat. *Energy Oxf* 2015;86:589–602. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.04.052>.
- [43] Turunen T, Jääskeläinen J, Suomen teollisuuden sähköistyminen ja sen vaikutukset energiatehokkuuteen ja hukkalämpöjen hyödyntämiseen, Motiva, 2021, s.73, Saatavissa: [https://www.motiva.fi/files/19644/Suomen\\_teollisuuden\\_sahkoistyminen\\_ja\\_sen\\_vaikutus\\_energiatehokkuuteen\\_ja\\_hukkalampojen\\_hyodyntamiseen\\_-\\_raportti\\_2021.pdf](https://www.motiva.fi/files/19644/Suomen_teollisuuden_sahkoistyminen_ja_sen_vaikutus_energiatehokkuuteen_ja_hukkalampojen_hyodyntamiseen_-_raportti_2021.pdf) (Viitattu: 16.9.2022)
- [44] Lord M. et al. Zero Carbon Industry Plan: Electrifying Industry, Beyond Zero Emissions, 2018, Beyond Zero Emissions Inc. Melbourne Australia. Saatavissa: <https://bze.org.au/wp-content/uploads/2020/12/electrifying-industry-bze-report-2018.pdf> (Viitattu: 16.9.2022)
- [45] Fisher International. Energy Efficiency of the Paper Industry in the EU, Study for Finnish Forest Industries ry, 2019, Saatavissa: [https://global-uploads.webflow.com/5f44f62ce4d302179b465b3a/5faea126d5ceae7f8296e0a3\\_sellupaperi\\_energiavertailu\\_tiivistelm%C3%A4.pdf](https://global-uploads.webflow.com/5f44f62ce4d302179b465b3a/5faea126d5ceae7f8296e0a3_sellupaperi_energiavertailu_tiivistelm%C3%A4.pdf) (Viitattu: 1.6.2022)
- [46] Länsi-Suomen Ympäristölupavirasto. Lupapäätös Nro 27/2004/1. Corenso United Oy Ltd:n Porin kartonkitehtaan ympäristölupahakemus, Pori. Ympäristölupavirasto: Helsinki, 2004, s.42. Saatavissa: [https://www.google.fi/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwix\\_7GcgfH5AhVxIYsKHUzFBLsQFnoECAg-QAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.ymparisto.fi%2Fdownload%2Fno-name%2F%257B653E065A-E006-40AA-AA83-DE4705A2FBCF%257D%2F84276&usq=AOvVaw3I3jvCxb3x3x0tsM9AyS\\_-](https://www.google.fi/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwix_7GcgfH5AhVxIYsKHUzFBLsQFnoECAg-QAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.ymparisto.fi%2Fdownload%2Fno-name%2F%257B653E065A-E006-40AA-AA83-DE4705A2FBCF%257D%2F84276&usq=AOvVaw3I3jvCxb3x3x0tsM9AyS_-) (Viitattu: 16.9 2022).
- [47] Bühler F, Petrović S, Holm FM, Karlsson K, Elmegaard B. Spatiotemporal and economic analysis of industrial excess heat as a resource for district heating. *Energy Oxf* 2018; 151:715–28. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.03.059>.
- [48] Schiffer ZJ, Manthiram K. Electrification and Decarbonization of the Chemical Industry. *Joule* 2017; 1:10–4. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2017.07.008>.
- [49] Lechtenböhmer S, Nilsson LJ, Åhman M, Schneider C. Decarbonizing the energy intensive basic materials industry through electrification – Implications for future EU electricity demand. *Energy Oxf* 2016; 115:1623–31. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.07.110>.

- [50] International Energy Agency (IEA), Technology Roadmap - Energy and GHG Reductions in the Chemical Industry via Catalytic Processes, 2013, s.60 Saatavissa: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/d0f7ff3a-0612-422d-ad7d-a682091cb500/TechnologyRoadmapEnergyandGHGReductionsInTheChemicalIndustryviaCatalyticProcesses.pdf> (Viitattu: 16.9.2022)
- [51] Lounais-Suomen Ympäristökeskus, Ympäristölupapäätös, Nro. 18 YLO. Päätös Rosenlew RKW Finland Oy:n ympäristönsuojelulain 35 §:n mukaisesta hakemuksesta. 2007. s.40. Saatavissa: [https://www.google.fi/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwiU6u3PhvH5AhWHIYsKHSTgAV-kQFnoECAkQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.ymparisto.fi%2Fdownload%2Fnoname%2F%257BD758FA50-BF9B-4E3E-8BB9-27D426945ADA%257D%2F88841&usq=AOvVaw30Li0nfCEA\\_zePkSZnE2Vu](https://www.google.fi/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwiU6u3PhvH5AhWHIYsKHSTgAV-kQFnoECAkQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.ymparisto.fi%2Fdownload%2Fnoname%2F%257BD758FA50-BF9B-4E3E-8BB9-27D426945ADA%257D%2F88841&usq=AOvVaw30Li0nfCEA_zePkSZnE2Vu) (Viitattu: 16.9.2022).
- [52] Aluehallintovirasto Etelä-Suomi, Päätös, Nro. 225/2015/1, Luvata Pori Oy:n hakemus valimoiden ja kuparin jatkojalostuksen ympäristöluvan lupamääräysten tarkistamiseksi, Pori. 2015. s.102. Saatavissa: <https://ylupa.avi.fi/api/v1/documents/attachment/1976588> (Viitattu: 16.9.2022)
- [53] Aluehallintovirasto, Päätös - Nro 20/2021 Dnro ESAVI/34416/2020, Kupariputkitehtaan ympäristöluvan lupamääräyksessä 2. määrätyn määräajan pidentäminen, Pori. 2021. s.13. Saatavissa: <https://pori.cloudnc.fi/download/noname/%7Ba06ee58e-ce68-44e3-92a0-70eea72002c1%7D/2094031> (Viitattu: 16.9.2022)
- [54] Jeqoroff M, Arasto A, Tsupari E. Katsaus Suomen teollisuuden sähköistämisen teknologisiin ratkaisuihin. Suomen ilmastopaneeli. 2021, s.60 Saatavissa: <https://www.ilmastopaneeli.fi/wp-content/uploads/2021/12/ilmastopaneelin-raportti-4-2021-katsaus-teollisuuden-sahkoistamisen-ratkaisuihin.pdf> (Viitattu: 16.9.2022)
- [55] Atria. Atrian yritysraportti 2018. s.42. Saatavissa: [https://www.atria.fi/contentassets/1740f051b2664d548f0916c1f8f2d796/atria\\_yritysvastuuraaportti2018\\_final.pdf](https://www.atria.fi/contentassets/1740f051b2664d548f0916c1f8f2d796/atria_yritysvastuuraaportti2018_final.pdf) (Viitattu: 16.9.2022)
- [56] Fazer. Vastuullisuusraportti 2020. s.35 Saatavissa: [https://www.fazer-group.com/globalassets/global/fazergroup/about-us/annual-review-2020/sustainability-report/sustainability\\_report\\_fg\\_annual-review\\_2020\\_fi.pdf](https://www.fazer-group.com/globalassets/global/fazergroup/about-us/annual-review-2020/sustainability-report/sustainability_report_fg_annual-review_2020_fi.pdf) (Viitattu 16.9.2022)
- [57] Linkosuo. Linkosuo vastuullisuusraportti 2021. s.34. Saatavissa: [https://linkosuo.fi/wp-content/uploads/LinkosuoVastuullisuusraportti\\_2021.pdf](https://linkosuo.fi/wp-content/uploads/LinkosuoVastuullisuusraportti_2021.pdf) (Viitattu: 16.9.2022)
- [58] Kanniston Leipomo. Vastuullisuusraportti 2019. s.52. Saatavissa: <https://kauppa.kannistonleipomo.fi/img/file.php?id=114383> (Viitattu: 31.8.2022)
- [59] Dénarié A, Muscherà M, Calderoni M, Motta M. Industrial excess heat recovery in district heating: Data assessment methodology and application to a real case study in Mila-no, Italy. Energy Oxf 2019; 166:170–82. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.09.153>.

- [60] McKenna RC, Norman JB. Spatial modelling of industrial heat loads and recovery potentials in the UK. *Energy Policy* 2010; 38:5878–91. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.05.042>.
- [61] Persson U, Werner S. District heating in sequential energy supply. *Appl Energy* 2012; 95:123–31. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.02.021>.
- [62] Loibl W, Stollnberger R, Österreicher D. Residential Heat Supply by Waste-Heat Re-Use: Sources, Supply Potential and Demand Coverage—A Case Study. *Sustain Basel Switz* 2017; 9:250–250. <https://doi.org/10.3390/su9020250>.
- [63] Broberg Viklund S, Johansson MT. Technologies for utilization of industrial excess heat: Potentials for energy recovery and CO2 emission reduction. *Energy Convers Manag* 2014; 77:369–79. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.09.052>.
- [64] Liikenne- ja viestintäministeriö. ICT-ala, ilmasto ja ympäristö : ICT-alan ilmasto- ja ympäristöstrategiaa valmisteleavan työryhmän väliraportti. 2020. s.148. Saatavissa: <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/162307> (Viitattu 16.9.2022).
- [65] Motiva. Energiatehokas konesali. 2011, s. 24, Saatavissa: [http://www.motiva.fi/files/4828/Energiatehokas\\_konesali.pdf](http://www.motiva.fi/files/4828/Energiatehokas_konesali.pdf) (Viitattu 6.6.2022)
- [66] Lu T, Lü X, Remes M, Viljanen M. Investigation of air management and energy performance in a data center in Finland: Case study. *Energy Build* 2011; 43:3360–72. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.08.034>.
- [67] Wahlroos M, Pärssinen M, Manner J, Syri S. Utilizing data center waste heat in district heating – Impacts on energy efficiency and prospects for low-temperature district heating networks. *Energy Oxf* 2017;140:1228–38. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.08.078>.
- [68] SYKE. Hiilineutraalisuomi.fi > Webinaarit 2022 > Hukkalämpöjen hyödyntämisestä sopiminen – kaukolämmöksi vai hukkaan? > Case: Datakeskuksesta hyötylämpöä, tuotantopäällikkö Joni Solakuja, Telia Company. 2022. s.6. Saatavissa: [https://hiilineutraalisuomi.fi/fi-FI/Ajankohtaista/Hiilineutraaliwebinaari/Webinaarit\\_2022](https://hiilineutraalisuomi.fi/fi-FI/Ajankohtaista/Hiilineutraaliwebinaari/Webinaarit_2022) (Viitattu: 16.9.2022).
- [69] Sundell D. Master's thesis: A method for systematic mapping of heat sources in an urban area, 2021. s. 87. [https://energia.fi/files/5869/Systemaattinen\\_menetelma\\_hukkalampojen\\_kartoittamiseen.pdf](https://energia.fi/files/5869/Systemaattinen_menetelma_hukkalampojen_kartoittamiseen.pdf). (Viitattu:16.9.2022)
- [70] Helsingin seudun ympäristöpalvelut (HSY), Viikinmäen jätevedenpuhdistamo, 2014, s.5. Saatavissa: [https://niini.fi/wp-content/uploads/2021/01/HSY0012\\_Viikinmaen\\_jatevedenpuhdistamo.pdf](https://niini.fi/wp-content/uploads/2021/01/HSY0012_Viikinmaen_jatevedenpuhdistamo.pdf) (Viitattu:16.9.2022)
- [71] Porin Vesi. Toimintakertomus 2020. s.34 Saatavissa: [https://www.pori.fi/sites/default/files/atoms/files/toimintakertomus\\_2020.pdf](https://www.pori.fi/sites/default/files/atoms/files/toimintakertomus_2020.pdf) (Viitattu 16.9.2022)
- [72] Karttunen E. Vesihuolto. 2. Helsinki: Suomen rakennusinsinöörien liitto. 2004. Print.
- [73] Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymä (HSY), Jätevedenpuhdistus pääkaupunkiseudulla 2020 - Viikinmäen ja Suomenojan jätevedenpuhdistamot,

- HSY:n julkaisu 3/2021. 2021. s.23, Saatavissa: <https://julkaisu.hsy.fi/jatevedenpuhdistus-paakaupunkiseudulla-2020.pdf> (Viitattu: 16.9.2022)
- [74] Neugebauer G, Kretschmer F, Kollmann R, Narodoslawsky M, Ertl T, Stoeglehner G. Mapping Thermal Energy Resource Potentials from Wastewater Treatment Plants. *Sustain Basel Switz* 2015;7:12988–3010. <https://doi.org/10.3390/su71012988>.
- [75] Päivittäistavarakauppa Ry. Päivittäistavaramarkkinat Suomessa. Saatavissa: <https://www.ptv.fi/kaupan-toiminta/paivittaistavaramarkkinat/> (Viitattu: 20.6.2022).
- [76] FINLEX® - Säädökset alkuperäisinä: Maa- ja metsätalousministeriön asetus... 1367/2011. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2011/20111367> (Viitattu: 16.9.2022).
- [77] Ruokavirasto. Etusivu >Elintarvikkeet > Elintarvikeala > Hygieeninen toiminta > Tuotanto- ja käsittelyvaiheet > Lämpötilat > Esimerkkejä elintarvikkeiden säilytyslämpötiloille. Saatavissa: <https://www.ruokavirasto.fi/yrietykset/elintarvikeala/elintarvikeyrityksen-perustaminen/toimintaan-liittyvia-ohjeita/miten-huolehdit-lampotiloista/esimerkkeja-elintarvikkeiden-sailytyslampotiloille/> (Viitattu 16.9.2022).
- [78] Martin K, Koikkalainen J, Kaupan alan hukkalämpöpotentiaali - Selvitys, Motiva, 2021, s.45, Saatavissa: [https://www.motiva.fi/files/19507/Kaupan\\_alan\\_hukkalampopotentiaali\\_-\\_Selvitys\\_08.11.2021.pdf](https://www.motiva.fi/files/19507/Kaupan_alan_hukkalampopotentiaali_-_Selvitys_08.11.2021.pdf) (Viitattu: 16.9.2022)
- [79] Perttula J. Energiatekniikka. Helsinki: WSOY. 2000.
- [80] Hakala P. Kylmälaitoksen suunnittelu. 2. tark. p. Helsinki: Opetushallitus. 2007.
- [81] Laitinen A, Rämä M, Airaksinen M. Asiakasraportti - Jäähdytyksen teknologiset ratkaisut. 2016. s.64. Saatavissa: [https://energia.fi/files/1359/Jaahdytysteknologiaselvitys\\_VTT\\_221216.pdf](https://energia.fi/files/1359/Jaahdytysteknologiaselvitys_VTT_221216.pdf) (Viitattu: 16.9.2022)
- [82] Franco A, Cillari G. Energy Sustainability of Food Stores and Supermarkets through the Installation of PV Integrated Plants. *Energ Basel* 2021;14:5678-. <https://doi.org/10.3390/en14185678>.
- [83] Kaipainen U, Heikkilä T, Kaupan kylmälaitteiden ja -järjestelmien lauhdelämmön talteenotto - Laskentaohje, Motiva, 2012, s. 27. Saatavissa: [https://www.motiva.fi/files/7973/Kaupan\\_kylmalaitteiden\\_ja\\_jarjestelmien\\_lauhdelammon\\_talteenotto\\_Laskentaohje.pdf](https://www.motiva.fi/files/7973/Kaupan_kylmalaitteiden_ja_jarjestelmien_lauhdelammon_talteenotto_Laskentaohje.pdf) (Viitattu: 16.9.2022)
- [84] Sawalha S, Piscopiello S, Karampour M, Manickam L, Rogstam J. Field measurements of supermarket refrigeration systems. Part II: Analysis of HFC refrigeration systems and comparison to CO2 trans-critical. *Appl Therm Eng* 2017;111:170–82. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.09.073>.
- [85] Remes M. Kaupalla edessä vuosikymmenen suururakka. *KylmäExtra-Verkkolehdi*. 2018. Saatavissa: [https://www.kylmaextra.fi/lehdet/kylma-extra\\_2\\_2018/kaupalla\\_edessa\\_vuosikymmenen\\_suururakka](https://www.kylmaextra.fi/lehdet/kylma-extra_2_2018/kaupalla_edessa_vuosikymmenen_suururakka) (Viitattu: 16.9.2022).



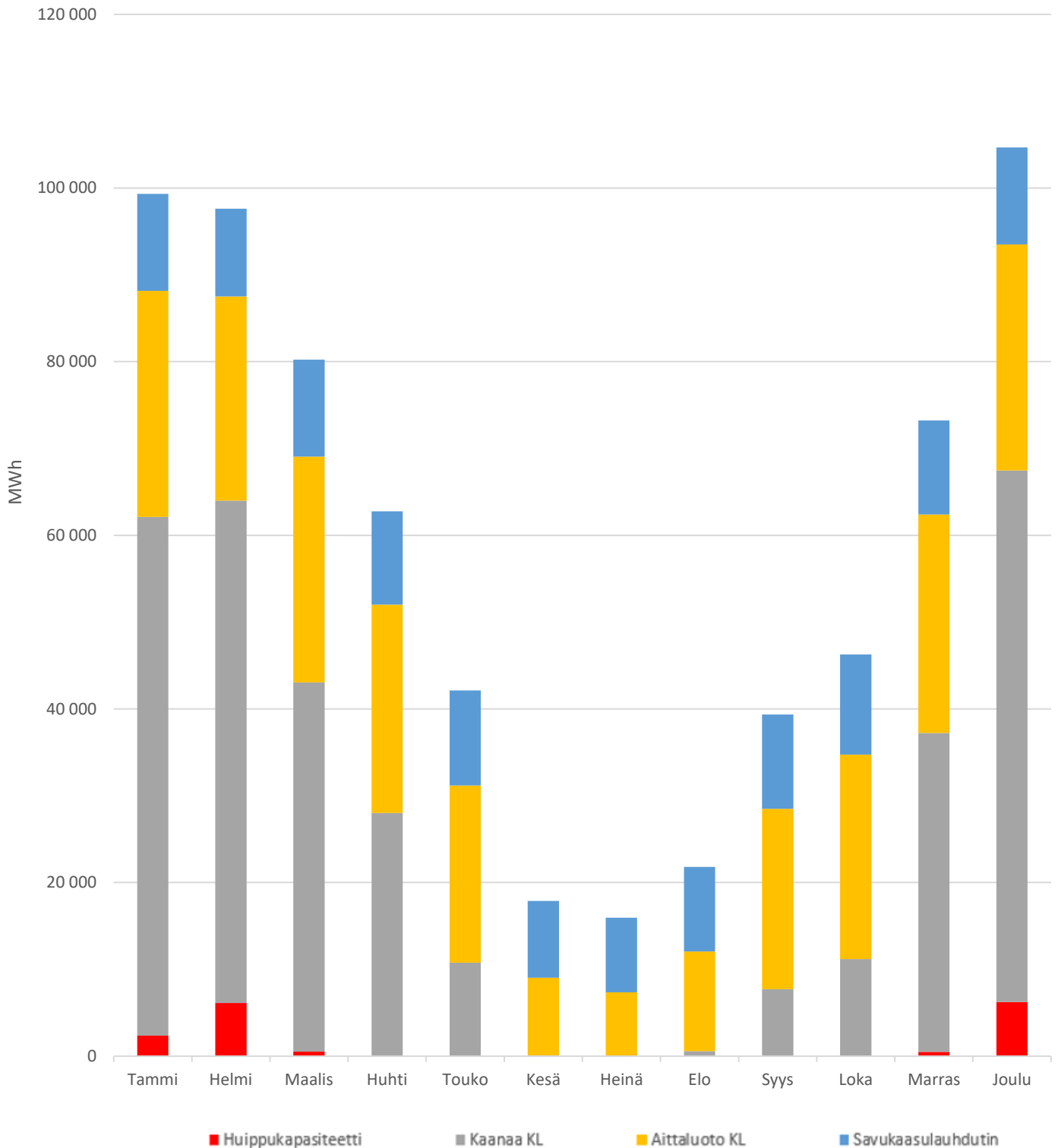
- [86] Shilliday JA, Tassou SA, Shilliday N. Comparative energy and exergy analysis of R744, R404A and R290 refrigeration cycles. *Int J Low Carbon Technol* 2009; 4:104–11. <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctp014>.
- [87] Antunes AHP, Bandarra Filho EP. Experimental investigation on the performance and global environmental impact of a refrigeration system retrofitted with alternative refrigerants. *Int J Refrig* 2016; 70:119–27. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2016.06.027>.
- [88] Commercial CO<sub>2</sub> Refrigeration Systems Guide for Subcritical and Transcritical CO<sub>2</sub> Applications. Emerson. 2016. Saatavissa: <https://e360hub.emerson.com/brochures/commercial-co2-refrigeration-systems-guide-for-subcritical-and-transcritical-co2-applications> (Viitattu: 16.9.2022).
- [89] Aittomäki A, Aalto E, Suomen kylmäyhdistys. *Kylmätekniikka*. 4. p. Helsinki: Suomen kylmäyhdistys. 2012. Print.
- [90] Aalto-yliopisto, VTT, Suomen jääkiekkoliitto. Jäähallien energiatehokkuuden parantaminen - Polku jäähallin energiatehokkuuteen, s.28. Saatavissa: [https://jaahalliportaali.fi/files/jaahalliportaali\\_handbook.pdf](https://jaahalliportaali.fi/files/jaahalliportaali_handbook.pdf) (Viitattu 16.9.2022)
- [91] Jäähalliportaali. Saatavissa: <https://jaahalliportaali.fi/IceStadiums/Comparison> (Viitattu 16.9.2022).
- [92] Jörgen Rogstam, Chadi Beaini, Stoppsladd fas 4 Energianvändning i svenska ishallar - Teknikstudier av svenska ishallar för teknikutveckling och lägre driftskostnader, 2014. s.97. Saatavissa: [http://www.stoppsladd.se/Slutrapport\\_Stoppsladd\\_fas\\_4.pdf](http://www.stoppsladd.se/Slutrapport_Stoppsladd_fas_4.pdf) (Viitattu: 16.9.2022)
- [93] Heikkilä T. Kylmäainesäädökset tuovat haasteita jäähalli- ja tekojääyhtiöille. *KylmäExtra-verkkolehti*. 2019. Saatavissa: [https://www.kylmaextra.fi/lehdet/kylmaextra\\_2\\_2019/kylmaainesaadokset\\_tuovat\\_haasteita\\_jaahalli-ja\\_tekojaayhtiöille](https://www.kylmaextra.fi/lehdet/kylmaextra_2_2019/kylmaainesaadokset_tuovat_haasteita_jaahalli-ja_tekojaayhtiöille) (Viitattu 16.9.2022).
- [94] Danfoss, Industrial refrigeration Ammonia and CO<sub>2</sub> applications handbook part II, 2014, s.70. Saatavissa: [http://www.cold.org.gr/library/downloads/Docs/Industrial%20refrigeration%20Ammonia%20&%20CO2%20applications%20\\_handbook%20part%20II.pdf](http://www.cold.org.gr/library/downloads/Docs/Industrial%20refrigeration%20Ammonia%20&%20CO2%20applications%20_handbook%20part%20II.pdf) (Viitattu: 16.9.2022)
- [95] Shah, Ramesh K, and Dusan P Sekulic. *Fundamentals of Heat Exchanger Design*. Place of publication not identified: Wiley Interscience Imprint, 2003. Print.
- [96] Ommen T, Jensen JK, Markussen WB, Reinholdt L, Elmegaard B. Technical and economic working domains of industrial heat pumps: Part 1 – Single stage vapour compression heat pumps. *Int J Refrig* 2015; 55:168–82. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2015.02.012>.
- [97] Andreasen J, Kærn M, Pierobon L, Larsen U, Haglind F. Multi-Objective Optimization of Organic Rankine Cycle Power Plants Using Pure and Mixed Working Fluids. *Energ Ba-sel* 2016;9:322–322. <https://doi.org/10.3390/en9050322>.
- [98] Bröckl M, Immonen I, Vanhanen J. Lämmön pientuotannon ja pienimuotoisen ylijäämälämmön hyödyntäminen kaukolämpötoiminnassa. 2014. s.32. Saatavissa: <https://docplayer.fi/15267734-Lammon-pientuotannon-ja-pienimuotoisen->

ylijaamalammon-hyödyntäminen-kaukolampotoiminnassa.html (Viitattu: 16.9.2022).

- [99] Maaskola I, Kataikko M, Ylijäämälämmön taloudellinen hyödyntäminen Lämpöpumppu- ja ORC-sovellukset. Motiva. 2014. s. 71, Saatavissa: [https://www.motiva.fi/files/10217/Ylijaamalammon\\_taloudellinen\\_hyodyntaminen\\_Lampopumppu\\_ja\\_ORC-sovellukset.pdf](https://www.motiva.fi/files/10217/Ylijaamalammon_taloudellinen_hyodyntaminen_Lampopumppu_ja_ORC-sovellukset.pdf) (Viitattu: 03.03.2022)
- [100] Pieper H, Ommen T, Buhler F, Paaske BL, Elmegaard B, Markussen WB. Allocation of investment costs for large-scale heat pumps supplying district heating. Energy Procedia 2018; 147:358–67. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.07.104>.
- [101] Bram van der Heijde, Annelies Vandermeulen, Robbe Salenbien, Lieve Helsen. Integrated Optimal Design and Control of Fourth Generation District Heating Networks with Thermal Energy Storage. Energ Basel 2019; 12:2766-. <https://doi.org/10.3390/en12142766>.
- [102] Deymi-Dashtebayaz M, Valipour-Namanlo S. Thermo-economic and environmental feasibility of waste heat recovery of a data center using air source heat pump. J Clean Prod 2019; 219:117–26. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.061>.
- [103] Nord pool. Day-ahead prices > FI. Saatavissa: <https://www.nordpoolgroup.com/en/Market-data/1/Dayahead/Area-Prices/FI/Hourly/> (Viitattu 22.7.2022)
- [104] Energiavirasto. Tilastot ja julkaisut > Sähkön hintatilastot. Saatavissa: <https://energiavirasto.fi/sahkon-hintatilastot> (Viitattu 22.7.2022).
- [105] Verohallinto. Henkilöasiakkaat - > Yritykset ja yhteisöt > Verot ja maksut > Valmisteverotus > Sähkövero. Saatavissa: <https://www.vero.fi/yritykset-ja-yhteisot/verot-ja-maksut/valmisteverotus/sahkovero/> (Viitattu 22.7.2022).
- [106] Alanen R, Koljo T, Hukari S, Saari P. Energian varastoinnin nykytila. VTT Tiedotteita. 2003, s. 237, Saatavissa: <https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/tiedotteet/2003/T2199.pdf> (Viitattu: 4.3.2022)
- [107] International Renewable Energy Agency (IRENA). Thermal energy storage: Technology brief. 2013. s.24. Saatavissa: <https://www.irena.org/publications/2013/Jan/Thermal-energy-storage> (Viitattu: 4.3.2022).
- [108] Lund H, Østergaard PA, Chang M, Werner S, Svendsen S, Sorknæs P, et al. The status of 4th generation district heating: Research and results. Energy Oxf 2018; 164:147–59. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.08.206>.
- [109] Sartor K, Dewallef P. Integration of heat storage system into district heating networks fed by a biomass CHP plant. J Energy Storage 2018;15:350–8. <https://doi.org/10.1016/j.est.2017.12.010>.
- [110] Lutfi E, Aaltio I, Hirvonen J, Jokisalo J, Lautkankare R. Hukkalämpökuormien hyödyntäminen, varastointi ja kysyntäjoustopuun tehostaminen - Hukaton-hankkeen loppuraportti. 2020. s.70. Saatavissa: [https://gnf.fi/wp-content/uploads/2020/12/Hukaton\\_loppuraportti\\_Web.pdf](https://gnf.fi/wp-content/uploads/2020/12/Hukaton_loppuraportti_Web.pdf). (Viitattu: 16.9.2022)

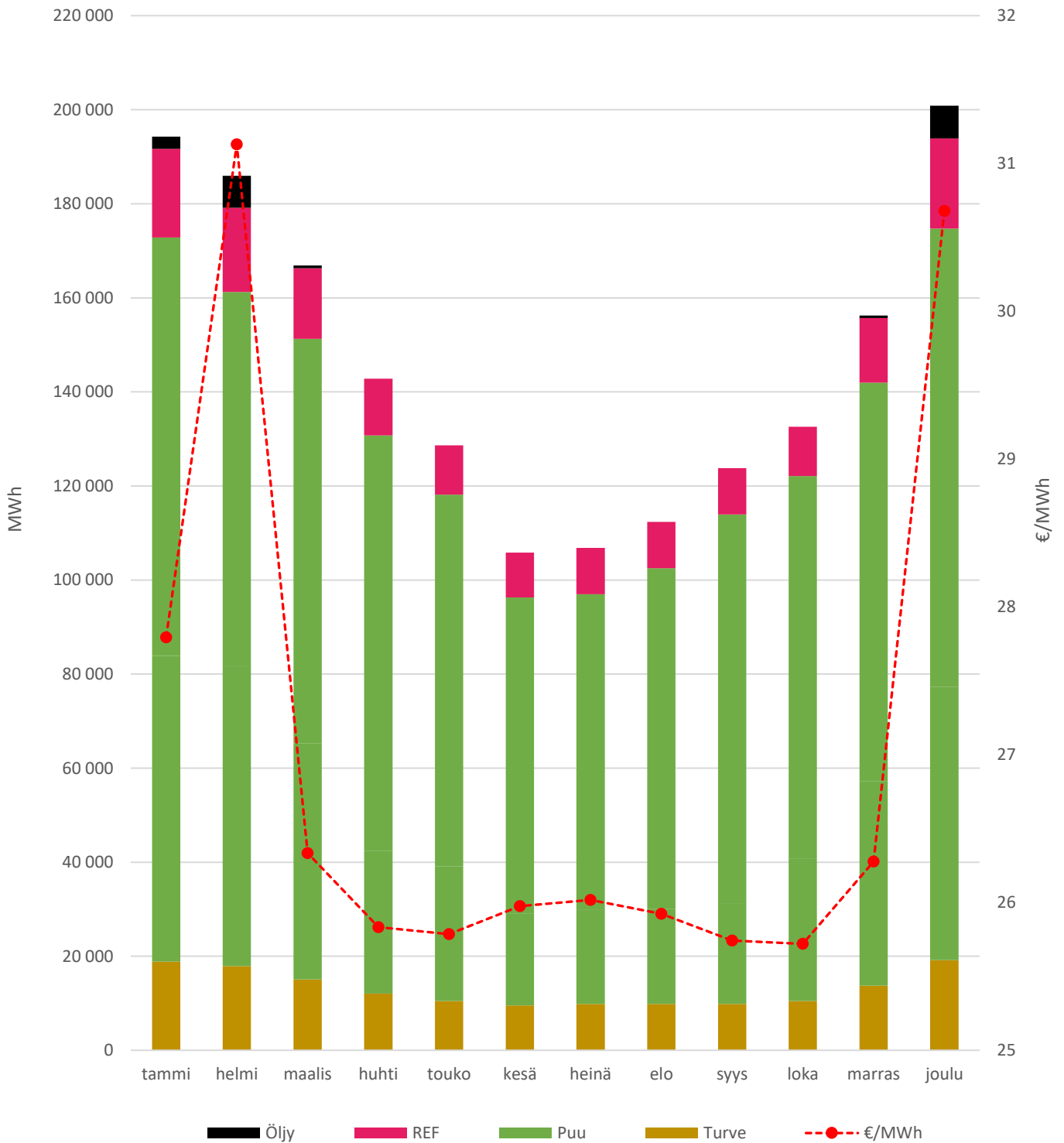
- [111] Milewski J, Wołowicz M, Bujalski W. Seasonal Thermal Energy Storage - A Size Selection. *Appl Mech Mater* 2013; 467:270–6. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.467.270>.
- [112] Kiviluoma J, Rinne E, Helistö N. Comparison of flexibility options to improve the value of variable power generation. *Int J Sustain Energy* 2018; 37:761–81. <https://doi.org/10.1080/14786451.2017.1357554>.
- [113] McKenna R, Fehrenbach D, Merkel E. The role of seasonal thermal energy storage in increasing renewable heating shares: A techno-economic analysis for a typical residential district. *Energy Build* 2019;187:38–49. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.01.044>.
- [114] Energiateollisuus ry, Lämmön osto ja kaksisuuntainen lämpökauppa, 2019, s. 7, Saatavissa: [https://energia.fi/files/3817/Lammon\\_ostoa\\_ja\\_2suuntaista\\_kaupaa\\_koskeva\\_ohje\\_lopullinen\\_20190521.pdf](https://energia.fi/files/3817/Lammon_ostoa_ja_2suuntaista_kaupaa_koskeva_ohje_lopullinen_20190521.pdf) (Viitattu: 03.03.2022)
- [115] Ilmatieteen laitos. Sää ja meri > Havaintojen lataus > Ilman lämpötila > Pori Lentotasema. Saatavissa: <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/havaintojen-lataus> (Viitattu 15.8. 2022).
- [116] Calefa Oy, Tietämättömyys on syynä sille, ettei teollisuus hyödynnä lähes ilmaista energiaa. Hukkaenergia hyödyksi -blogi. 2018. Saatavissa: <https://hukkaenergiahyodyksi.com/2018/03/29/tietamattomyys-on-syyna-sille-ettei-teollisuus-hyodynnalakes-ilmasta-energiaa/> (Viitattu: 15.8.2022).
- [117] Harmaala P. Suomi suuntaa lämpöpumppeihin. *KylmäExtra-Verkkolehti*. 2020. Saatavissa: [https://www.kylmaextra.fi/lehdet/kylmaextra\\_1\\_2020/suomi-suuntaa\\_lampopumppeihin](https://www.kylmaextra.fi/lehdet/kylmaextra_1_2020/suomi-suuntaa_lampopumppeihin) (Viitattu: 15.8.2022).
- [118] STT Viestintäpalvelut Oy, Massiivinen maanalainen energiavarasto Vaasan Vaskiluotoon. 2019. Saatavissa: <https://www.sttinfo.fi/tiedote/massiivinen-maanalainen-energiavarasto-vaasan-vaskiluotoon?publisherId=58661976&releaseId=69859866> (Viitattu: 26.10.2022)
- [119] Nielsen S. A geographic method for high resolution spatial heat planning. *Energy Oxf* 2014; 67:351–62. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.12.011>.
- [120] Wahlroos, Mikko, et al. “Utilizing Data Center Waste Heat in District Heating – Impacts on Energy Efficiency and Prospects for Low-Temperature District Heating Networks.” *Energy (Oxford)*, vol. 140, 2017, pp. 1228–38, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.08.078>.
- [121] Helen Oy. Etusivu > Ajankohtaista > Jättimäinen luolalämpövarasto toteutetaan Helsingin Mustikkamaalle. 2018. Saatavissa: [https://www.helen.fi/uutiset/2018/mustikkamaa\\_toteutus](https://www.helen.fi/uutiset/2018/mustikkamaa_toteutus) (Viitattu: 26.10.2022)

# LIITE 1: KAUKOLÄMPÖJÄRJESTELMÄN TUOTANTOPROFIILI



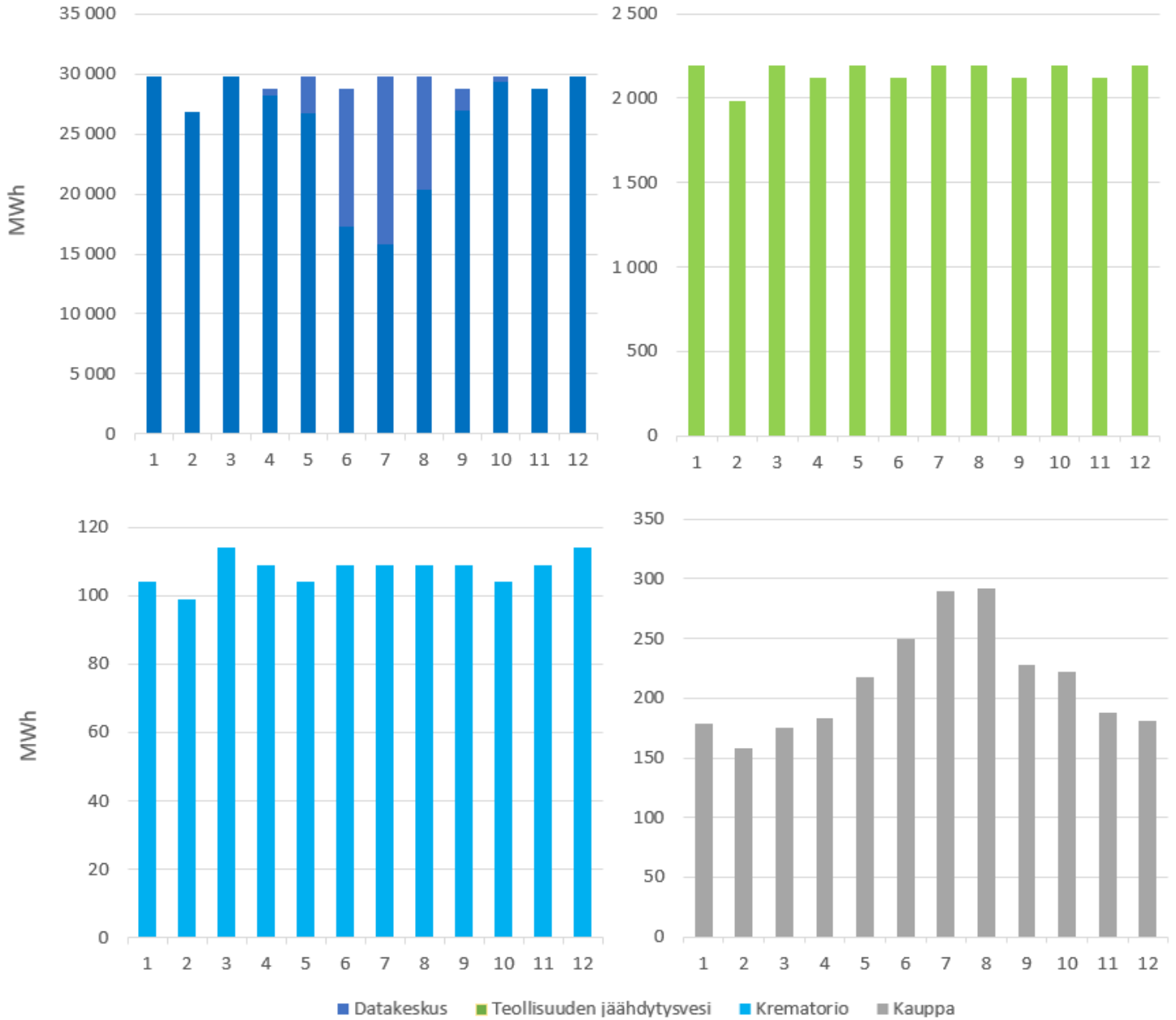
**Kuva 37** Profiloitun kaukolämpöjärjestelmän vuotuinen kaukolämmön tuotanto tuotantoyksiköittäin kuukauden funktiona

## LIITE 2: KAUKOLÄMPÖJÄRJESTELMÄN POLTTOAINEPROFIILI



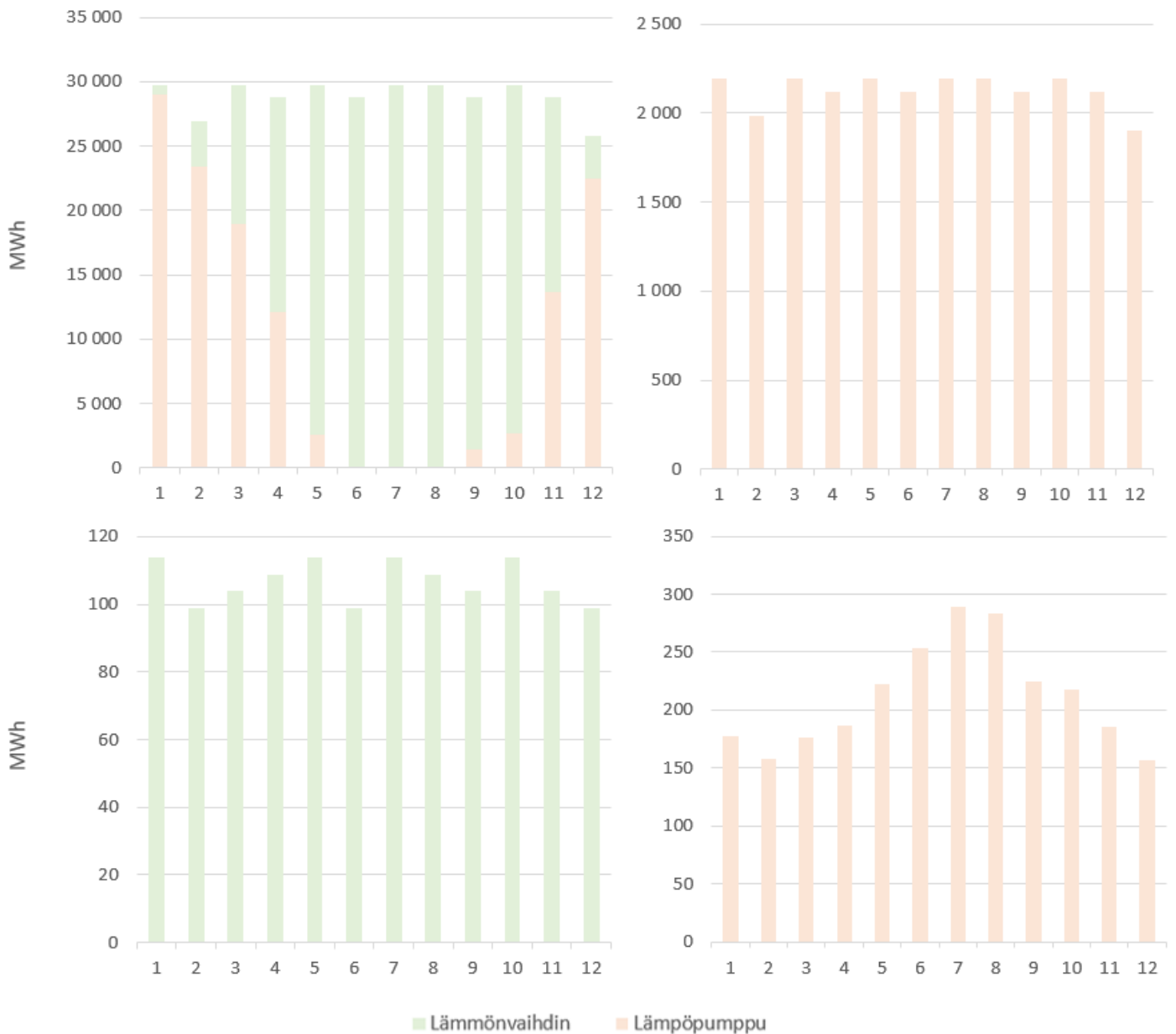
**Kuva 38** Profiloitun kaukolämpöjärjestelmän, voimalaitosten kokonaislämmöntuotannon pohjalta luotu, vuotuinen polttoaineprofiili sekä keskimääräinen muuttuva tuotantokustannus kuukauden funktiona

## LIITE 3: HUKKALÄMMÖN LÄHTEIDEN TUOTANTOPROFIILIT



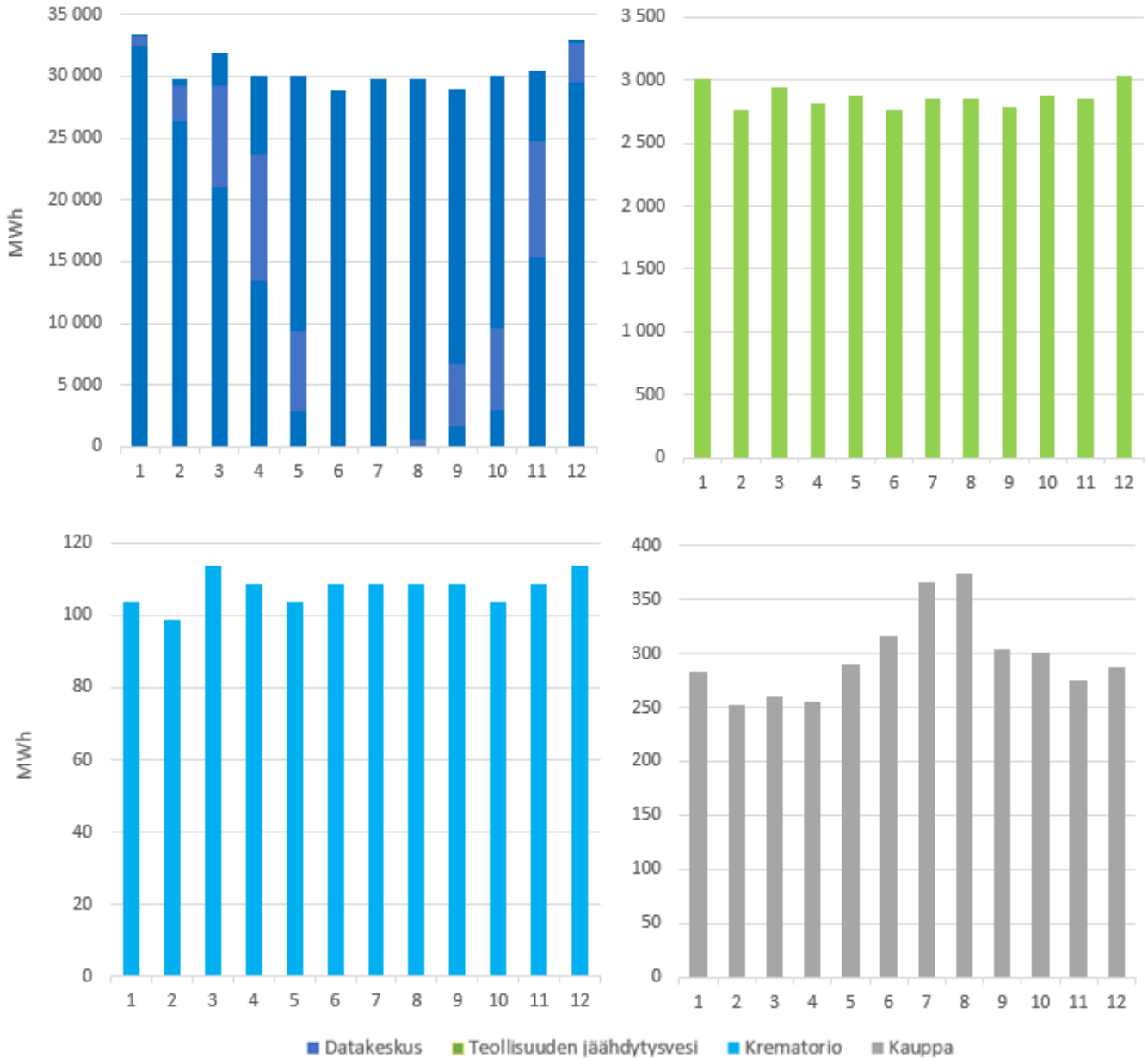
**Kuva 39** Tarkasteltujen hukkalämmön lähteiden tuotantoprofiilit kuukauden funktiona

## LIITE 4: HUKKALÄMMÖN LÄHTEIDEN HYÖDYNTÄMISTEKNOLOGIAT



**Kuva 40** Tarkastellun datakeskuksen (vasen ylä), teollisuuden jäähdytysvesikerron (oikea ylä), krematorion (vasen ala), sekä kaupan (oikea ala) hukkalämpöjen hyödyntämisteknologiat ja hyödyntämisteknologiat käyttömäärä energiat kuukauden funktiona

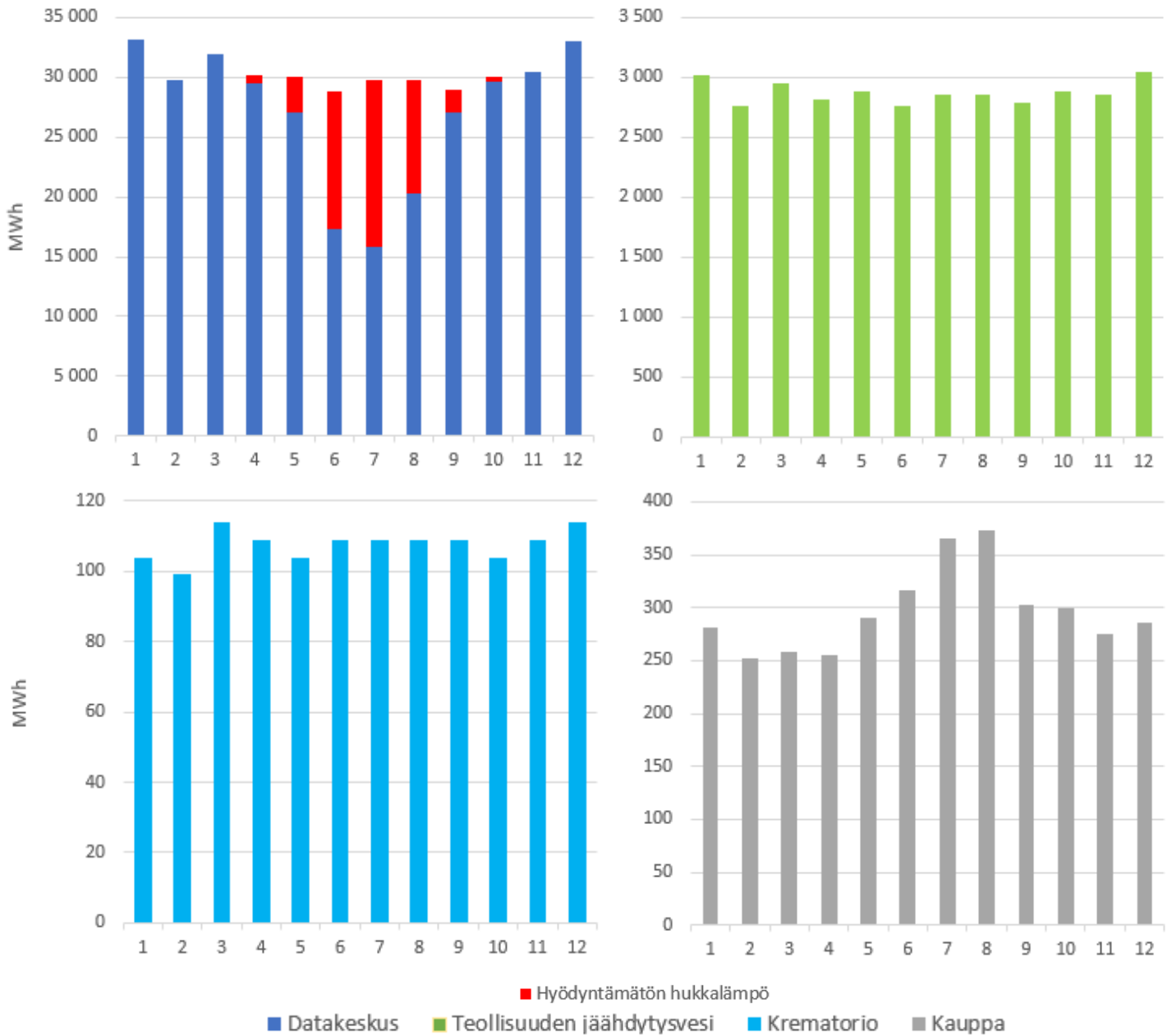
## LIITE 5: HUKKALÄMMÖN LÄHTEIDEN TUOTANTOPROFIILIT HYÖDYNTÄMISTEKNOLOGIALLA



**Kuva 41** Hyödyntämisteknologian vaikutus hyödynnettävään hukkalämpövirtaan

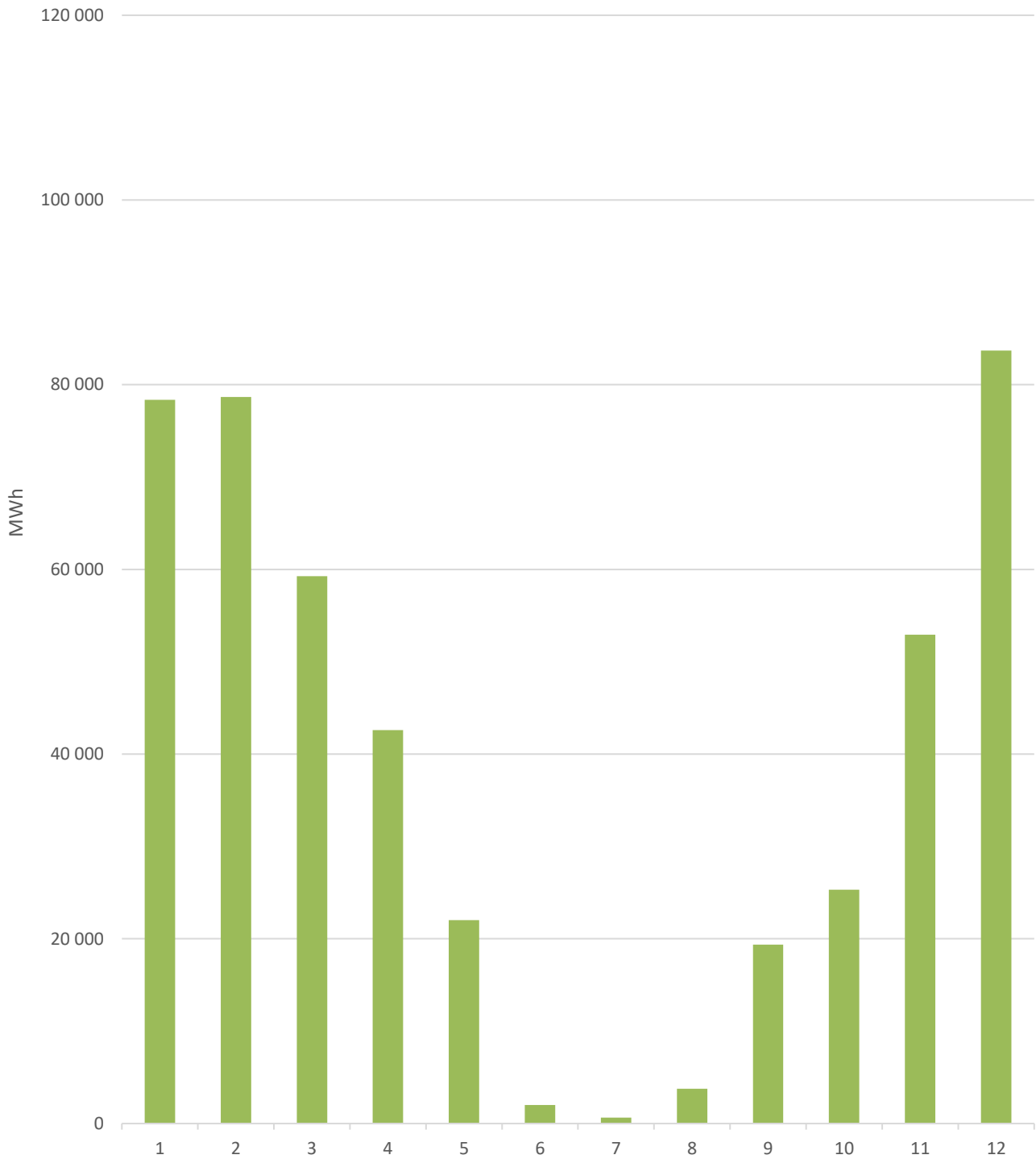


## LIITE 6: HUKKALÄMPÖJEN IDEAALINEN HYÖDYNNETTÄVYYS



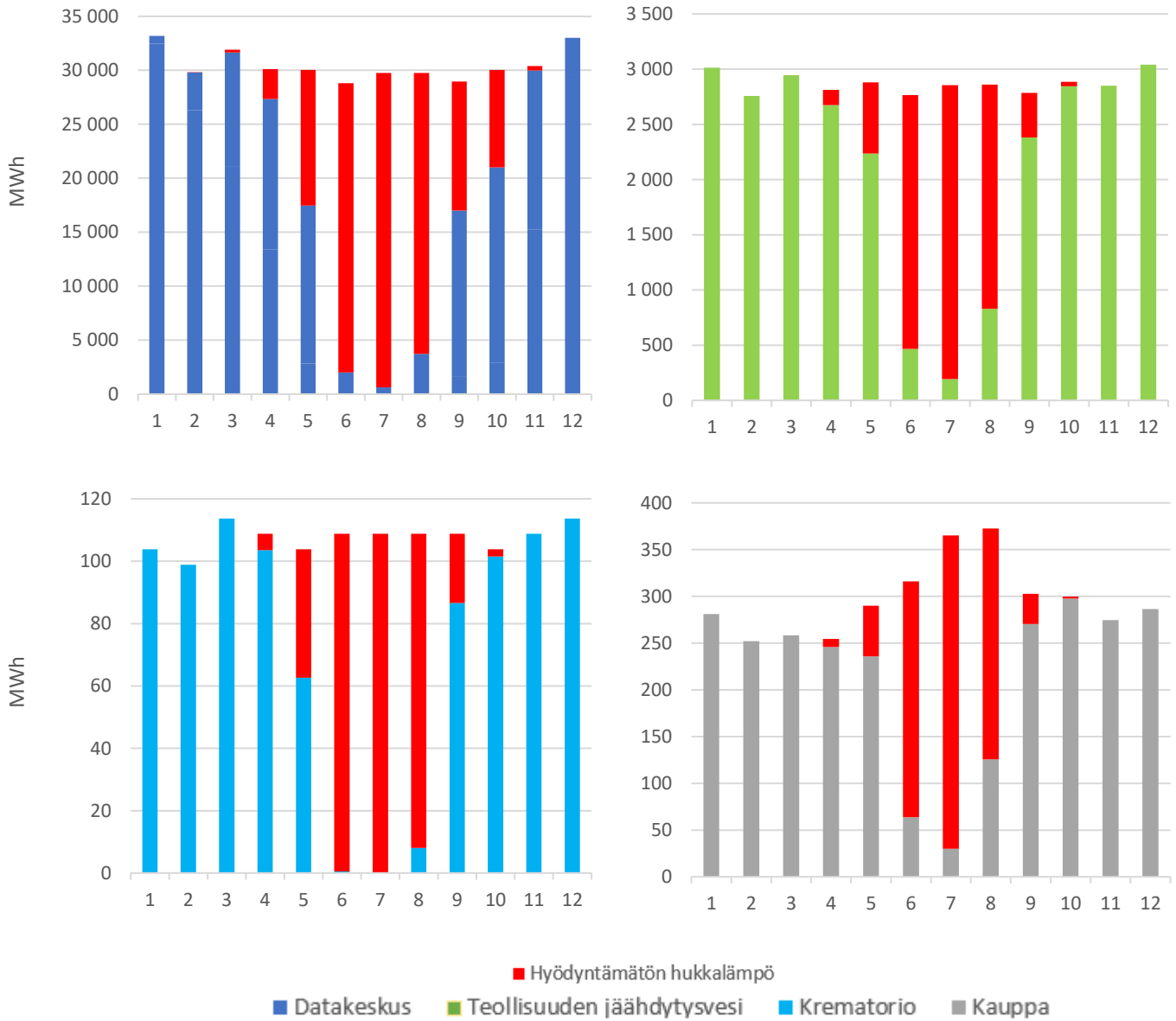
**Kuva 42** Hukkalämpöjen hyödynnettävyys kaukolämpöjärjestelmässä, mikäli tuotantorakenne ei rajoittaisi hukkalämpöjen hyödynnettävyyttä

## LIITE 7: ULKOPUOLISEN LÄMMÖN HYÖDYNTÄMISPOTENTIAALI



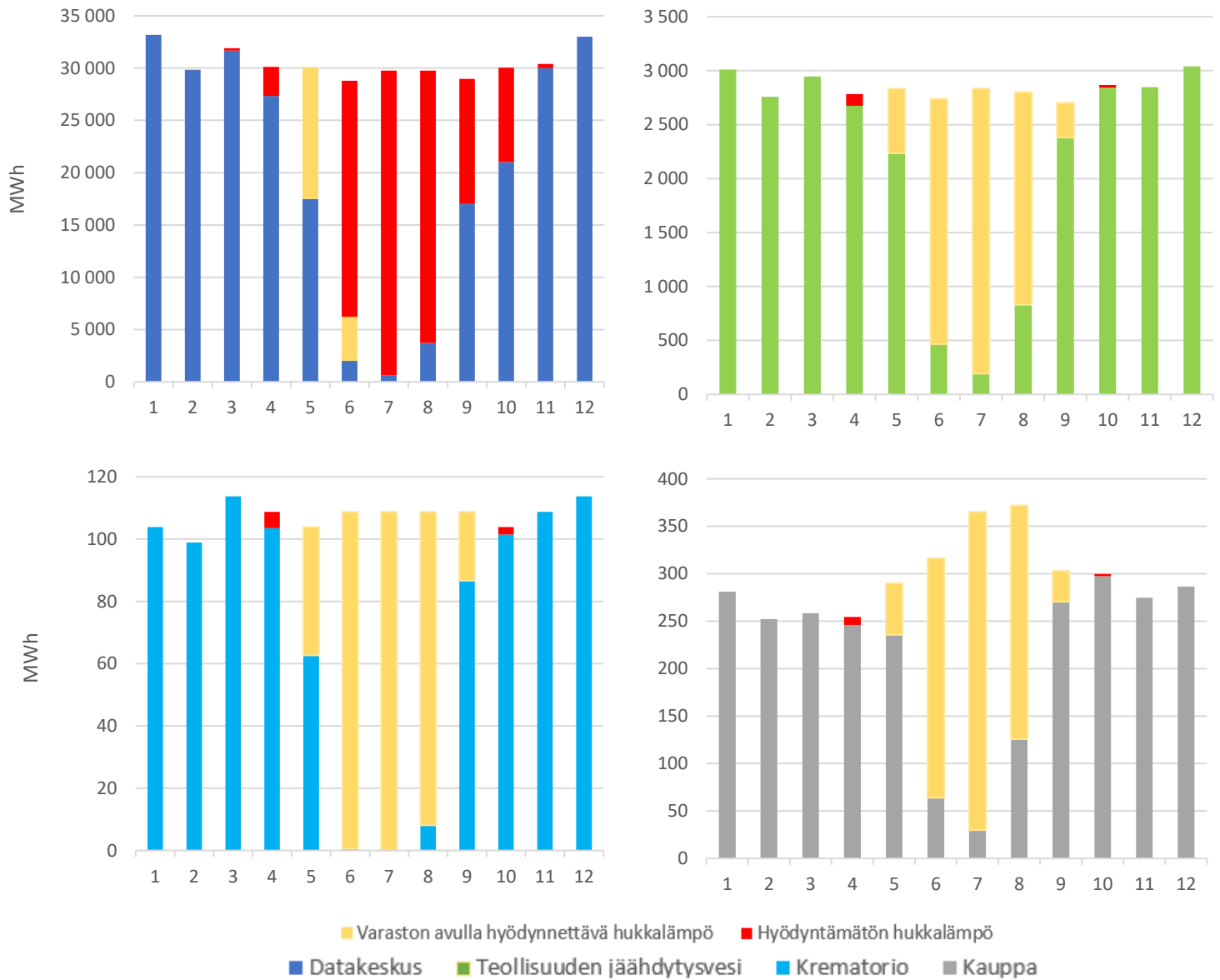
**Kuva 43** Lämmön tarve minimikapasiteetin lisäksi. Hukkalämpöjen hyödyntämistä rajoittava kaukolämpöjärjestelmän nykyisen tuotantorakenteen aiheuttama vaikutus hukkalämpöjen hyödyntämiskapasiteettiin kuukauden funktiona

## LIITE 8: HUKKALÄMPÖJEN NYKYINEN HYÖDYNNETTÄVYYS



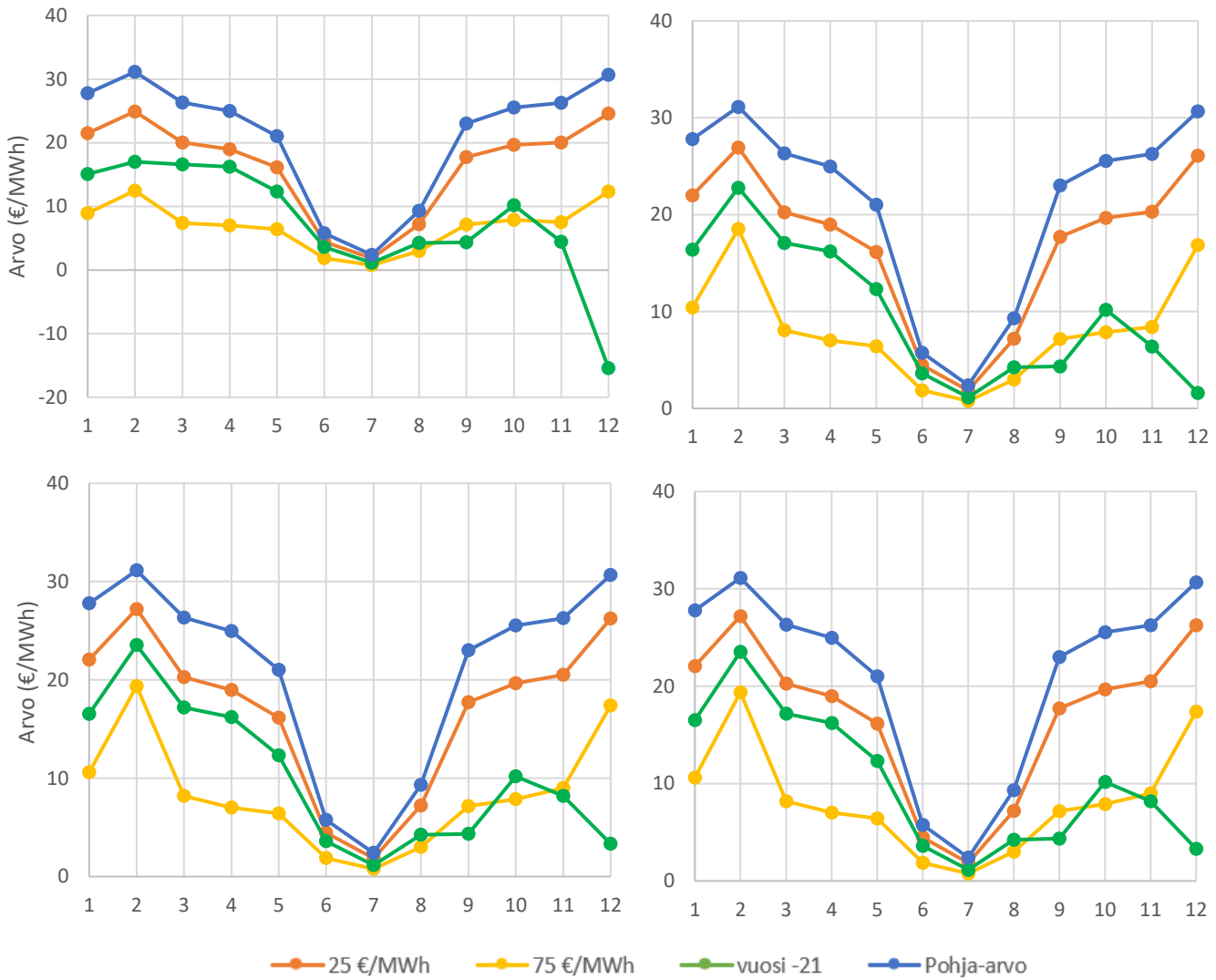
**Kuva 44** Tarkastellun datakeskuksen, teollisuuden jäähdytysvesikierron, krematorion, sekä kaupan hukkalämmön nykyinen hyödynnettävyys kuukauden funktiona.

## LIITE 9: HUKKALÄMPÖJEN HYÖDYNNETTÄVYYS KAUSIVARASTOLLA



**Kuva 45** Tarkastellun datakeskuksen, teollisuuden jäähdytysveden, krematorion) ja kaupan (hukkalämpöjen hyödynnettävyys 16,8 GWh kausivarastolla

## LIITE 10: HUKKALÄMPÖJEN TALOUDELLINEN HYÖDYNNETTÄVYYS



**Kuva 46** Tarkastellun datakeskuksen (vasen ylä), teollisuuden jäähdytysvesikerron (oikea ylä), krematorion (vasen ala), sekä kaupan (oikea ala) hukkalämpöjen keskimääräinen arvo eri sähkön hinta skenaariolla kuukauden funktiona.