Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT

School of Energy Systems

Energiatekniikka

Diplomityö

Johan Niemelä

Teollisuuden hukkalämmön hyödyntäminen

Case: Lastulevytehtaan paluulauhde

Tarkastajat: Apulaisprofessori, TkT, Tero Tynjälä, LUT-yliopisto

Tutkijatohtori, TkT, Päivi Sikiö, LUT-yliopisto

Ohjaajat: Energiapalveluiden päällikkö, Timo Lintusaari, Koskisen Oy

Kunnossapitotyönjohtaja, Mika Paavola, Koskisen Oy

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT
School of Energy Systems
Energiatekniikka
Johan Niemelä

Teollisuuden hukkalämmön hyödyntäminen - Case: Lastulevytehtaan paluulauhde

Diplomityö 2020

Tarkastajat: Apulaisprofessori, TkT, Tero Tynjälä, LUT-yliopisto
Tutkijatohtori, TkT, Päivi Sikiö, LUT-yliopisto

Ohjaajat: Energiapalveluiden päällikkö, Timo Lintusaari, Koskisen Oy
Kunnossapitotyönjohtaja, Mika Paavola, Koskisen Oy

68 sivua, 23 kuvaa ja 9 taulukkoa

Hakusanat: hukkalämpö, hyödyntäminen, teollisuus, hyödyntämismenetelmät, lauhde-energia, energiamarkkinat, energiatalous, kaukolämpö

Keywords: waste heat, utilization, industry, utilization methods, condensate energy, energy markets, energy economics, district heating

Diplomityössä tutkittiin case-kohteen avulla teollisuuden hukkalämmön hyödyntämistä ja selvitettiin, kuinka paljon teollisuudessa on hukkalämpöpotentiaalia. Työssä esitettiin tavanomaisimmat hukkalämmön hyödyntämismenetelmät, investointi- ja kannattavuuslaskenta sekä mittarit, joilla hukkalämmön arvoa voidaan tarkastella sekä teollisuusyrityksen, että energiayhtiön näkökulmasta. Diplomityön tarkoituksena oli vähentää teollisuuden kynnystä lähteä mukaan takaisinmaksuajaltaan pidempiaikaisiin energiainvestointeihin ja löytää case-kohteen lastulevytehtaan paluulauhteessa syntyvälle hukkalämmölle kannattavin hyödyntämismenetelmä vaihtoehdoista: lastulevytehtaan korvausilman lämmitys, vaneritehtaan kuumavesisäiliön esilämmitys ja kunnan kaukolämpöverkkoon myynti. Työn tuloksena kannattavin hyödyntämisratkaisu oli kunnan kaukolämpöverkkoon myynti. Lopuksi saatuja tuloksia skaalattiin osaksi isompaa kokonaisuutta ja pohdittiin, mitä toimenpiteitä hukkalämmön hyödyntämisen tehostaminen vaatii energiamarkkinoiden eri osapuolilta.

ABSTRACT

Lappeenranta-Lahti University of Technology LUT

School of Energy Systems

Energy Technology

Johan Niemelä

Industry waste heat utilization - Case: Return condensate of a chipboard mill

Master´s thesis 2020

Inspector: Assistant Professor, D.Sc. (tech), Tero Tynjälä, LUT University

Post Doctoral Researcher, D.Sc. (tech), Päivi Sikiö, LUT University

Instructors: Head of Energy Services, Timo Lintusaari, Koskisen Oy

Maintenance Foreman, Mika Paavola, Koskisen Oy

68 pages, 23 figures and 9 tables

Keywords: waste heat, utilization, industry, utilization methods, condensate energy, energy markets, energy economics, district heating

This Master´s thesis investigated the utilization of waste heat from industry with the help of a case study, and how much waste heat potential there is in industry. The paper presented the most common methods of utilizing waste heat, calculating investment and profitability, and measuring the value of waste heat from the perspective of both an industrial company and an energy company. The purpose of the thesis was to reduce the industry's threshold to engage in longer-term energy investments with a long payback period and to find the most cost-effective recovery method for the waste heat generated by the chipboard mill's return condensate: heating the chipboard factories replacement air, the pre-heating of the plywood mill's hot water tank and the sale of waste heat to the municipal district heating network. As a result of the work, the most profitable recovery solution was found to be the sale of waste heat to the municipal district heating network. Finally, the results were scaled as part of a larger whole and some considerations were made about the measures needed to be taken by different parties in the energy market to improve the utilization of waste heat.

SISÄLLYS

1 JOHDANTO 7

2 TEOLLISUUDEN HUKKALÄMPÖ 8

2.1 Hukkalämpöpotentiaali 8

2.2 Suurimmat hukkalämmön tuottajat 9

2.3 Hukkalämmön lämpötilatasot 9

2.4 Hyödyntämiskohteen etsintä ja valinta 10

2.5 Rajaus ja vaikutukset yhteiskuntaan 12

2.6 Hukkalämmön arvo energiamarkkinoilla 13

2.6.1 Vaikutukset voimalaitosinvestointeihin 14

2.6.2 Energiamarkkinoiden kehitystrendit 15

2.7 Investointi- ja kannattavuuslaskenta 16

2.7.1 Energiayhtiön näkökulma 19

2.7.2 Teollisuusyrityksen näkökulma 21

2.8 Lämmönkeräysjärjestelmän tekninen toteutus 22

2.9 Esimerkkitapaukset 27

2.9.1 Kiilto Oy - Lempäälä 27

2.9.2 Elenia Lämpö Oy ja Stora Enso Oyj - Heinola 28

2.9.3 Helen Oy ja Oy Gustav Paulig Ab - Helsinki 29

3 KÄYTETYT TUTKIMUSMENETELMÄT 30

3.1 Kirjallisuusselvitys 30

3.2 Kokeellinen tutkimus 30

3.3 Asiantuntijahaastattelut 30

4 CASE: KOSKISEN OY – LASTULEVYTEHTAAN PALUULAUHDE 31

4.1 Kirjallisuusselvitys 31

4.1.1 Energiatase 31

4.1.2 Höyrykaavio 33
4.1.3 Energiakustannukset ja tuotot 34
4.1.4 Hukkalämmön lähde 35
4.1.5 Ensimmäinen hyödyntämiskohde: korvausilman lämmitys 38
4.1.6 Toinen hyödyntämiskohde: kuumavesisäiliön esilämmitys 41
4.1.7 Kolmas hyödyntämiskohde: myynti kaukolämpöverkkoon 43
4.1.8 Tulokset 45
4.2 Kokeellinen tutkimus 47
4.2.1 Paluulauhteen koejärjestelyt 47
4.2.2 Paluulauhteen virtausmittaukset 48
4.2.3 Tulokset 48
4.3 Asiantuntijahaastattelut 50
4.3.1 Calefa Oy 50
4.3.2 Tulokset 50
5 POHDINTA 52
5.1 Lastulevytehtaan paluulauhteen energiasisältö 52
5.1.1 Käyttö korvausilman lämmityksessä 53
5.1.2 Käyttö kuumavesisäiliön esilämmityksessä 53
5.1.3 Käyttö kaukolämpöverkkoon myynnissä 54
5.2 Kannattavin hyödyntämisratkaisu 55
5.2.1 Investointikustannukset 56
5.2.2 Takaisinmaksuaika 56
5.2.3 Tekninen toteutus 57
5.3 Herkkyys- ja virhetarkastelut 58
6 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET 62
LÄHTEET 64

SYMBOLILUETTELO

Roomalaiset

c_p	ominaislämpökapasiteetti	kJ/kgK
E	energia	kWh, MWh, GWh, TWh
i	korkokanta	%
m	massa	kg
p	paine	bar
q_v	tilavuusvirta	m^3/h
s	matka	mm, m
T	lämpötila	ºC, K
t	aika	s, h, a

Kreikkalaiset

ρ	tiheys	kg/m^3
Φ	lämpöteho	kW, MW

Alaindeksit

alt	vaihtoehtoinen
e	energia
n	vuosi
ut	hyödyntäminen
wh	hukkalämpö

Yläindeksit

n	vuosi

Lyhenteet

CDNCF	kumulatiivinen diskontattu nettokassavirta
NPV	nettonykyarvo

1 JOHDANTO

Teollisuuden energian käytöstä menee vuosittain suuri määrä energiaa hukkaan ja monilla teollisuusyrityksillä on tietämättään arvokas sivutuote, hukkalämpö, jota syntyy muun muassa teollisuuden lämmitys- ja jäähdytysprosesseissa sekä niiden yhdistelmissä. Hukkalämpö voidaan tuoda takaisin tuotantolaitoksen pääprosessiin ja käyttää uudelleen tai sille voidaan etsiä jokin muu hyödyntämiskohde yrityksen omalta toiminta-alueelta tai sen ulkopuolelta. Valtakunnallisella tasolla teollisuudessa vuotuisesti syntyvän hukkalämmön energiamäärä on useita kymmeniä terawattitunteja ja yksittäisessä kohteessa voidaan puhua megawattitunneista, gigawattitunneista tai jopa terawattitunneista, jos kyseessä on merkittävä tuotantolaitoskokonaisuus.

Tämän diplomityön tarkoituksena on tutkia teollisuuden hukkalämmön hyödyntämistä case-esimerkin avulla ja vähentää teollisuuden kynnystä lähteä mukaan pidempiaikaisiin energiainvestointeihin sekä löytää case-kohteeseen parhaiten soveltuva hukkalämmön hyödyntämismenetelmä. Työn teoreettisena pohjana toimivassa kirjallisuuskatsauksessa tarkastellaan teollisuuden hukkalämpöpotentiaalia, tavanomaisimpia hukkalämmön hyödyntämismenetelmiä, investointi- ja kannattavuuslaskentaa sekä mittareita, joiden avulla hukkalämmön arvo voidaan määrittää energiayhtiön ja teollisuusyrityksen näkökulmasta.

Työn case-tutkimuksessa selvitetään tietoja kohdeyritykseltä saatavaan aineistoon ja materiaaliin pohjautuvan kirjallisuusselvityksen sekä erillisen kokeellisen tutkimuksen avulla. Omien laskelmien ja pohdinnan tueksi tehdään asiantuntijahaastattelu, jossa selvitetään muun muassa case-kohteeseen kannattavimman hukkalämmön hyödyntämiskohteen teknisen toteutuksen investointikustannukset. Lopuksi työ skaalataan suurempaan kokonaisuuteen ja mietitään mitä toimenpiteitä hukkalämmön hyödyntämisen tehostaminen vaatii energiamarkkinoiden ja muiden alan toimijoiden keskuudessa sekä miten teollisuusyrityksiä voidaan kannustaa takaisinmaksuajaltaan pidempiaikaisiin energiainvestointeihin. Teollisuuden hukkalämmön käyttöönotto tarjoaa teollisuusyrityksille hyvän tavan pienentää omaa ympäristökuormaansa ja siten osallistua ilmastonmuutoksen hillitsemiseen yhdessä kiertotalouden tavoitteiden kanssa.

2 TEOLLISUUDEN HUKKALÄMPÖ

2.1 Hukkalämpöpotentiaali

Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy on tutkinut vuonna 2015 valmistuneessa raportissa ”Tehokas CHP, kaukolämpö ja -jäähdytys Suomessa 2010 – 2025” teollisuuden hukkalämpöpotentiaalia kaukolämmön tuotannon näkökulmasta ja selvittänyt, että vuonna 2010 tuotetusta kaukolämmöstä noin 1100 GWh oli peräisin teollisuudesta. Tuorein hukkalämpöpotentiaalia käsittelevä lähde on vuonna 2019 julkaistu Motiva Oy:n esiselvitys ”Ylijäämälämmön potentiaali teollisuudessa”, jonka mukaan teollisuudessa piilevän teknisesti hukkalämmön hyödyntämiseen soveltuvan vuotuisen potentiaalin olevan noin 16 TWh. YIT Teollisuus- ja verkkopalvelut Oy:n (nykyisen YIT Teollisuus Oy:n) (2010) Työ- ja elinkeinoministeriölle laatiman selvityksen ”Teollisuuden ylijäämälämmön hyödyntäminen kaukolämmityksessä” mukaan teollisuudessa meni vuonna 2008 54,4 TWh lämpöenergiaa hukkaan, josta noin kolmannes (18,9 TWh) olisi ollut teknisesti hyödynnettävissä.

Viimeisin tieto teknisestä hukkalämpöpotentiaalista (16 TWh) perustuu vuoden 2017 tilanteeseen ja Motiva kertoo, että aiemmissa selvityksissä (YIT Teollisuus- ja verkkopalvelut Oy 2010; Aalborg University 2013 & Papapetrou et.al 2018, s.212) teknisen hukkalämpöpotentiaalin on arvioitu olevan välillä 6-23 TWh. Virallista selvitystä teollisuudessa hukkaan menevän lämpöenergian kokonaispotentiaalista ei ole tehty vuoden 2010 jälkeen ja esimerkiksi nykyiset Motivan arviot teollisuudessa syntyvän hukkalämmön kokonaismäärästä perustuvat vuoden 2008 tilanteeseen.

Lähdemateriaaleissa teollisuuden hukkalämmöstä käytetään myös nimitystä teollisuuden ylijäämälämpö, tässä työssä puhutaan kuitenkin teollisuuden hukkalämmöstä. Teollisuuden hukkalämpöpotentiaaliin vaikuttavat esimerkiksi tuotantolaitoksen, kunkin vuoden olosuhteet ja operatiiviset toimet eikä hukkalämpöpotentiaalin voida ajatella olevan täysin sama joka vuosi, mutta edellä mainitut määrät kertovat suuruusluokan, jota hukkalämpöä syntyy vuosittain. (VTT 2015 & Motiva 2019.)

2.2 Suurimmat hukkalämmön tuottajat

Suomessa teollisuuden hukkalämpöä syntyy Motivan (2019) mukaan eniten metsä-, kemian- ja metalliteollisuudessa eli aloilla, joissa prosessiin tulevan energian käyttö on kaikista suurinta. Taulukkoon 1 on koottu suurimmilla teollisuuden aloilla oleva tekninen hukkalämpöpotentiaali ja energian käyttö.

Taulukko 1. Arvio vuosittaisesti teknisestä hukkalämpöpotentiaalista ja energiankäytössä suurimmilla toimialoilla. (Motiva 2019)

Mittari	Metsäteollisuus	Kemianteollisuus	Metalliteollisuus	Muut	Yhteensä
Hukkalämpöpotentiaali [TWh/a]	7	4	2	3	16
Energiankäyttö [TWh/a]	82	26	20	10	138

Arvot perustuvat Motivan raportissa (2019) ”Esiselvitys: Ylijäämälämmön potentiaali teollisuudessa” esitettyihin kuviin ”Energiankäyttö” ja ”Ylijäämälämmön tekninen potentiaali” ja ne kuvaavat vuoden 2017 tilannetta. Yhteensä teollisuudessa käytetään 138 TWh energiaa vuosittain ja siitä yli kymmenesosa menee hukkaan.

2.3 Hukkalämmön lämpötilatasot

Hukkalämpö voidaan luokitella matalaan, keskinkertaiseen ja korkeaan lämpötilatasoon kohteessa olevan hukkalämmön lähteen lämpötilan mukaan. Alle 50 celsiusasteinen hukkalämpö on matalaa lämpötilatasoa, 50-100 asteinen hukkalämpö on keskinkertaista lämpötilatasoa ja yli 100 celsiusasteinen hukkalämpö on korkeaa lämpötilatasoa. Matalan lämpötilatason hukkalämpöä syntyy esimerkiksi koneellisen jäähdytyksen lauhde-energiana. Keskinkertaista hukkalämpöä syntyy esimerkiksi öljyvoideltujen paineilmakompressorien jäähdytyksessä ja korkean lämpötilatason hukkalämpöä ovat esimerkiksi tuotantolaitoksen savukaasut. (Motiva 2019.)

Suomessa teollisuuden hukkalämpö on tyypillisesti matalaa ja keskinkertaista lämpötilatasoa vaihdellen alle 100 ja alle 50 celsiusasteen välillä. Matalan lämpötilatason takia hukkalämmön käyttöönotto kohteessa vaatii yleensä toimenpiteenä lämpötilatason noston ja siksi lämpöpumppuinvestointi tulee hyvin usein tarpeeseen. Esimerkiksi kaukolämpöverkkoon syötettävän hukkalämmön tulee olla tällä hetkellä noin 65-115 celsiusasteista vuoden ajan mukaan vaihdellen. Hukkalämmön lämpötilatason tulee olla syöttöhetkellä riittävän korkea,

jotta sitä voidaan hyödyntää kaukolämpöverkossa. Teollisuusyrityksen omissa prosesseissa hukkalämpöä voidaan käyttää matalissakin lämpötilatasoissa hyödyksi sen mukaan mitä kohteen omat prosessit edellyttävät eikä lämpötilaa tarvitse välttämättä nostaa, mutta lämpötilan nosto on monesti tarpeen ja taloudellisesti kannattavaa, kun hukkalämmöstä halutaan ottaa eniten hyötyä irti. Hukkalämmön lämpötilataso on kuitenkin selvitettävä tapauskohtaisesti ennen kuin voidaan tehdä suurempia johtopäätöksiä sen soveltuvuudesta käytettäväksi eri hyödyntämiskohteissa. (Motiva 2019.)

Motivan esittämä (2019) teknisen hukkalämpöpotentiaalin jakaantuminen perustuu vuoden 2010 selvitykseen ”Teollisuuden ylijäämälämmön hyödyntäminen kaukolämmityksissä”, jossa 18,9 terawattitunnista noin 41 % on yli 55 celsiusasteista ja noin 59 % alle 55 celsiusasteista (taulukko 2). Nykyiseen hukkalämpöpotentiaaliarvion 16 terawattituntiin suhteutettuna, vastaava jako olisi noin 6,6 TWh yli 55 celsiusasteista ja 9,4 TWh alle 55 celsiusasteista hukkalämpöä (taulukko 2).

Taulukko 2. Arvio vuosittaisen teknisesti hyödynnettävissä olevan hukkalämpöpotentiaalin jakautumisesta alle ja yli 55 celsiusasteen lämpötilatasoihin. Nykytilanne on suhteutettu vuoden 2010 tasosta. (Motiva 2019)

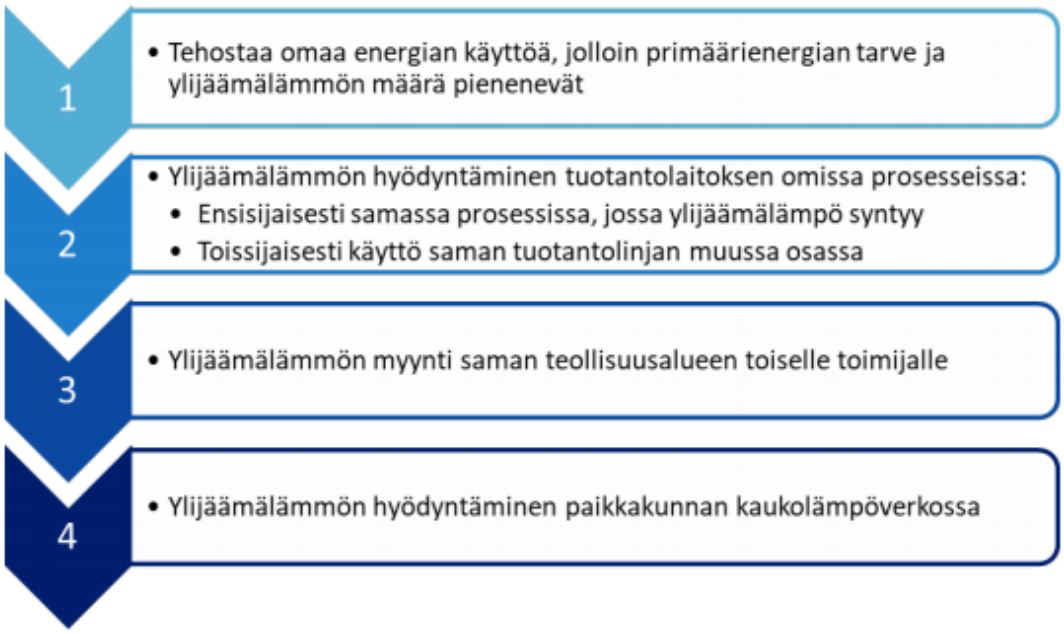
Mittari	2010	2019
Hukkalämpöpotentiaali [TWh/a]	19	16
Alle 55 celsiusasteista [TWh/a]	11	9
Yli 55 celsiusasteista [TWh/a]	8	7

Tämänhetkinen todellinen hukkalämmön jakauma lämpötilatasojen suhteen voi erottua vuoden 2010 tilanteesta, mutta yleinen kuva on, että matalan lämpötilatason hukkalämmön osuus teknisestä hukkalämpöpotentiaalista on kaikista suurin. (Motiva 2019.)

2.4 Hyödyntämiskohteen etsintä ja valinta

Hukkalämmön hyödyntäminen vaatii soveltuvien käyttökohteiden etsimisen teollisuusyrityksen toiminta-alueelta. Hukkalämmön hyödyntämiskohdetta kannattaa etsiä yrityksen omasta pääprosessista tai sivuprosessista, jotta hukkalämpö voidaan kohdistaa suoraan yrityksen omaan tuotantoon ja omien lopputuotteiden valmistukseen. Hukkalämpöä voidaan hyödyntää myös teollisuusyrityksen tilojen lämmityksessä ja jäähdytyksessä. Lisäksi

yrityksen tuottama hukkalämpö voidaan käyttää hyödyksi yhteiskunnassa myymällä se esimerkiksi paikalliseen kaukolämpöverkkoon tai lähellä sijaitsevalle muulle teollisuudelle. Motivan (2019) mukaan hukkalämmön hyödyntämiskohdetta etsiessä tulisi noudattaa kuvan 1 hierarkiaa.



Kuva 1. Teollisuuden hukkalämmön (ylijäämälämmön) käytön hierarkia (Motiva 2019)

Kuvassa 1, jossa ensimmäisenä on oman primäärienergian tarpeen ja hukkalämmön pienentäminen, toisena on hukkalämmön käyttö tuotantolaitoksen omissa prosesseissa, kolmantena on hukkalämmön myynti saman teollisuusalan toiselle toimijalle ja neljäntenä on hukkalämmön hyödyntäminen paikkakunnan kaukolämpöverkossa. (Motiva 2019.)

Hukkalämmön soveltuvuus hyödyntämiskohteisiin on tapauskohtaista ja sen kannattavuuden arvioimiseksi ja käyttöönottoon liittyvän päätöksenteon tueksi voidaan laatia investointi- ja kannattavuuslaskelmia sekä erilaisia mittareita hukkalämmön lähteen arvon määrittämiseksi. Ennen laskelmien tekoa hukkalämmön lähteestä tulee kuitenkin selvittää riittävät lähtötiedot, joko yrityksen sisäisestä tietojärjestelmästä tai mittaamalla. Esimerkiksi lämpötilataso T [°C], massavirta q_m [kg/s] ja vuotuinen tuotantoaika t [h] ovat hyvin olennaisia suureita hukkalämmön vuotuisen energiasisällön E [MWh/a] määrittämiseksi ja hyödyntämiskohteen valitsemiseksi. Kun hukkalämmön energiasisältö on tiedossa, voidaan laskea

mitä säästöjä/tuottoja sen käyttöönotto aiheuttaa hyödyntämiskohteessa sekä selvittää, kuinka suurta energiainvestointia [€] hukkalämmön hyödyntäminen vaatii teollisuusyrityksel-tä. Muutokset yhteiskunnassa ja energiamarkkinoilla voivat muuttaa tällä hetkellä kannattavimmalta vaikuttavaa hukkalämmön hyödyntämiskohdetta, hyödyntämishierarkiaa sekä tuoda uusia mahdollisuuksia hukkalämmön hyödyntämiseksi. (Motiva 2019.)

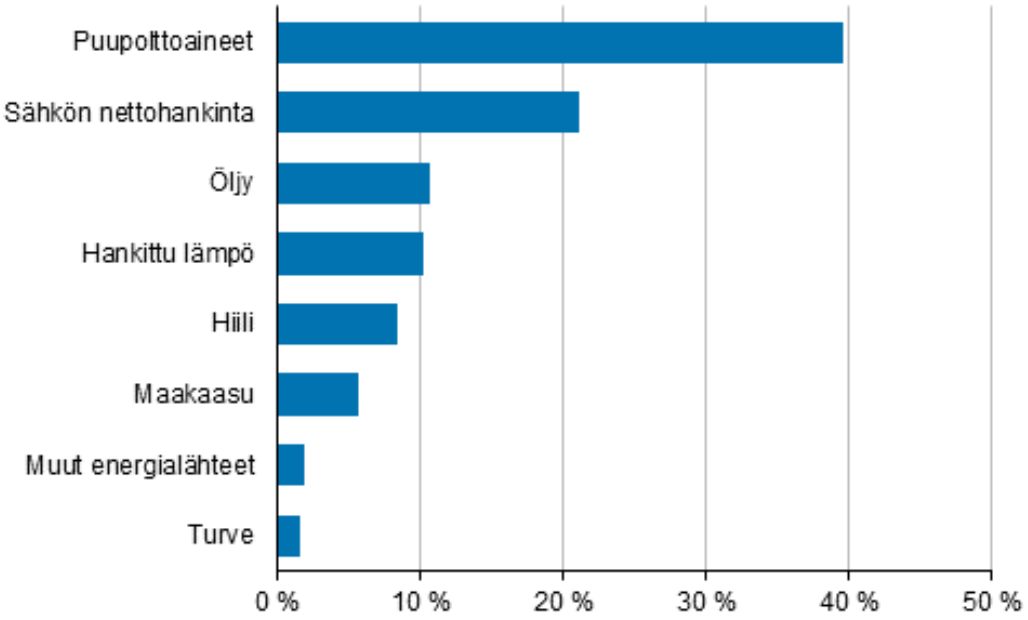
2.5 Rajaus ja vaikutukset yhteiskuntaan

Hukkalämmön hyödyntämistä vaativien investointien kustannukset ja niiden kannattavuus näyttäytyvät eri tavoin teollisuusyritykselle, energiayhtiölle ja yhteiskunnalle. Esimerkiksi teollisuusyritys haluaa säästää prosessiin tulevan energian hankintakustannuksissa, energia-yhtiö haluaa saada tuottoa paikallisesti myymälleen energialle ja yhteiskunta haluaa rakentaa kestävää ja ilmastoystävällistä yhteiskuntaa. Teollisuusyritykset ja energiayhtiöt omaavat eri tuottovaatimukset investoinneille ja yleensä sivuliiketoimintaa (energiainvestoinnit) kos-keva pidempi takaisinmaksuaika (yli kolme vuotta) nähdään kieltävään sävyyn teollisuus-yrityksessä. (Motiva 2019.). Pääministeri Antti Rinteen hallituksen ohjelmassa 6.6.2019 energiaverotuksen uudistuksella yritetään parantaa tätä teollisuuden ja energia-alan välillä piilevää ongelmaa, koska kaukolämpöverkkoon lämpöä tuottavat lämpöpumput ja konesalit luvataan siirtää sähköveroluokkaan II. Lämpöpumppujen sähköveroluokan tiputtaminen toi-seen luokkaan vaikuttaa positiivisesti energiainvestointien kannattavuuksiin ja takaisinmak-suaikoihin. (Valtioneuvosto 2019.)

Toimijoilla on omat intressinsä, jotka eroavat toisistaan, vaikka he kaikki kuuluvatkin isom-massa mittakaavassa Euroopan Union asettamien päästötavoitteiden ja kansainvälisten vel-voitteiden kuten Pariisin ilmastosopimuksen piiriin. Tarkastelun näkökulmaa voidaan skaa-lata osaksi isompaa kokonaisuutta, mutta teollisuuden hukkalämmön hyödyntämisen skaa-laus on rajattu tässä diplomityössä Suomen sisälle ja oman energiatehokkaan yhteiskun-tamme kehittämiseen paikallisen case-esimerkin avulla. Investointi- ja kannattavuuslaskel-nassa energiainvestointia tarkastellaan sekä energiayhtiön, että teollisuusyrityksen näkökul-masta.

2.6 Hukkalämmön arvo energiamarkkinoilla

Suomen teollisuuden energiankäytöstä (kuva 2) suurin osa, lähes 40 % on peräisin puupolttoaineista. Öljyn, hiilen, maakaasun, turpeen ja muiden polttoaineeksi luokiteltujen energialähteiden yhteenlaskettu osuus teollisuuden energiankäytöstä on vajaa kolmasosa. Ulkopuolelta hankittua sähköä on käytössä hieman yli 20 % ja lämpöenergiaa noin 10 %.



Kuva 2. Teollisuuden energiankäytön jakauma energialähteittäin (Tilastokeskus 2019)

Tilastokeskuksen (2019) mukaan teollisuuden käyttämästä energiasta noin kolmannes on ulkopuolelta hankittua, kun huomioidaan sekä sähköenergia, että lämpöenergia. Toisin sanoen teollisuuden käyttämä energia pohjautuu teollisuusyritysten omaan energiantuotantoon. Tilanne on päinvastainen esimerkiksi asumisessa, jossa suurin osa energiankäytöstä pohjautuu ulkopuolelta hankittuun kaukolämpöön, kun teollisuuden ja asumisen energiankäyttöä verrataan lämpöenergian käytön suhteen toisiinsa. (Tilastokeskus 2018.)

Hukkalämmön hyödyntämisen voidaan ajatella kohdistuvan tarkemmin teollisuusyrityksen energiamarkkinoilta hankkimiin polttoaineisiin, lämpöenergiaan tai sähköenergiaan. Mittaamalla hukkalämmön käyttöönotosta syntyviä euromääräisiä säästöjä [€] suorassa energianhankinnassa energiamarkkinoilta tai vähentynyttä tarvetta hankkia polttoaineita omaan

energiantuotantoon voidaan tapauskohtaisesti arvioida hukkalämmön teollisuusyritykselle tuottamaa taloudellista arvoa eri näkökulmista esimerkiksi säästettyä energiaa kohden [€/MWh]. Toisaalta hukkalämmön arvoa voidaan mitata kohteessa säästettävien hiilidioksidipäästöjen määrän mukaan [t/CO_2] ja edelleen euromääräisesti päästökaupassa [€/t/CO_2]. Vastaavasti hukkalämmön arvoa voidaan arvioida energiayhtiön näkökulmasta, jonka rooli on ostaa hukkalämpöä [€/MWh] sen tuottajilta, jos teollisuuden hukkalämmön hyödyntämisen hierarkiassa päästään niin pitkälle tai tilanteessa, jossa teollisuusyritys haluaa myydä tuottamansa hukkalämmön energiayhtiölle, vaikka sillä olisi mahdollisuuksia hyödyntää hukkalämpö itse hierarkian alussa. Isommassa mittakaavassa, valtakunnalliseen energian tuotantoon skaalattuna hukkalämpöpotentiaalin käyttöönotolla voi olla myös vaikutusta tarvittavien voimalaitosinvestointeihin lukumäärään [kpl] ja kapasiteetteihin [MW]. (Sitra 2019.)

2.6.1 Vaikutukset voimalaitosinvestointeihin

Energiatehokkuuslain 1429/2014 viidennen luvun 27 §:n mukaan toiminnanharjoittajat ovat velvollisia tekemään kustannus-hyötyanalyysin sähkön ja lämmön yhteistuotannon edistämiseksi ja teollisuuden käyttökelpoisen hukkalämmön hyödyntämiseksi. Toiminnanharjoittajat ovat velvollisia tekemään kustannushyötyanalyysin esimerkiksi uuden energiantuotantolaitoksen ja teollisuuslaitoksen suunnittelussa tai merkittävässä uudistamisessa, jos laitoksen kokonaislämpöteho tai polttoaineteho ylittää 20 MW. (Energiatehokkuuslaki 1429/2014 luku 5/27§)

Kustannus-hyötyanalyysi velvoitteen piiriin kuuluminen ja edelleen kustannushyötyanalyysin laatiminen edesauttaa teollisuusyritystä tulemaan tietoiseksi oman hukkalämmön hyödyntämisestä ja keräämään teknistaloudellista tietoa, jota voidaan käyttää hyödyksi esimerkiksi tulevien energiainvestointien, kuten hukkalämmön keräysjärjestelmien suunnittelussa. (Energiavirasto 2020.) Pöyryn (2018) työ- ja elinkeinoministeriölle laatiman raportin ”Kivihiilen käytön kieltämisen vaikutusten arviointi” mukaan hukkalämpöjä on ajateltu käyttää apuna kivihiilen korvaamisessa valtakunnallisella tasolla, mutta raportista ei ole arvioitu hukkalämpöpotentiaalin vaikutuksia tuleviin voimalaitosinvestointeihin ja kapasiteetteihin.

2.6.2 Energiamarkkinoiden kehitystrendit

Business Finland Oy:n (entisen Innovaatiorahoituskeskus Tekesin) vuonna 2017 julkaisemassa katsauksessa on tarkasteltu kansainvälisten näkymien avulla Suomalaisen energiajärjestelmän tulevaisuutta ja toimintaympäristöä sekä energia-alan liiketoiminnallista kehitystä. Yksi olennaisimmista kehitystrendeistä on sääriippuvaisen energiantuotannon lisääntyminen, joka vaatii enemmän joustokykyä energiamarkkinoilta. Toinen merkittävä kehitystrendi on ydinliiketoiminnan luonteen muuttuminen perinteisestä energiantuotannosta ja myynnistä palveluliiketoiminnaksi, jossa energiaa myyvän yrityksen ei tarvitse omistaa energiantuotantolaitteistoa. Teollisuuteen peilaten paikallinen energiayhtiö voi omistaa teollisuusyrityksen voimalaitokset, mutta hukkalämpöön liittyvää liiketoimintaa käydään teollisuusyrityksen ja lämmönostajien välillä. (Työ- ja elinkeinoministeriö 2017.)

Tulevaisuuden energiajärjestelmää ja markkinoita on kuvattu jo pitkään joustavaksi ja älykkääksi, mutta tähän on tullut lisäys markkinoiden eri osapuolien (energian tuottaja ja kuluttaja) sekoittumisesta. Kuluttaja voi yhtä aikaa tuottaa, kuluttaa ja varastoida energiaa niin sanotuilla prosumer-markkinoilla, jonka syntyminen on seurausta kasvavalle kysyntäjoustotarpeelle. (Työ- ja elinkeinoministeriö 2017.) Tampereen teknillisen yliopiston tutkimusprojektikokonaisuudessa ”Social Energy – Prosumer Centric Energy Ecosystem (ProCem) on tarkasteltu tarkemmin prosumereiden roolia energiamarkkinoilla. (SENECC 2018.) Vastaavasti kysyntäjoustosta ja sen kehittymisestä löytyy lisää tietoa esimerkiksi Pöyryn alan toimijoille laatimista selvityksestä ”Suomen sähkötehon riittävyys ja kapasiteettirakenteen kehitys vuoteen 2030” (Työ- ja elinkeinoministeriö 2015).

Hukkalämmön hyödyntämisen näkökulmasta keskeinen kehitystrendi on kaukolämpöverkon lämpötilatason yleinen lasku ja kaksisuuntaisuus sekä matalalämpöverkon yleistyminen. Lämpöpumppujen osuus kaukolämpöverkkoon syötetystä energiasta on kasvussa ja suuremmat kokoluokan lämpöpumppujärjestelmät ovat ottamassa entistä enemmän jalan sijaa energiamarkkinoilta. Kasvanut jäähdytyksen tarve ja järjestelmien kehitys on tuonut kaukolämpöyhtiöiden asiakkaille uusia mahdollisuuksia tuottaa omaa energiaa hybridijärjestelmien avulla ja vähentänyt asiakkaiden kaukolämmön tarvetta. Kaukolämmön kokonaisvolyymi on kuitenkin kasvussa, mutta kasvunopeus on hidastumassa. Jatkuva resurssitehokkuuden parantaminen, kiertotalous, lämmityksen päästöjen laskeminen ja muut vallitsevat trendit

ajavat teollisuutta, siihen suuntaan, että hukkalämmön hyödyntämiseen kannattaa panostaa. Vaikuttaa että omassa yhteiskunnassamme energia-alan kehityksen eteen tehdään kovasti töitä ja käytetään paljon resursseja. (Sitra 2017.)

2.7 Investointi- ja kannattavuuslaskenta

Hukkalämpöinvestointeihin liittyvät laskelmat ovat luonteeltaan melko yksinkertaisia ja laskelmien tarkoituksena on selvittää riittävien lähtötietojen avulla, onko investointi kannattava, mitä lämmönkeräämisen mahdollistava energiainvestointi maksaa ja missä ajassa energiainvestointi maksaa itsensä takaisin. Luvussa esitettävät laskentakaavat ovat löydettävissä esimerkiksi Excel-taulukkolaskentaohjelmasta, jossa on yleensä käytännössä järkevintä helppokäyttöisyyden takia toteuttaa laskenta. Teollisuusyrityksen ja energiayhtiön näkökulma sekä lähtötietojen keräys esitetään peruslaskentakaavojen jälkeen. Esimerkiksi korkean lämpötilatason hukkalämmön talteenotto ei vaadi välttämättä lämpöpumppuinvestointia ja se on siten lähtökohtaisesti edullisempaa hyödyntää (pienemmät investointikustannukset suhteessa säästöihin => pienempi takaisinmaksuaika), kuin matalan lämpötilatason hukkalämpö, joka usein vaatii lämpöpumppuinvestoinnin.

Koroton takaisinmaksuaika, **a** voidaan laskea kaavalla (1):

$$a = I / S \tag{1}$$

, jossa a takaisinmaksuaika [a]
I investointikustannukset [€]
S vuotuiset nettosäästöt [€/a]

Rahan aika-arvon huomioon ottaminen tekee takaisinmaksuajan laskemisesta hieman haastavampaa, koska korollisen takaisinmaksuajan laskemiseksi täytyy selvittää diskonttauskorko ja diskonttaustekijä. Investoinnin korollinen takaisinmaksuaika voidaan laskea esimerkiksi nettonykyarvomenetelmän avulla. Motivan (2018) mukaan tyypillinen laskennassa käytetty korkokanta energiainvestoinneille on 3-6 %.

Diskonttaustekijä, DF saadaan laskettua kaavalla (2):

$$\mathrm{DF} = \frac{1}{(1+i)^n} \quad (2)$$

, jossa i korkokanta [%]

n aika [a]

Vuotuiset säästöt kerrotaan kunkin vuoden diskonttaustekijällä, kaava (2), jotta saadaan **vuotuisten säästöjen nettonykyarvot:**

$$\mathrm{NPV_n} = \frac{1}{(1+i)^n} S \quad (3)$$

, jossa $\mathrm{NPV_n}$ on laskentavuoden säästöjen nettonykyarvo [€/a]

Kumulatiivinen diskontattu nettokassavirta saadaan vähentämällä laskentavuoden investointikustannuksista laskentavuoden säästöjen nettonykyarvo kaava (4). Lähtötilanteessa (vuonna 0) kumulatiivinen diskontattu nettokassavirta arvo vastaa alkuperäistä investointikustannusta I.

$$\mathrm{CDNCF_n} = I_n - \mathrm{NPV_n} \quad (4)$$

, jossa I_n on vuonna n jäljellä oleva investointikustannus [€]

Taulukoimalla kaavojen arvot (taulukko 3) (investointikustannukset, vuotuiset säästöt, diskonttaustekijä, säästöjen nettonykyarvo ja kumulatiivinen diskontattu nettokassavirta) riittävän pitkällä tarkastelujaksolla löydetään vuosi, jona säästöjä tuottava investointi saavuttaa positiivisen arvon kumulatiivisen diskontatun nettokassavirran osalta.

Taulukko 3. Esimerkki 200 000 € maksavasta energiainvestoinnista, joka tuottaa vuotuisesti 50 000 € nettosäästöjä. Kumulatiivinen diskontattu nettokassavirta (CDNCF) muuttuu viidennen vuoden aikana positiiviseksi ja kuudentena vuonna investointi on tuottanut yli 60 000 € voittoa. Korkokantana on käytetty 4 %, jonka mukaan diskonttaustekijät on laskettu.

Vuosi [a]	Nettosäästöt [€/a]	Investointikustannukset [€]	Diskonttaustekijä (i= 4 %)	Säästöjen nykyarvo [€]	Kumulatiivinen diskontattu nettokassavirta [€]
0		200 000			-200 000
1	50 000		0,96	48 077	-151 923
2	50 000		0,93	46 228	-105 695
3	50 000		0,89	44 450	-61 245
4	50 000		0,86	42 740	-18 505
5	50 000		0,82	41 096	22 591
6	50 000		0,79	39 516	62 107

Korollisen takaisinmaksuajan laskemiseksi voidaan käyttää suoraa verrantoa kaava (5):

$$\frac{X-Y}{Z-Y} = \frac{0-CDNCF\ (viimeinen\ negatiivinen\ vuosi)}{CDNFC\ (ensimmäinen\ positiivinen\ vuosi)-CDNCF\ (viimeinen\ negatiivinen\ vuosi)} \qquad (5)$$

, jossa X on korollinen takaisinmaksuaika [a]

Y on viimeinen vuosi n jona CDNCF on negatiivinen

Z on ensimmäinen vuosi n jona CDNCF on positiivinen

Taulukon 3 esimerkistä voidaan selvittää korollinen ja koroton takaisinmaksuaika sijoittamalla arvot kaavoihin (1) ja (5):

$a = I / S \Leftrightarrow a$ = 200 000 € / 50 000 €/a = 4,0 vuotta

$$\frac{X-Y}{Z-Y} = \frac{0 - CDNCF\ (viimeinen\ negatiivinen\ vuosi)}{CDNFC\ (ensimmäinen\ positiivinen\ vuosi) - CDNCF\ (viimeinen\ negatiivinen\ vuosi)}$$

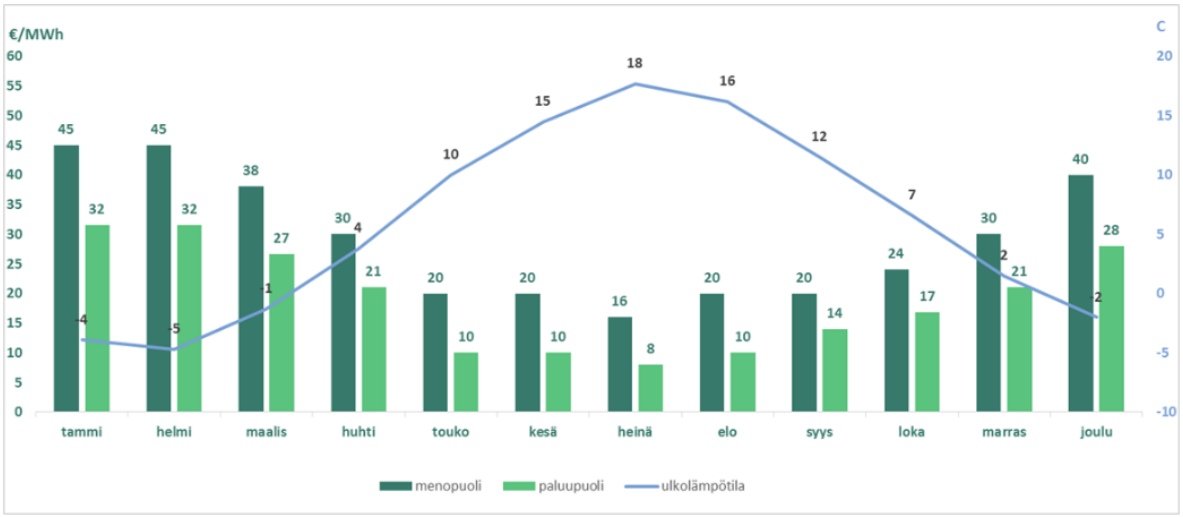
$$\Leftrightarrow \frac{X-4a}{5a-4a} = \frac{0-(-18505\ €)}{22591€-(-18505\ €)}$$

$\Leftrightarrow$ X = 4,5 vuotta

2.7.1 Energiayhtiön näkökulma

Energiayhtiöstä katsottuna laskelmat perustuvat oman energian tuotannon ja hukkalämmön oston sekä mahdollisen lämpöpumppujärjestelmän (tai muun energiainvestoinnin) käyttökustannusten vertailusta. Jos oman energiantuotannon kustannukset ovat suuremmat, kuin hukkalämmöstä maksettava hinta ja vuotuiset hukkalämmön hyödyntämiskustannukset (esimerkiksi lämpöpumpun sähköenergia) on hukkalämmön mukaan ottaminen omaan energiantuotantoverkostoon lähtökohtaisesti kannattavaa. (VTT 2015.)

Hukkalämmön ostohinta on energiantuotannon kustannusten tapaan luonteeltaan vuodenajan mukaan dynaamisesti vaihteleva ja siihen vaikuttavat energiayhtiön energiantuotantokustannusten lisäksi ulkolämpötila. Esimerkiksi Fortum Oyj ylläpitää avoimia kaukolämpömarkkinoita pääkaupunkiseudulla. Alla on esitetty Espoon, Kauniaisen ja Kirkkonummen alueen lämpöenergian (hukkalämmön) viitteelliset ostohinnat. (Fortum 2020.)



Kuva 3. Fortumin antamat viitteelliset lämpöenergian (hukkalämmön) ostohinnat eri vuoden aikoina (Fortum 2020)

Hukkalämmön hyödyntämisestä aiheutuvat **säästöt vaihtoehtoiseen energiantuotantoon nähden** saadaan laskettua kaavalla (6):

$$S = h_{alt} - h_{wh} - h_{ut} \tag{6}$$

, jossa S vuotuiset nettosäästöt [€/a]

h_{alt} vaihtoehtoisen energiantuotannon kustannukset [€/a]

h_{wh} hukkalämmön hinta [€/a]

h_{ut} hukkalämmön hyödyntämiskustannukset [€/a]

Jos hukkalämpö voidaan hyödyntää suoraan esimerkiksi kaukolämpöverkossa, saadaan nettosäästöt vähentämällä vaihtoehtoisen energian tuotannon kustannuksista pelkästään hukkalämmöstä maksettava hinta. Esimerkiksi menopuolelle helmikuussa syötettävä hukkalämpö aiheuttaa kuvan 3 hinnaston mukaisesti energiayhtiölle 45 €/MWh kustannuksia. Hukkalämmön määrän tuotantotehon ollessa 1 MW on ostettavan hukkalämmön määrä ja kustannus energiayhtiölle helmikuussa 696 MWh (29 d·1 MW·24 h/d) ja 31320 € (696 MWh· 45 €/MWh) , kun oletetaan, että hukkalämmön tuotanto on jatkuvaa koko kuukauden ajan. Vaihtoehtoisen energiantuotannon kustannuksiin (55 €/MWh) verrattuna energiayhtiö säästäisi helmikuussa 6960 € (S = 55 €/MWh·696 MWh – 45 €/MWH·696 MWh).

2.7.2 Teollisuusyrityksen näkökulma

Teollisuusyrityksen suhteen laskelmat toimivat osana selvitystyötä, jossa tutkitaan taloudellisten mittarien ja tunnuslukujen avulla kannattaako energiainvestointiin lähteä, ja mitä eri hukkalämmön hyödyntämisen vaihtoehdot tuovat yritykselle. Olennaista on vertailla kartoitettuja hukkalämmön hyödyntämisvaihtoehtoja mahdollisimman todenmukaisin lähtötiedoin ja selvittää niiden joukosta kohteeseen parhaiten soveltuva ratkaisu. Kaavan 1 nettosäästöt voidaan määrittää esimerkiksi kohteessa säästetyn kaukolämmön (€/MWh) tai säästettyjen hiilidioksidipäästöjen (€/t/CO_2) mukaan kohteen kuuluessa päästökaupan piiriin. Suurten teollisuusyritysten käyttämä energia pohjautuu usein omaan energiantuotantoon ja kaavan (1) nettosäästöt voidaan määrittää säästetyn polttoaineen mukaan. Kaavan (1) investointikustannukset pohjautuvat teollisuusyrityksellä energian keräysjärjestelmän: suunnittelusta, hankinnasta ja rakentamisesta kohteeseen. Kaavassa (7) on esitetty **teollisuusyrityksen hukkalämmön arvon määrittäminen.**

$$h_{wh} = Eh_e \tag{7}$$

, jossa h_{wh} hukkalämmön arvo [€/a]
E vuotuinen energiasisältö [MWh/a]
h_e lämpöenergian hinta [€/MWh]

Kaavassa (7) oleva energiasisältö vastaa sitä energiamäärää, joka teollisuusyrityksessä voidaan käyttää hyödyksi ja **hyödynnettävissä oleva häviölämpövirta** saadaan määritettyä kaavalla (8).

$$\phi = c_p q_m \Delta T \tag{8}$$

, jossa ϕ hukkalämmön lämpöteho [kW]
c_p hukkalämmönlähteen ominaislämpökapasiteetti [kJ/kgK]
q_m hukkalämmön lähteen massavirta [kg/s]
ΔT hyödynnettävän lämpöenergian alku- ja loppulämpötilan erotus [K]

Esimerkiksi 150 °C vettä (ominaislämpökapasiteetti 4,19 kJ/kgK ja tiheys 1000 kg/m^3), jonka massavirta on 2,0 m^3/h hyödynnetään taserajaan 20 °C asti. Sijoitetaan arvot kaavaan 8 ja saadaan yhtälö:

$$\phi = 4{,}19 \text{ kJ/kgK} \cdot \frac{1000 \frac{kg}{m^3} \cdot 2{,}0 m^3/h}{3600 s/h} \cdot 130 \text{ K}$$

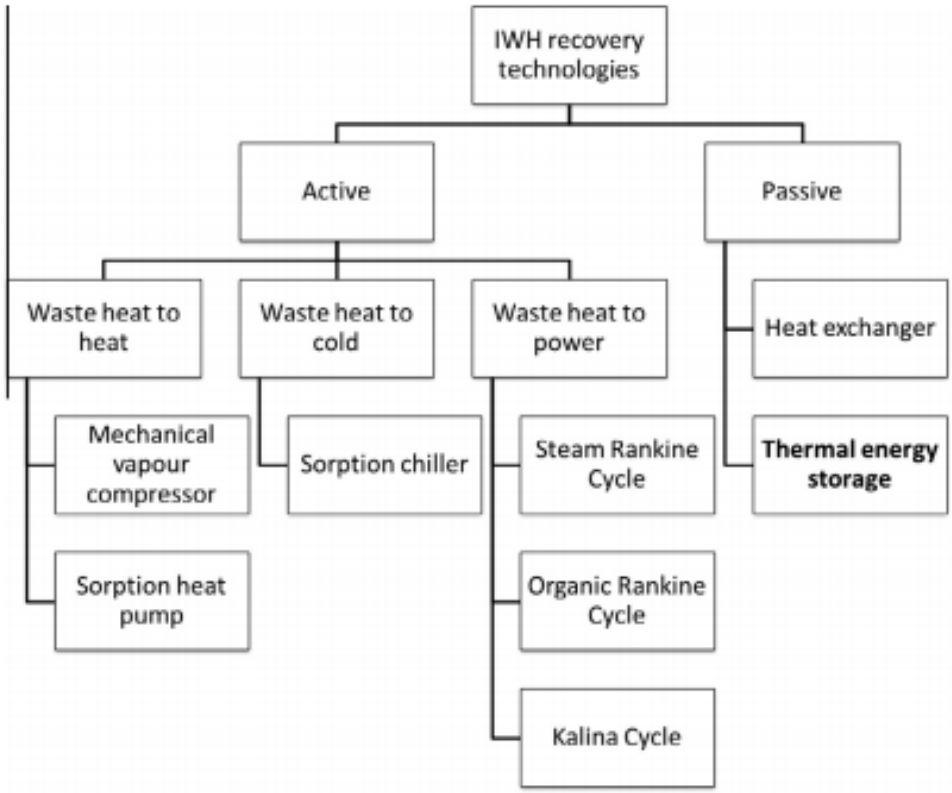
$$\Leftrightarrow \phi = 302{,}6 \text{ kW}$$

Jos oletetaan, että 302,6 kW:n lämpötehon hukkalämpöä on saatavilla tasaisesti ympärivuoden (8760h) saadaan energiasisällöksi 2,7 GWh/a (lämpöteho ϕ 302,6 kW·aika t 8760h). Energian / polttoaineen hinnan ollessa vuotuisella tasolla keskimäärin 25 €/MWh saadaan hukkalämmön arvoksi 66 269 € (h_{wh} = 2650,8 MWh/a·25 €/MWh). Hukkalämmön arvon tarkempi määrittely vaatii vuosidataa hukkalämmön syntymisestä (pysyvyyskäyrä) teollisuusyrityksen tietojärjestelmästä ja ajankohtaista tietoa energian/polttoaineen hinnasta. Ennusteet tulevaisuudessa tapahtuvista muutoksista sekä yrityksen sisällä (esimerkiksi lämpöenergian tarve ja hukkalämmön tuotanto), että ulkopuolella (esimerkiksi energian tai polttoaineen hinnan vaihtelu energiamarkkinoilla) vallitsevilla energiamarkkinoilla kannattaa pyrkiä ottamaan mahdollisimman hyvin huomioon investointi- ja kannattavuuslaskelmia ja niiden pohjalta tehtäviä päätöksiä tehdessä. Tarkempien laskelmien ja hukkalämmön arvoa määrittävien tunnuslukujen selvittämisessä teollisuusyritys voi tehdä yhteistyötä esimerkiksi paikallisen energiayhtiön tai ulkopuolisen konsultin kanssa.

2.8 Lämmönkeräysjärjestelmän tekninen toteutus

Hukkalämmön talteenotto, lämmönsiirto ja lämmönkeräys ovat tekniseltä toteutukseltaan samankaltaisia riippumatta millä alalla lämpöenergiaa käsitellään. Tieteellisen aineiston hakua tehdessä huomaa, että hukkalämmön talteenottoa ja teknologiaa käsittelevät artikkelit keskittyvät case-tapauksien tutkimiseen. Esimerkiksi artikkelissa ”Methods of waste heat recovery – A compressor station case study” kompressoriasemalla syntyvää hukkalämpöä (yli 900 MWh:n vuotuinen potentiaali) tarkastellaan suorassa lämmöntalteenotossa, lämmön varastoinnissa ja sähkön tuotannossa. (Kostowski et.al 2019.)

Teollisuuden hukkalämmön talteenottoteknologiat voidaan luokitella kuvan 4 mukaisesti aktiivisiin ja passiviisiin teknologioihin. (Miro et.al. 2015, s. 285.)



Kuva 4. Teollisuuden hukkalämmön talteenottoteknologioiden luokittelu (Miro et.al 2015, s. 285)

Aktiivista hukkalämmön talteenottoa ovat hukkalämmön muuntaminen lämpöenergiaksi, kylmäenergiaksi ja sähköenergiaksi. Passiivista hukkalämmön talteenottoa on lämmön siirtäminen ja lämmön varastointi. Motiva (2019) on taulukoinut raportissa ”Esiselvitys: ylijäämälämmön potentiaali teollisuudessa” eri hukkalämmön hyödyntämisteknologioiden etuja ja haittoja sekä esittänyt niiden käyttökelpoisuuksia eri lämpötilatasoissa (kuvat 5 ja 6). Sähkön tuotannossa hukkalämpöä tulee olla riittävästi saatavilla ja ORC-laitteiston kohdalla lämpötilan tulee lähtökohtaisesti olla yli 100 celsiusastetta, jotta teknologia voi toimia kunnolla.

Korkean lämpötilatason hukkalämmölle on enemmän käyttömahdollisuuksia teknologioiden puolesta kuin matalan lämpötilatason hukkalämmölle, mutta Motivan mukaan vaikuttaa

siltä, että uusia teknologioita on kehitteillä ja vanhoja parannetaan niin, että matalalämpöistä hukkalämpöä voidaan hyödyntää entistä laajemmin teknologioin. (Motiva 2019.)

Teollisuuden hukkalämmön hyödyntämisen teknisten ratkaisujen markkinoinnissa vallitseva trendi on lämpöpumppuratkaisujen myynti lämpö- ja kylmäenergiaratkaisuissa ja ORC-prosessi sähköenergiaratkaisuissa tai näiden yhdistelmissä. Esimerkiksi hollolalainen hukkalämpöratkaisuihin erikoistunut yritys Calefa Oy on kehittänyt kuumalämpöpumpun, jolla teollisuudessa syntyvää hukkalämpöä voidaan nostaa lämpötilaväliltä 20-90 °C yli 130 °C:ksi. (Calefa Oy 2018.)

Teknologia	Hukkalämmön lähde	Edut	Haitat
Lämpöpumput (mekaaninen)	< 10–100 °C	+ Kaupallista luotettavaa tekniikkaa + Matalalämpöistä ylijäämälämpöä voidaan hyödyntää tehokkaasti + Suhteellisen nopea käynnistys ja hyvät osakuormaominaisuudet	– Edellyttää riittävän suuren ja tasaisesti ylijäämälämpöä tuottavan lähteen ja käyttävän kuluttajan – Ylijäämälämmön ja sähkön hinta voi heikentää kannattavuutta huomattavasti
Käyttö suoraan lämmityksessä, esim. kiinteistön lämmityksessä	~ 40–100 °C	+ Investointikustannukset tyypillisesti alhaiset + Yksinkertaista	– Lämmön kysyntä ja ylijäämälämmön tarjonta eivät välttämättä kohtaa
Absorptiolaitteet (jäähdytin ja lämpöpumppu)	~ 60–200 °C	+ Laaja säädettävyys + Ylijäämälämmön käyttö myös jäähdytystarkoituksiin + Yksinkertaisia, kestäviä ja tarvitsevat vähän huoltoa + Alhainen sähkön kulutus	– Alhainen COP matalissa lämpötiloissa – Investointikustannus hyötyihin nähden
ORC-laitos	~ 80–350 °C	+ Matalalämpöistä hukkalämpöä voi hyödyntää suoraan sähköntuotannossa, kaupallista tekniikkaa + Nopea säätö sähköntuotannossa + Pitkä käyttöikä + Kokonaishyötysuhdetta voi parantaa CHP-käytössä	– Investointikustannus hyötyihin nähden – Sähköntuotannon hyötysuhde tyypillisesti 7–25 % ja matalalämpötilaisissa prosesseissa hyötysuhde < 10 %. – Tarvitsee mahdollisimman kylmän lämpönielun. Jopa yli 90 % lämmöstä siirtyy lämpönieluun niin kylmänä, ettei sen hyötykäyttö ole järkevää

Kuva 5. Hukkalämmön hyödyntämisen teknologioiden edut, haitat ja lämpötilatasot. (Motiva 2019)

Teknologia	Hukkalämmön lähde	Edut	Haitat
Kuivatus /Höyrystys /Esilämmitys	~ 40–450 °C	+ Investointikustannukset tyypillisesti alhaiset + Ylijäämälämpö voidaan hyödyntää paikallisesti esim. polttoaineen kuivaukseen ja parantaa polttoaineen ominaisuuksia ja polttoprosessin tehokkuutta + Veden tai ilman esilämmitys on tyypillisesti jatkuva lämmöntarve	– Mahdolliset päästöt raaka-aineen/tuotteen kuivatuksesta – Polttoaineen kuivaus ei aina järkevää, esim. lämpölaitoksessa, jossa on savukaasujen lämmön talteenottojärjestelmä käytössä
Höyrykattila /Jätelämpökattila	> 350 °C	+ Voidaan hyödyntää keski- ja korkealämpöistä hukkalämpöä höyryntuotantoon + Voi parantaa esim. voimalaitoksen hyötysuhdetta merkittävästi	– Höyryntuotannossa voi vaatia lisäpolttimen tai jälkipolttimen riippuen lämmönlähteen lämpötilasta ja lämpömäärästä
Palamisilman lämmitys	> 100 °C	+ Investointikustannukset tyypillisesti alhaiset + Yksinkertaista + Parantaa prosessin energiatehokkuutta	– Käytettävissä ainoastaan polttoprosessien yhteydessä → polttoprosessi tulisi sijaita lähellä hukkalämmön lähdettä – Lämmön kysyntä ja ylijäämälämmön tarjonta eivät välttämättä kohtaa
Stirling-moottori	> 600 °C	+ Hukkalämpöä voi hyödyntää suoraan sähköntuotannossa, kaupallista tekniikkaa + Voi ottaa käyttövoimansa käytännössä mistä tahansa lämmönlähteestä + Pitkä huoltoväli (5000–15000 h) + Hiljainen käyntiääni	– Kannattavuus – Isokokoisia tuottamaansa tehoon nähden – Heikko tehon säädettävyys – Käynnistysaika – Vaatii korkealämpöistä ylijäämälämpöä – Sähköntuotannon hyötysuhde suhteellisen matala

Kuva 6. Hukkalämmön hyödyntämisen teknologioiden edut, haitat ja lämpötilatasot. (Motiva 2019)

2.9 Esimerkkitapaukset

Suomessa on tällä hetkellä hyvin ajankohtaisena puheenaiheena isojen teollisuusyritysten ja teollisuusalueiden toiminnan ohessa syntyvän hukkalämmön hyödyntämismahdollisuudet kaukolämpöverkossa. Kesäkuussa 2019 Neste Oyj tiedotti, että heidän ja Borealis Polymersin Porvoon Kilpilahdessa sijaitsevalla tuotantolaitoksella syntyy niin paljon hukkalämpöä, että se voisi kattaa neljäsosan pääkaupunkiseudun kaukolämmön tarpeesta (Neste Oyj 2019). Helsingin sanomien (2020) tuoreen julkaisun mukaan Kilpilahden tuotantolaitoksella syntyvä hukkalämpö kuuluu matalaan lämpötilatasoon vaihdellen välillä 25-35 celsiusastetta. Hukkalämmön tehon ja vuotuisen tuotannon on arvioitu olevan noin 1000 MW ja 8 TWh (HS 2020). Kilpilahdessa piilleen hukkalämmön energiamäärä (8 TWh) on valtakunnallisesti hyvin merkittävä, koska se on puolet Motivan (2019) arvioimasta teollisuuden hukkalämpöpotentiaalista (16 TWh) ja lähes kuusi prosenttia teollisuuden vuotuisesta energian käytöstä (138 TWh).

Neste Engineering Solutions Oy:n ja Gaia Consulting Oy:n toteuttamassa esiselvityksessä todettiin, että lämmön toimitukset hukkalämmön syntypaikasta pääkaupunkiseudulle voisivat alkaa aikaisintaan vuonna 2025 (Fortum 2019). Hallituksen päätös, siirtää kaukolämpöverkkoon lämpöä tuottavat lämpöpumput toiseen sähköveroluokkaan vaikuttaa hyvin merkittävästi Kilpilahden kokoisten tapausten taloudelliseen kannattavuuteen ja hukkalämmön hyödyntämisen kustannuksiin (Valtioneuvosto 2019). Kilpilahden tapauksessa puhutaan noin 700-1000 M€:n hankkeesta. Teknisestä näkökulmasta laaditaan parhaillaan selvityksiä lämmönsiirron Porvoosta pääkaupunkiseudulle mahdollistavasta yhdysputkesta (noin 40 km) ja lämpöpumppulaitoksista, jotka nostaisivat hukkalämmön lämpötilatason lähelle sataa celsiusastetta. (HS 2020.)

2.9.1 Kiilto Oy - Lempäälä

Marraskuun 30 päivänä vuonna 2019 Kiilto Oy:n Lempäälän liimatehtaalla otetiin käyttöön uusi hukkalämmön uusiokäyttöjärjestelmä, jossa sulateliimaprosessissa syntyvää lämpöenergiaa käytetään hyödyksi yhdessä maalämmön ja maakylmän kanssa (STT Info 2019). Liimatehtaan prosessissa syntyvä hukkalämpö otetaan talteen lämpöpumpuilla jäähdytystankeista ja ohjataan lämmittämään tehdasrakennuksia. Ylimääräinen lämpö- kylmäenergia varastoidaan lämpökaivoihin myöhempää käyttöä varten. Hukkalämpöä oli hyödynnetty Kiilto

Oy:llä jo keväästä 2018 lähtien hukkalämpöä polymerointiprosessista talteen ottavan uusiokäyttöjärjestelmän avulla. Ennen sulateliimaprosessin uusiokäyttöjärjestelmää energian kulutus oli pienentynyt 1800 MWh ja hiilidioksidipäästöt olivat vähentyneet 320 tonnilla. (Kiilto Oy 2017 & Yleisradio 2019.)

Nykyään 2600 MWh lämpöenergian tarvetta vähentävällä hybridijärjestelmällä säästetään rahaa noin 150 000 euroa vuodessa, maakaasun kulutus on puoliintunut ja vuosittain syntyvät hiilidioksidipäästöt ovat vähentyneet 500 tonnilla (Kiilto 2019). Kiilto Oy:n energiajärjestelmää kutsutaan hybridijärjestelmäksi, koska siinä käytetään hyödyksi useita energialähteitä, joilla voidaan kohteen sen hetkisen tarpeen mukaisesti erikseen lämmittää/jäähdyttää tai, lämmittää ja jäähdyttää yhtä aikaa. Kiillon tapauksen tyyppisille energiaratkaisuille on hyvin ominaista, että hukkalämpöjä hyödyntävä energiaratkaisu rakentuu vaihteittain useiden investointien kautta kohti suurempaa kohdekohtaista energiajärjestelmää. (Kiilto Oy 2019.)

2.9.2 Elenia Lämpö Oy ja Stora Enso Oyj - Heinola

Heinolassa sijaitsevalla Stora Enso Oyj:n flutingtehtaalla syntyy hukkalämmön muodossa lähes kaikki (95 prosenttia) Elenia Lämpö Oy:n vuosittain myymästä kaukolämmöstä. Tapauksella on merkittävä historia, koska Stora Enson tuottamaa lämpöenergiaa on hyödynnetty Heinolassa jo 1980- luvulta lähtien. (Elenia Oy 2020.) Vuonna 2017 Elenia Lämpö Oy tuotti Energiateollisuus ry:n kaukolämpötilaston mukaan yhteensä 124 GWh kaukolämpöä, josta 5 GWh oli peräisin omasta tuotannosta polttoaineilla ja 119 GWh oli ostettua lämpöenergiaa. Elenia Oy:llä on 57,5 kilometriä pitkässä kaukolämpöverkossa 56,5 MW:n tuotantokapasiteetti ja kolme kiinteää lämpökeskusta/lämpöpumppua. (Energiateollisuus ry 2018.) Stora Enson tuottama hukkalämpö syntyy flutingtehtaan tuotantoprosessien eri vaiheissa ja sitä on saatavilla ympärivuotisesti. Heinolan kaupungin täytyy käyttää omia varalämpöyksikköjä kaukolämmön tuotannossa ainoastaan talvisaikaan ilmaantuvilla voimakkailla pakkasjaksoilla. (Stora Enso Oyj 2018.)

Vuonna 2015 Elenia Lämpö tiedotti, että yhteistyö lämpöenergiaan liittyvässä liiketoiminnassa Stora Enson kanssa jatkuu pitkälle 2020-luvulle uusien sopimusten myötä. Sopimusten tarkoituksena oli turvata yritysten välinen yhteistyö, kehittää lämpötoimintoja ja pitää kaukolämmön hinta kilpailukykyisenä. (Elenia Lämpö Oy 2015.) Stora Enson (2018) vuonna

2016 Heinolaan tekemä 5 M€:n investointi biokaasureaktoriin tehosti entisestään flutingtehtaan energian käyttöä ja mahdollisti aiempaa suuremman lämpöenergian tuotannon. Elenia lämmön ja Stora Enson tapaus on hyvä esimerkki pidempiaikaisesta yhteistyöstä, jossa käytetään hyödyksi yritysten välistä synergiaa. Tulevaisuudessa voi ilmaantua vastaavanlaisia uusia tapauksia ja syntyä uutta lämpöenergialiiketoimintaa, mikäli teollisuuden hukkalämpöpotentiaali otetaan käyttöön ja vanhat yhteistyöt jatkuvat (Yleisradio 2016.)

2.9.3 Helen Oy ja Oy Gustav Paulig Ab - Helsinki

Helen ja Paulig ovat pilotoineet yhdessä tuoreen vuoden 2020 alussa käyttöönotetun hukkalämmön hyödyntämisratkaisun Helsingin Vuosaaressa. Yritysten virallisten tiedotteiden mukaan uudella teknisellä ratkaisulla voidaan kerätä 1000 kerrostalokaksion vuotuisen lämmöntarpeen verran lämpöenergiaa talteen. Pauligin mukaan lämmöntalteenotto tapahtuu paahtimon paahtoprosessissa, jossa syntyy eniten lämpöä. Hukkalämpö käytetään ensisijaisesti hyödyksi Pauligin omassa lämmityksessä. Omien tarpeiden jälkeen yli jäänyt hukkalämpö ohjataan Helenin kaukolämpöverkkoon ja sitä käytetään Helsingin kaupungin lämmityksessä. Vuosaaren paahtimon teknisestä ratkaisusta tai tarkemmista vuotuisista säästöistä ei ole tiedotettu tarkempia yksityiskohtia. (Helen Oy & Paulig 2019.)

Pauligin ja Helenin tapaus on esimerkki kaksisuuntaisista lämpömarkkinoista, joissa hukkalämpöä tuottava yritys ostaa lämpöenergiaa energiayhtiötä sekä myy tuottamaansa hukkalämpöenergiaa energiayhtiölle. Paulig on investoinut jo aiemmin uusiutuvan energian tuotantoon. Vuonna 2015 biokaasua alettiin hyödyntää Vuosaaren paahtimolla ja nykyään kaikki Suomessa valmistetut kahvit on paahdettu biokaasulla. Hukkalämmön hyödyntämisen kannalta on avuksi, että teollisuusyritys voi tehdä yhteistyötä paikallisen energiayhtiön kanssa, erityisesti tapauksissa, joissa hyödyntämismenetelmä on uusi. (Helen Oy & Paulig 2019.)

3 KÄYTETYT TUTKIMUSMENETELMÄT

3.1 Kirjallisuusselvitys

Kirjallisuusselvitystä käytettiin diplomityön case-kohdeyritykseltä, Koskisen Oy:ltä saadun materiaalin ja aineiston tarkasteluun sekä lastulevytehtaan paluulauhteen tutkimiseen. Yrityksen toiminnan aikana on kertynyt runsas määrä tietoa, joka kertoo esimerkiksi prosessien paine- ja lämpötilatasoista sekä koko yrityksen energiataseesta.

Kirjallisuusselvitys on rajattu Koskisen Oy:n Järvelän päätoimipisteen tarkasteluun hukkalämmön hyödyntämisen näkökulmasta ja kirjallisuusselvitystä käytetään tukevana tutkimusmenetelmänä kokeelliselle tutkimukselle ja asiantuntijahaastatteluille.

3.2 Kokeellinen tutkimus

Kokeellista tutkimusta käytettiin case-kohteen lastulevytehtaan paluulauhteen tutkimiseen. Paluulauhteesta haluttiin selvittää virtaama tekemällä virtausmittauksia ja saada todellista tietoa kohteessa syntyvän hukkalämmön määrästä.

Virtausmittauksia käytettiin tukevana menetelmänä kirjallisuusselvitykselle ja asiantuntijahaastatteluille, ja saatuja tuloksia hyödynnettiin työn pohdinta osuuden sisältämissä laskelmissa. Mittauksista tehtiin erillinen mittaussuunnitelma ja tulokset kirjattiin digitaaliseen tiedonkeruuyksikköön, jonka pohjalta kokeellisen tutkimuksen tulokset ovat esitetty.

3.3 Asiantuntijahaastattelut

Asiantuntijahaastatteluita käytettiin case-tutkimuksessa triangulaation muodostamiseen kolmesta toisistaan riippumattomasta tutkimusmenetelmästä kirjallisuusselvityksestä, kokeellisesta tutkimuksesta ja asiantuntijahaastatteluista. Hukkalämpöratkaisuihin erikoistuneelta Calefa Oy:ltä haluttiin saada tukea case-kohteen hukkalämmön hyödyntämisratkaisun investointi- ja kannattavuuslaskelmiin.

Asiantuntijahaastattelut otettiin käyttöön viimeisenä, kun kohteesta oli tehty jo mahdollisimman tarkka alustava tutkimus ja yksityiskohtaisten tietojen perusteella pystyi laatimaan spesifisiä kysymyksiä. Haastattelut toteutettiin sähköpostihaastatteluina. Sähköpostihaastatteluihin on viitattu tekstissä ja ne on esitetty lähdeluettelossa.

4 CASE: KOSKISEN OY – LASTULEVYTEHTAAN PALUULAUHDE

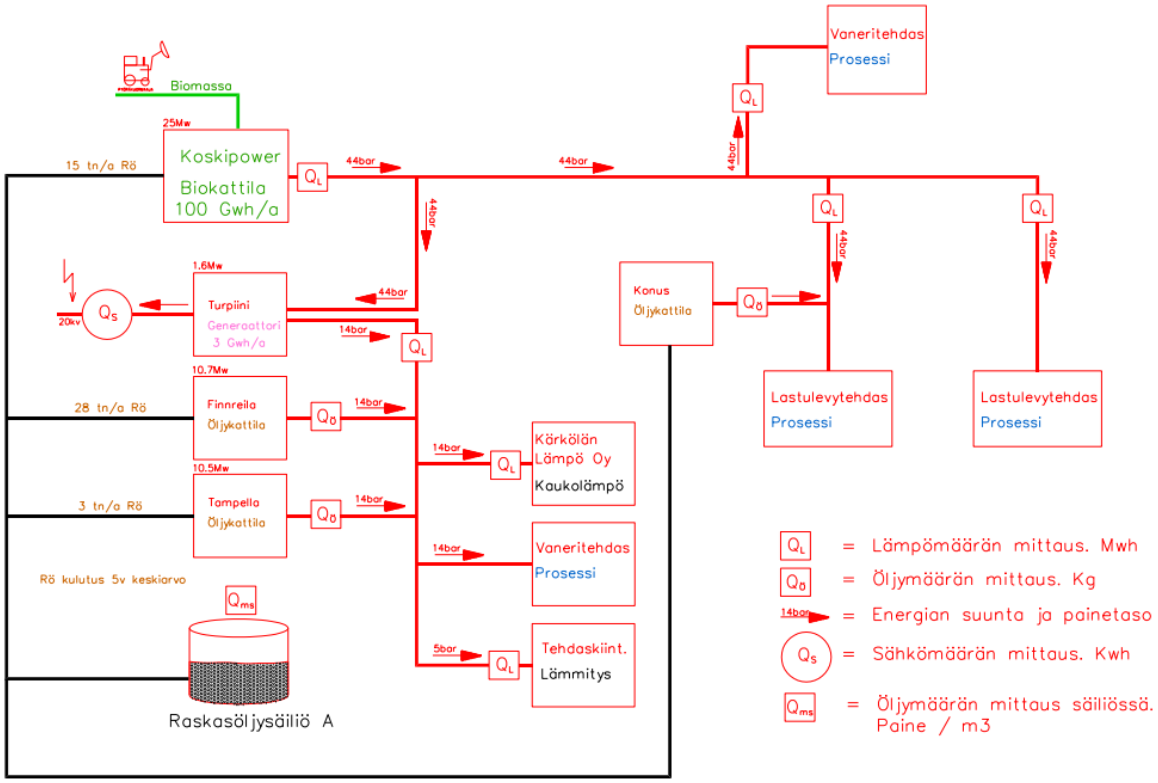
4.1 Kirjallisuusselvitys

Koskisen Oy on Kärkölän kunnassa Järvelässä toimiva kansainvälinen puunjalostusteollisuuden perheyritys. Koskisen Oy:n toimintoyksiköt ovat levyteollisuus, sahateollisuus, taloteollisuus, ohutvaneriteollisuus sekä puunhankinta- ja bioenergia. Tässä diplomityössä Koskisen Oy:n Järvelän tuotantolaitoksen energiajärjestelmää tarkastellaan yhtenä kokonaisuutena lukuun ottamatta lähellä (5-6 km) sijaitsevaa lautatarhaa, jossa on oma energiajärjestelmä. Lastulevytehtaan prosessissa syntyvän hukkalämmön hyödyntämisen tutkiminen kohteessa on rajattu kolmeen eri vaihtoehtoon: lastulevytehtaan korvausilman lämmitys, vaneritehtaan kuumapuristimien kuumavesisäiliön esilämmitys ja myynti Kärkölän kunnan kaukolämpöverkkoon. (Koskisen Oy 2020b.)

Koskisen Oy:llä on Järvelän tehdasalueella omaa energian tuotantoa, mutta voimalaitokset ovat paikallisen energiayhtiön Lahti Energia Oy:n tytäryhtiön Koskipower Oy:n omistuksessa (Koskisen Oy 2017). Koskisen Oy haluaa parantaa jatkuvasti omaa energiatehokkuuttaan ja maksimoida uusiutuvan energian käytön omassa energiantuotannossaan, joten hukkalämmön hyödyntämisen case-tutkimus tarjoaa yritykselle hyvän mahdollisuuden tulla tietoiseksi oman sivutuotteensa arvosta ja säästää energiaa. Samalla yritys voi toimia esimerkkinä muille teollisuusyrityksille, jotka pohtivat oman hukkalämpönsä hyödyntämismahdollisuuksia. Tutkimustuloksia voidaan skaalata osaksi laajempaa kokonaisuutta ja hyödyntää yleisesti teollisuudessa. (Koskisen Oy 2020a.)

4.1.1 Energiatase

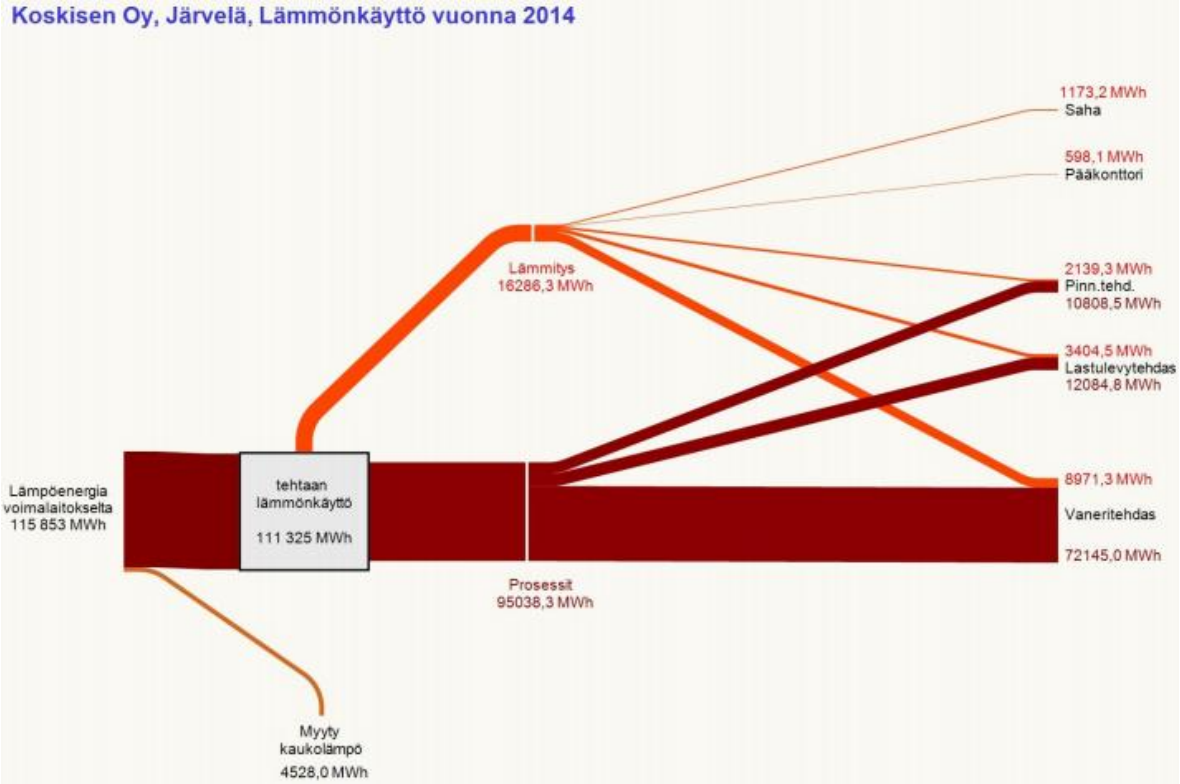
Koskisen Oy:n prosessiin tuleva energia on peräisin kolmella eri voimalaitoksella (kattilatehot 2·12 MW ja 25 MW) poltettavasta bioenergiasta, jota saadaan omassa tuotannossa syntyvistä sivuainevirroista (kuva 7). Tarvittaessa biopolttoainetta voidaan ostaa ulkopuolelta ja esimerkiksi huoltoseisokin aikana voidaan käyttää varalla olevia öljykattiloita. Vuonna 2018 lämpöenergian tuotannosta 96,9 % oli tuotettu biopolttoaineilla ja vuoden 2020 tavoite on 98 %. (Koskisen Oy 2020a.)



Kuva 7. Koskisen Oy:n energian käyttöä kuvaava kaavio

Kuvassa 7 esitetyn 25 MW:n biokattilan lisäksi Koskisen Oy:llä on kaksi 12 MW:n biokattilaa, joissa tuotetaan yrityksen prosesseihin menevää energiaa.

Motiva Services Oy on laatinut vuonna 2015 tilaustyönä tehdyn kohdekatselmuksen, jossa on selvitetty Järvelän tuotantolaitoksen vaneritehtaan ja lastulevytehtaan lämmönkäyttöä sekä energiatehokkuutta parantavia toimenpiteitä. Kuvassa 8 on esitetty Koskisen Oy:n energiatase, joka perustuu vuoden 2014 tilanteeseen. (Turunen & Jääskeläinen 2015.)



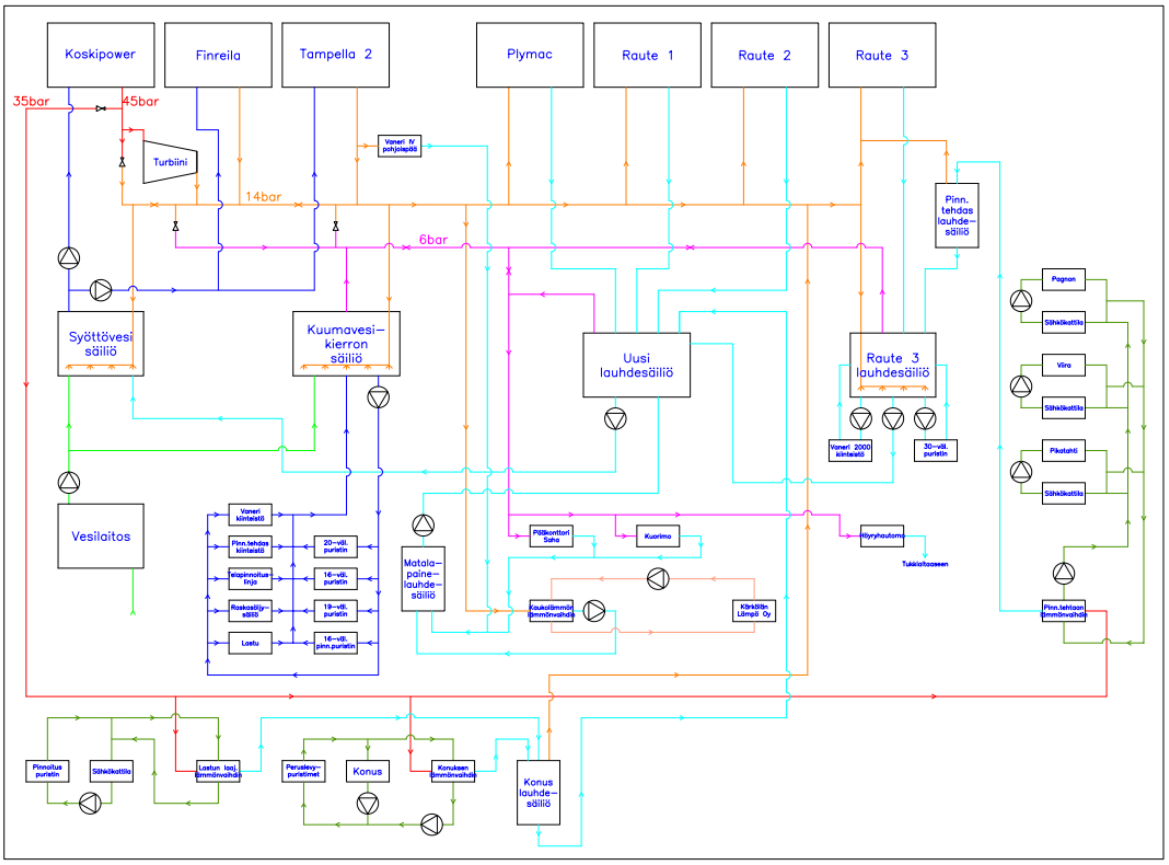
Kuva 8. Koskisen Oy:n Järvelän tuotantolaitoksen energiatase. Arvot perustuvat vuoteen 2014, mutta vastaavat nykytilannetta (Turunen & Jääskeläinen 2015)

Energiataseesta nähdään, että prosessiin sisään tuleva lämpöenergianmäärä on vuosittain noin 116 GWh, josta noin 111 GWh menee tuotantolaitoksen lämmönkäyttöön ja 5 GWh myytäväksi kaukolämmöksi. Tehtaan lämmönkäytöstä prosessit kuluttavat noin 95 GWh ja noin 16 GWh päätyy lämmitysenergiaksi. Vaneritehdas on koko tuotantolaitoksen suurin lämpöenergian kuluttaja, koska 116 GWh:n kokonaisenergiasta lähes 70 % (noin 81 GWh) kuluu vaneritehtaan lämmityksessä ja prosesseissa. Lastulevytehtaalla ja pinnoitustehtaalla kuluu yhteensä noin 28 GWh (noin 24 %) lämpöenergiaa. Vuonna 2014 sähköenergian kokonaiskulutus oli 68,7 GWh, josta omaa tuotantoa oli noin 1 GWh. (Turunen & Jääskeläinen 2015.)

4.1.2 Höyrykaavio

Koskisen Oy:n Järvelän tuotantolaitoksen höyrykaavio on esitetty kuvassa 9. Koskipower-voimalaitoksella tuotetaan 45 baarin korkeapainehöyryä, joka ohjataan 35 baarisena korkeapainehöyrynä, 14 baarisena prosessihöyrynä ja 5 baarisena matalapainehöyrynä yrityksen prosesseihin. Korkeapainehöyryä voidaan johtaa joko turbiinille tai reduktioiden eli

painetason laskujen kautta käyttökohteisiin (kuvat 7 & 9). Korkeapainehöyryverkostossa (35 bar) höyry ohjataan tuotantolaitoksen tehtaiden lämmönvaihtimiin. Prosessihöyryverkoston (14 bar) rinnalla on 5 baariin matalapainehöyryverkosto, jota käytetään tehdasalueella sijaitsevien kiinteistöjen lämmitykseen.



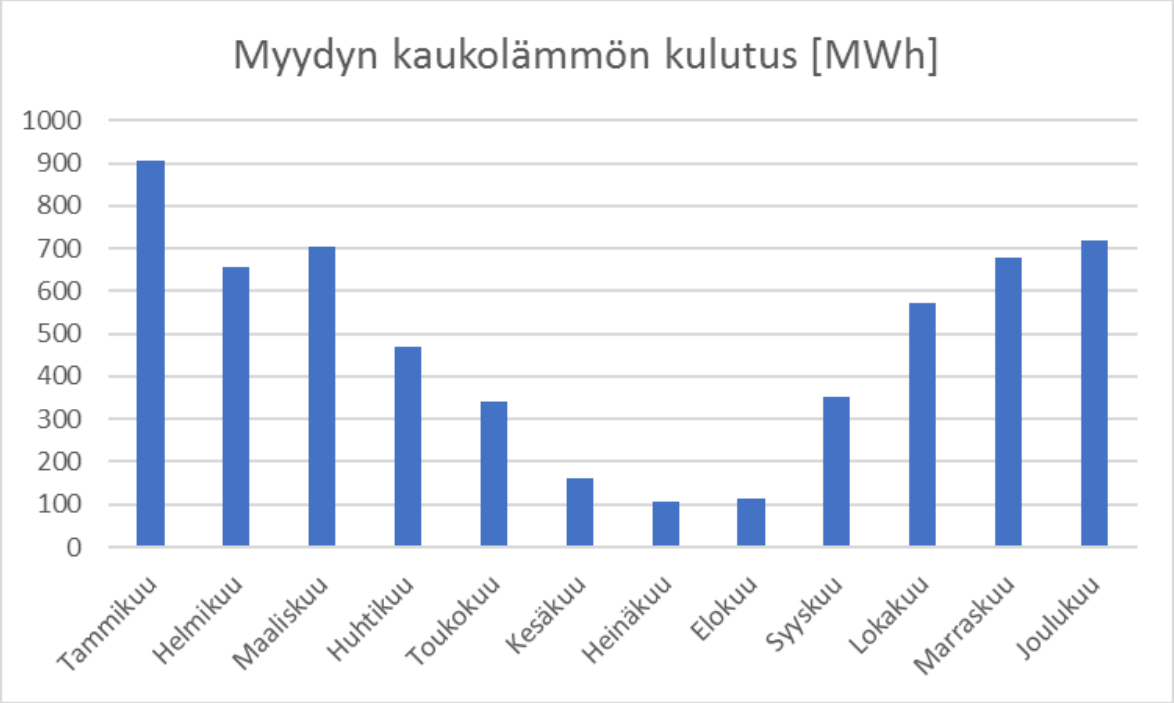
Kuva 9. Koskisen Oy:n Järvelän tuotantolaitoksen höyrykaavio. Voimalaitoksella (Koskipower) tuotetaan 45 baarin korkeapainehöyryä, joka ohjataan kolmessa eri paineisessa verkostossa (5, 14 ja 35 bar) yrityksen prosesseihin

Höyryverkostoissa kiertänyt höyry ohjataan useisiin lauhdesäiliöihin, joista se palaa keskitetysti yhden lauhdesäiliön kautta takaisin syöttövesisäiliölle. Syöttövesisäiliölle palaamisen jälkeen prosessissa jäähtynyt lauhde/vesi ohjataan uudestaan prosessiin.

4.1.3 Energiakustannukset ja tuotot

Vuonna 2019 Koskisen Oy:n lämpöenergian tuotanto maksoi yritykselle noin 1,9 M€ ja sähköenergian hankinta aiheutti 4,4 M€ kokonaiskustannukset. Kärkölän kunnan (Kärkölän Lämpö Oy:n) kaukolämpöverkkoon syötetyn lämpöenergian myyntihinta muodostuu

kiinteästä hinnasta ja energiamääräisestä hinnasta, jotka perustuvat yritysten väliseen sopimukseen. Vuonna 2019 kaukolämpöverkkoon syötetty energiamäärä oli noin 5,8 GWh ja tuotto noin 260 k€. Kuvassa 10 on esitetty vuonna 2019 myydyn kaukolämmön kulutuksen jakauma. (Koskisen Oy 2019.)



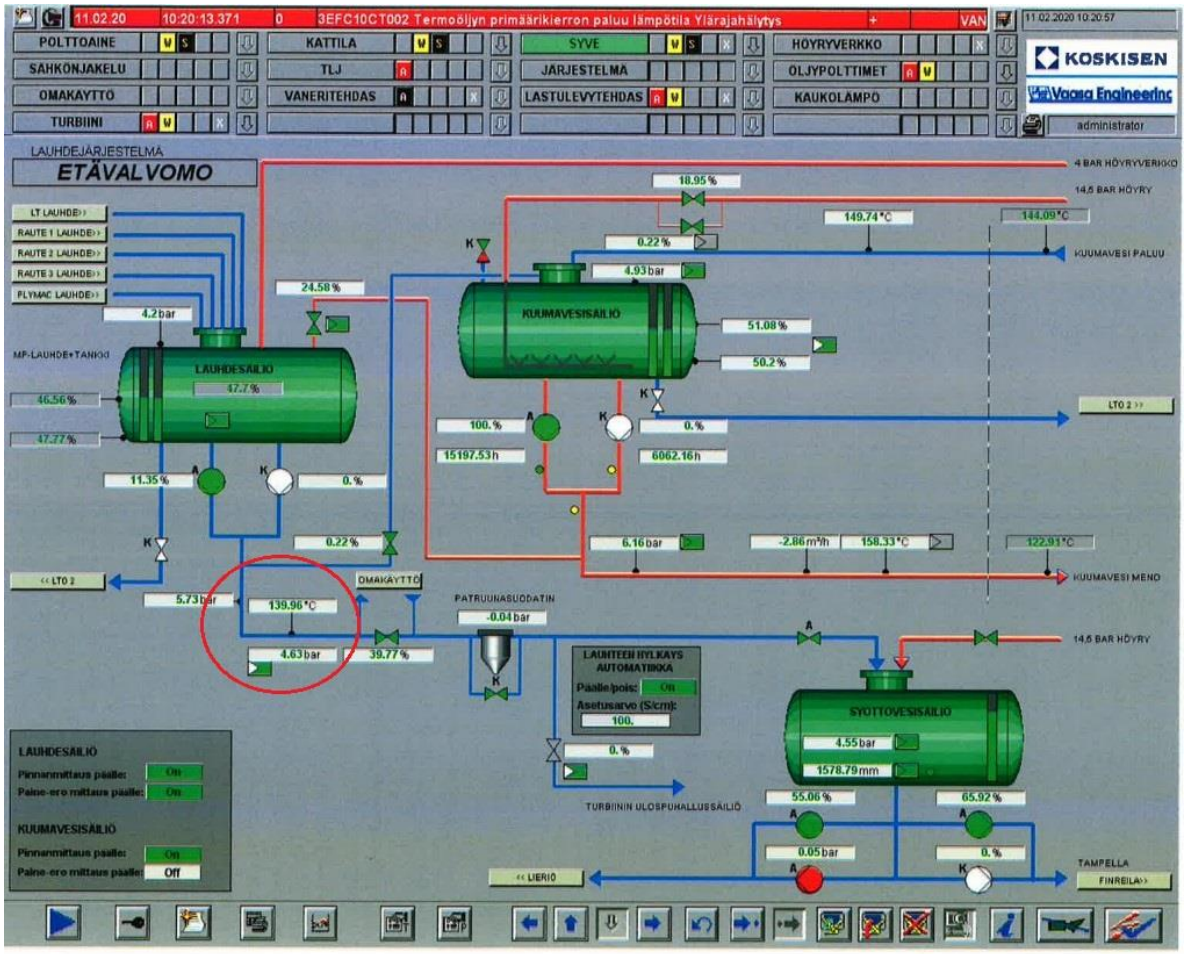
Kuva 10. Kärkölän kunnalle myydyn kaukolämmön kulutuksen jakauma vuonna 2019 (Koskisen Oy 2019)

Kysyntää kaukolämmölle on kesäaikana noin 100-350 MWh/kk. Muuna vuoden aikana kaukolämmön kysyntä vaihtelee 350 MWh/kk ja 900 MWh/kk välillä.

4.1.4 Hukkalämmön lähde

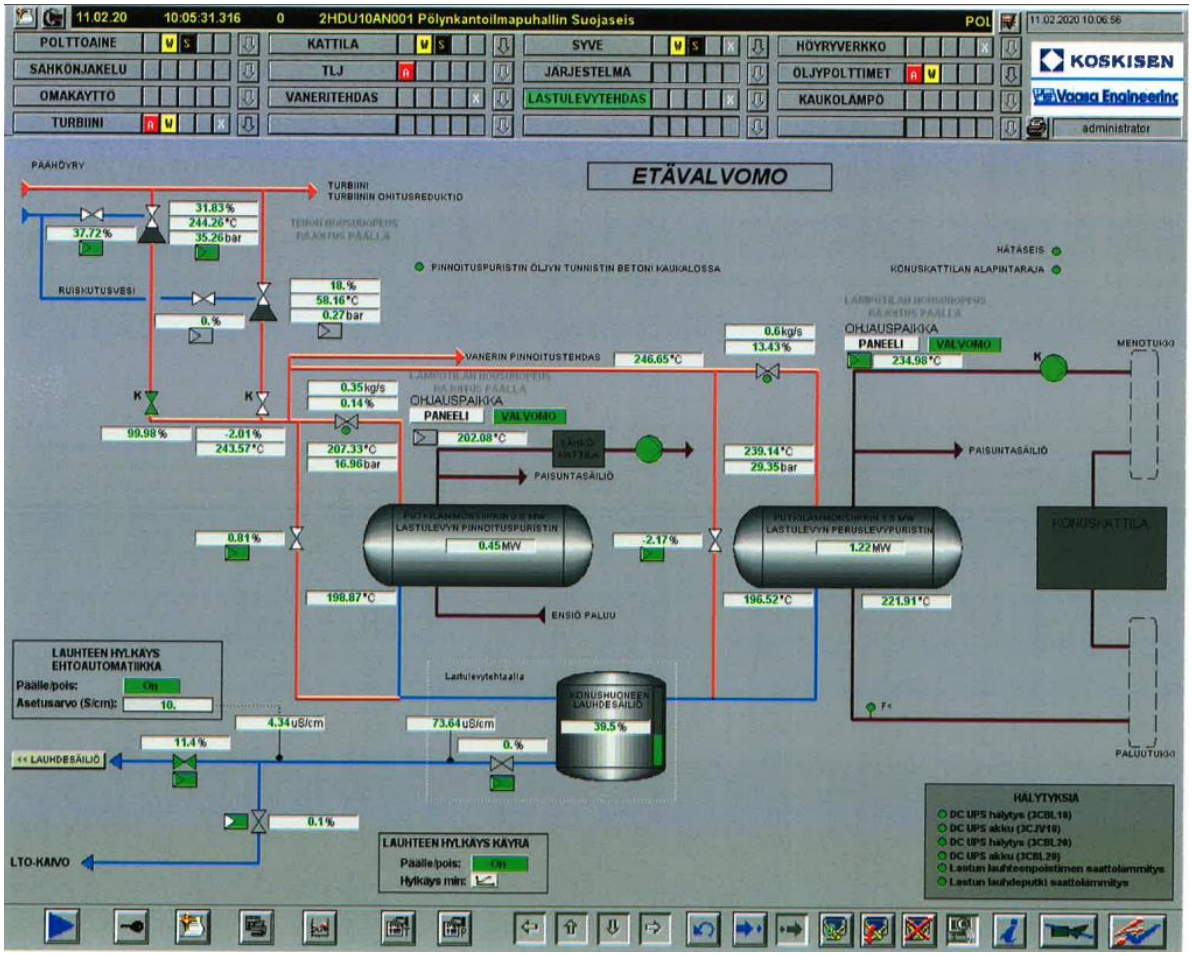
Hukkalämmön lähde on lastulevytehtaan lauhdesäiliön paluuputki (kuva 11), jossa on noin 198 ja 196 celsiusasteista lauhdelämpöenergiaa, joka on peräisin lastulevytehtaan pinnoitus- ja peruslevypuristimelta (kuva 12). Lauhdelämpöenergian trendikäyrät on esitetty kuvassa 13 ja ne perustuvat tammikuun 2020 tilanteeseen. Lauhdesäiliöön palaavan lauhteen lämpötila on noin 197 °C, joka vastaa pinnoitus- ja peruslevypuristimelta palaavien lauhteiden lämpötilojen keskiarvoa. Lauhdesäiliön virtaama esitetään luvussa 4.2.3 ja lämpöteho

luvussa 5.1. Lauhdesäiliö on kytketty 14 baarin prosessihöyryverkkoon, jota käytetään lastulevytehtaan prosessien energian lähteenä. (Koskisen Oy 2020c.)

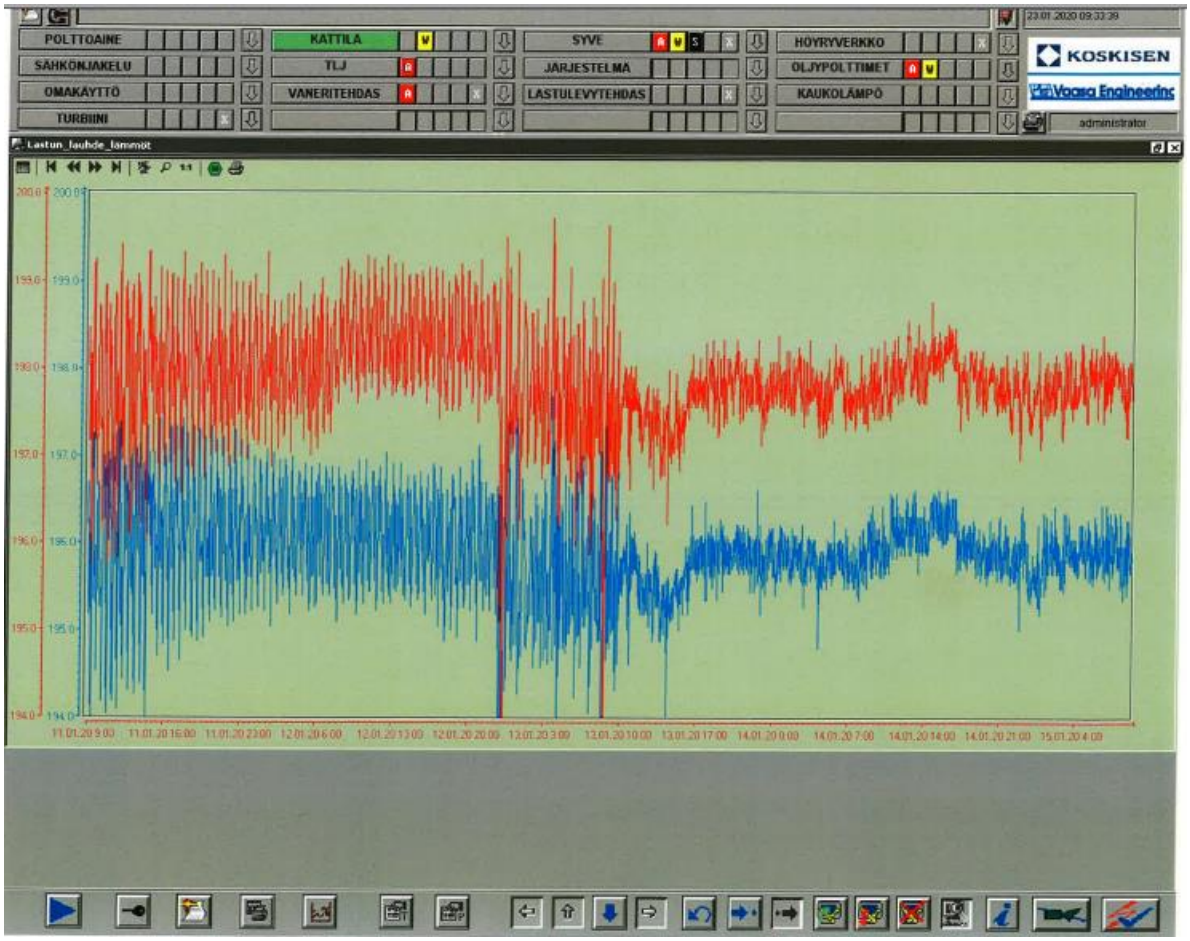


Kuva 11. Case-kohteen hukkalämmön lähde on lastulevytehtaan lauhdesäiliön paluuputki, joka on kuvassa vasemmalla olevan lauhdesäiliön alapuolella (lauhde kuvassa sinisellä) (Koskisen Oy 2020c)

Koskisen Oy:n mukaan lastulevytehtaan lauhdesäiliön lämpötila on suurimman osan ajan vuodesta liian suuri ja lauhteen lämpötila voidaan laskea 100-110 asteeseen, koska lauhteen halutaan jatkavan prosessissa yli 100 asteisena. Käytettävissä oleva lämpötilan lasku vaikuttaa olennaisesti hyödynnettävissä olevan hukkalämmön energiamäärään, koska energiamäärä on riippuvainen kaavan (8) lämpötilaerosta ΔT. Vuotuisella tasolla hukkalämpöä on saatavilla normaalien tuotantoprosessien käydessä. Kesäaikana liian kuuma lämpötila lauhdesäiliössä tuottaa ongelmia ja siitä tulisi päästä eroon. (Koskisen Oy 2020c.)



Kuva 12. Hukkalämmön lähteelle palaava lauhde on peräisin lastulevytehtaan pinnoitus- ja peruslevypuristimelta ja lauhde on lämpötilaltaan noin 197 °C (Koskisen Oy 2020c)

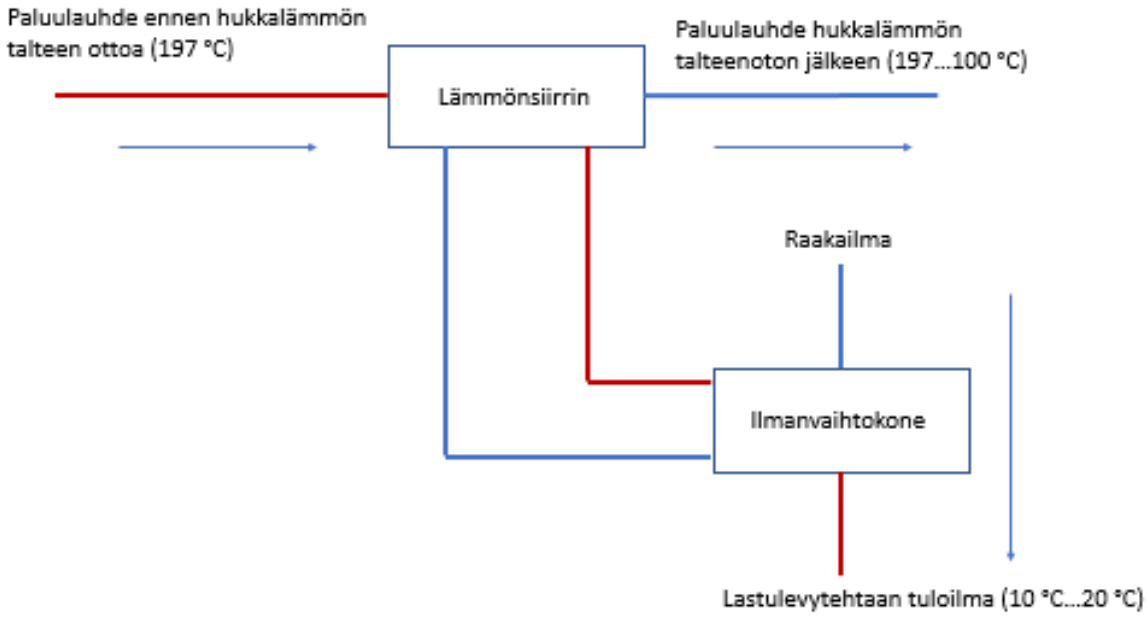


Kuva 13. Lauhdesäiliöön palaavien lauhteiden lämpötilakäyrät tammikuussa 2020. Lauhteet ovat keskilämpötilaltaan noin 198 °C (punainen) ja 196 °C (sininen) (Koskisen Oy 2020c)

4.1.5 Ensimmäinen hyödyntämiskohde: korvausilman lämmitys

Hukkalämpö voidaan hyödyntää ohjaamalla lämpöenergia lastulevytehtaan korvausilman (tuloilman) kanavaan ja lämmittää raakaa ulkoilmaa ennen kuin se tulee tuloilmana tehdashalliin (kuva 14). LVI-suunnittelutoimisto AirExet Oy laati Koskisen Oy:lle vuonna 2018 lastulevytehtaan ilmanvaihtojärjestelmän uusimisesta suunnitelman, jossa uuden ilmanvaihtokoneen ilmamäärä on 25 m^3/s ja lämmöntalteenotto-patterin ilmamäärä on 16,0 m^3/s. Lämmityspatterin lämmitysteho on 854 kW ja LTO-patterin teho on 478 kW. Uuden ilmanvaihtojärjestelmän tarkoituksena oli lämmittää tuloilma pakkasilla noin 10-20 celsiusasteeseen ettei tuloilma jäädytä liikaa tehdashallin ilmaa, mutta sitä ei toistaiseksi ole toteutettu. (AirExet Oy 2018.)

Hukkalämmön lähteen (lauhdesäiliön) ja hyödyntämiskohteen (ilmastointikanavan) välillä on Koskisen Oy:n mukaan noin 75 metrin etäisyys. Kuvassa 14 on esitetty ensimmäisen hukkalämmön hyödyntämiskohteen hyödyntämismenetelmä. Paluulauhteen (197 °C) hukkalämpö otetaan talteen lämmönsiirtimellä ja lämpöenergia ohjataan ilmanvaihtokoneelle ja raakailma lämmitetään haluttuun lämpötilaan (10...20 °C) ennen kuin se ohjataan tuloilmana tehdashalliin. paluulauhde jatkaa prosessissa eteenpäin 197-100 celsiusasteen lämpötilassa Koskisen Oy:n rajaaman paluulauhteen loppulämpötilan (100-110 °C) ja vuoden ajan mukaan vaihdellen. Korvausilman lämmittämisestä hukkalämmöllä aiheutuvia säästöjä voidaan arvioida voimalaitoksilla vähentyvänä polttoaineen tarpeena, koska tällä hetkellä tehdaskiinteistöä lämmitetään pelkästään prosessihöyryllä (kuva 9).



Kuva 14. Ensimmäisen hukkalämmönhyödyntämiskohteen hyödyntämismenetelmän periaatekuva, jossa lastulevytehtaalla syntyvä paluulauhde hyödynnetään lastulevytehtaan korvausilman lämmityksessä

Korvausilman lämmitykseen vaikuttavat lämmitysenergian tarpeen vuoden ajan mukainen dynaaminen vaihtelu, jonka takia hukkalämpöä ei voida käyttää täydellä teholla ympärivuoden korvausilman lämmitykseen. Ilmatieteenlaitoksen rakennusten energialaskennan lämmitystehon tarpeen laskennan säädatan (vyöhyke: I-II Vantaa 2012) avulla arvioituna

lastulevytehtaan halutun sisäilman lämpötilavälin (10-20 °C) keskiarvoon (T_{in}= 15 °C) vaaditaan vuodessa noin 0,8 GWh lämpöenergiaa (kuva 15). (Ilmatieteenlaitos 2020.)

Arvio **lämpöenergiasta** on laskettu tuntitehojen summan kautta kaavalla (9)

$$Q = c_p q_m \Delta t \sum_{1\,h}^{8760\,h} (T_{in} - T_{out,i}) \quad (9)$$

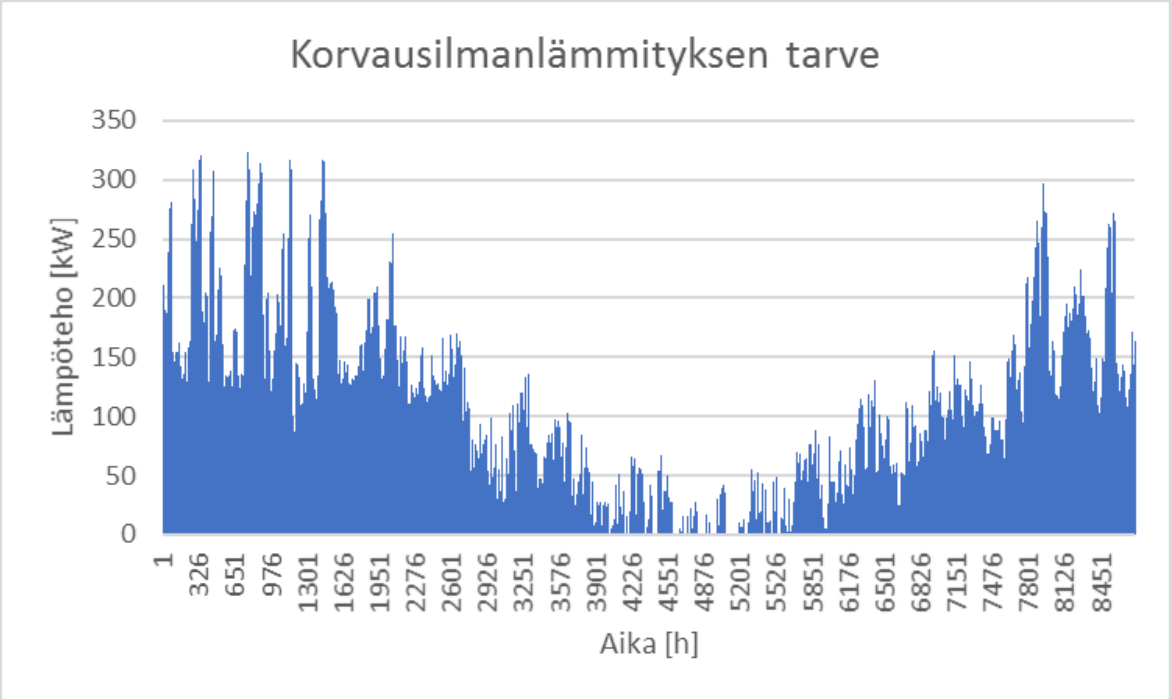
, jossa c on 1,01 kJ/kgK (ilman ominaislämpökapasiteetti)

q_m on 1,293 kg/m^3·25 m^3/h (ilman massavirta)

$T_{out,i}$ on säädatan tuntilämpötila [K]

Δt on 1 h (käyttötunti)

Ulkoilman lämpötilan lisäksi lastulevytehtaan sisäiset tekijät, kuten prosessit voivat vaikuttaa tehdashallin todelliseen lämmitysenergian tarpeeseen. Kuvassa 15 on esitetty korvausilman lämmityksen tarve kalenterivuoden (8760 h) aikana. Tarvittava lämpöteho vaihtelee välillä 0-320 kW. Luvussa 5.1.1 tarkastellaan tarkemmin lastulevytehtaan paluulauhteen käyttöä korvausilman lämmityksessä ja arvioidaan hyödyntämiskohteen kannattavuutta.

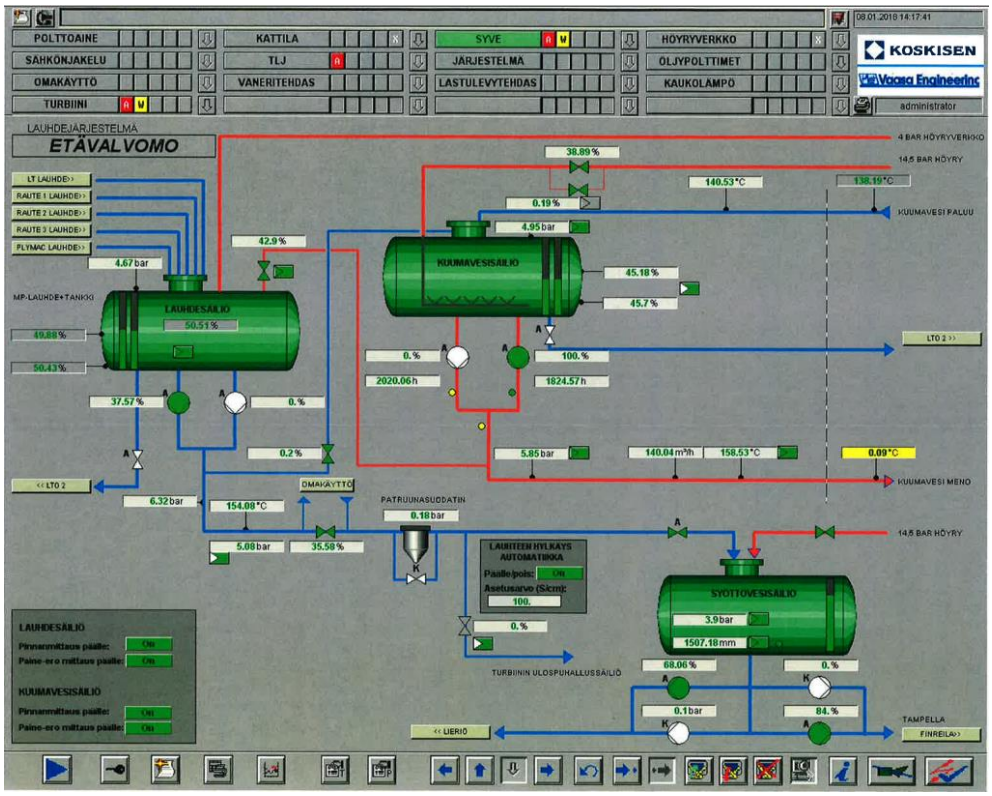


Kuva 15. Korvausilman lämmitykseen tarvittava lämpöteho vaihtelee kalenterivuoden (8760 h) aikana välillä 0-320 kW

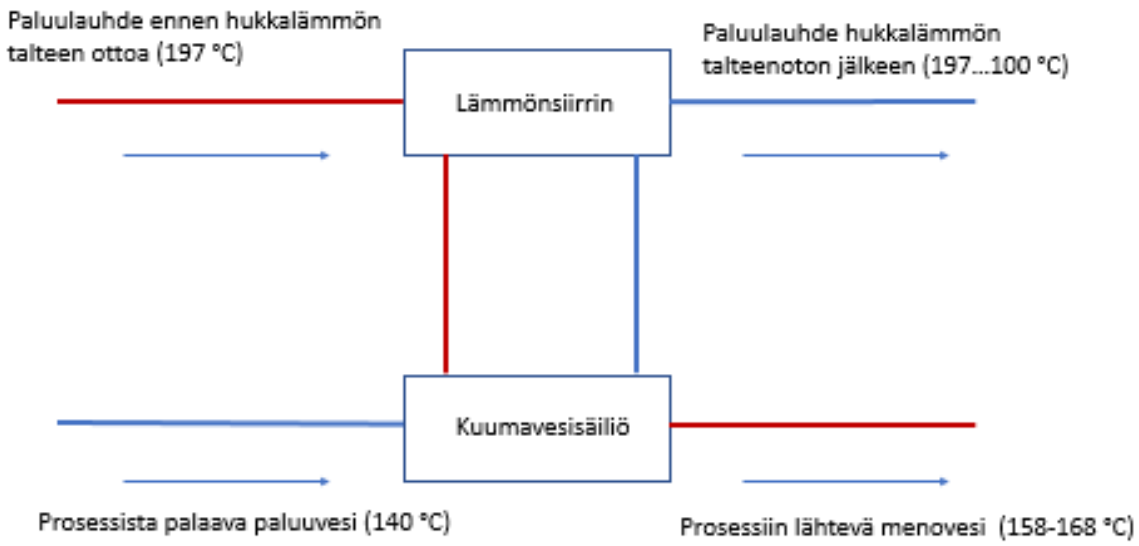
4.1.6 Toinen hyödyntämiskohde: kuumavesisäiliön esilämmitys

Hukkalämpö voidaan hyödyntää ohjaamalla lämpöenergia vaneritehtaan kuumapuristimien kuumavesisäiliöön (kuva 16) ja esilämmittää kuumavesisäiliötä paluupuolelta (kuva 17). Kuumavesisäiliön menopuolella menoveden lämpötila on noin 158-168 °C ja virtaama 140 m^3/h. Paluupuolella paluuveden lämpötila on noin 140 °C. Paine kuumavesisäiliössä on noin 5 baaria. Kuvassa 16 on esitetty kuumavesisäiliö ja sen ohessa oleva lauhdejärjestelmä. Prosessin kuva on valittu vuoden 2018 tammikuulta, koska kuvasta nähdään kuumavesisäiliön menoveden virtaama virtausmittarilla, joka oli tämän diplomityön aikana epäkunnossa.

Kuvassa 17 on esitetty toisen hyödyntämiskohteen hyödyntämismenetelmä, jossa 197 °C hukkalämpö otetaan talteen lämmönsiirtimellä ja ohjataan kuumavesisäiliön paluupuolelle. Lastulevytehtaan paluulauhde jatkaa lämmön talteen oton jälkeen prosessissa eteenpäin 197 ja 100 celsiusasteen välillä riippuen lämpötehosta, joka paluulauhteesta saadaan kuumavesisäiliön lämmitykseen ja rajatusta paluulauhteen loppulämpötilasta (100-110 °C). Prosessiin palaava 140 °C paluuvesi lämmitetään välille 158-168 °C. (Koskisen Oy 2018.)



Kuva 16. Toisena hukkalämmön hyödyntämiskohteena on vaneritehtaan kuumapuristimien kuumavesisäiliö, jonka lämpöteho on noin 2,9 – 4,5 MW

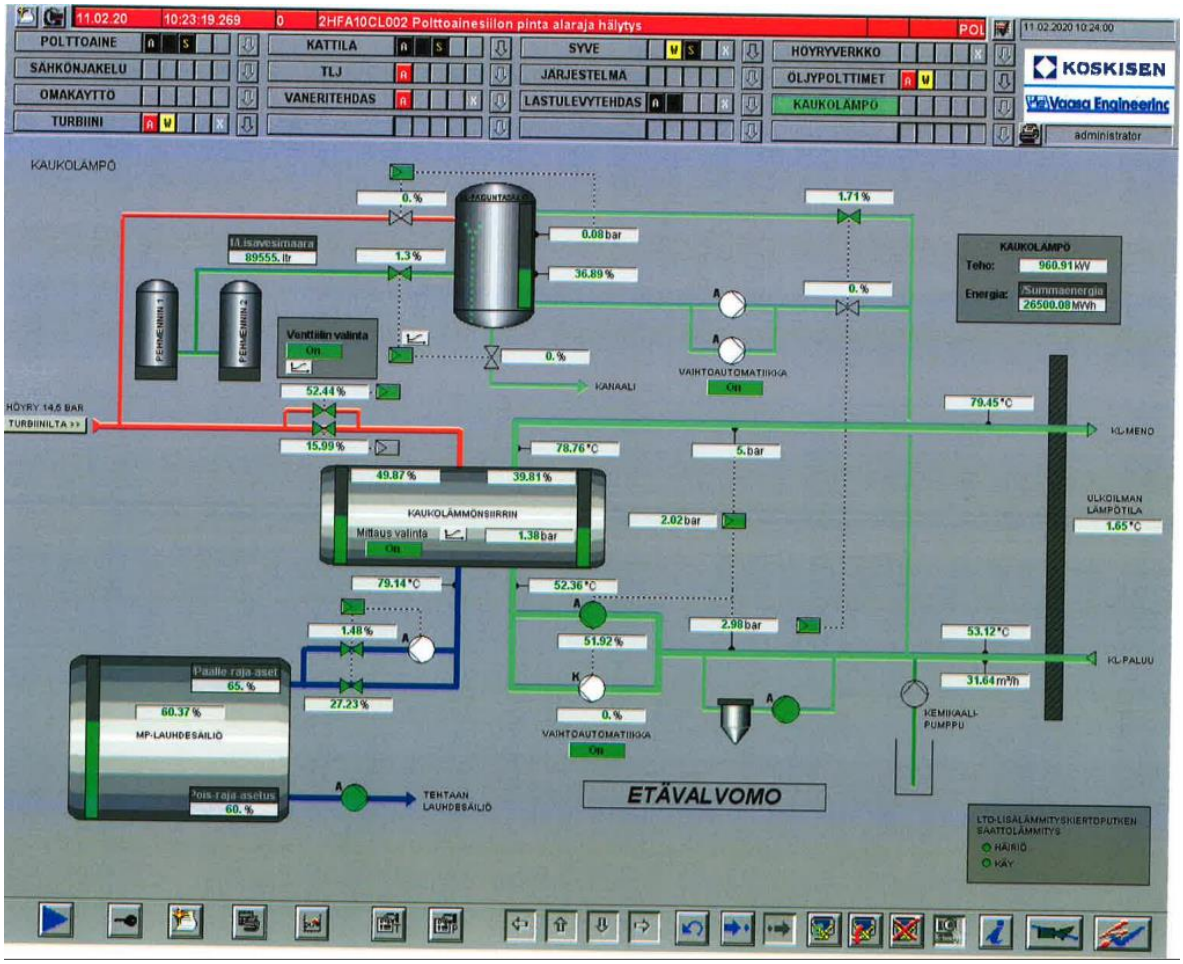


Kuva 17. Toisen hukkalämmönhyödyntämiskohteen hyödyntämismenetelmän periaatekuva. jossa lastulevytehtaalla syntyvä paluulauhde hyödynnetään vaneritehtaan kuumavesisäiliön esilämmityksessä

Kuumavesisäiliön keskimääräinen lämpöteho on noin 2,9–4,6 MW [(Pienemmällä lämpötilaerolla $\phi = c_p q_m \Delta T$ = 4,19 kJ/kgK·1000 kg/m^3·140 m^3/h/3600 s/h·18 K = 2,9 MW) tai (Suuremmalla lämpötilaerolla (ΔT = 28 k) ⇔ ϕ = 4,6 MW)]. Vuotuisella tasolla energian kulutus on noin 25,4 GWh (2,9 MW·8760 h), jos oletetaan, että lämpöteho on vähintään 2,9 MW ja prosessi pyörii kaikilla vuoden tunneilla. Koskisen Oy:n mukaan todellinen lämpöteho on lähempää pienempää 2,9 MW:n lämpötehoa. Kuumavesisäiliön esilämmittäminen hukkalämmöllä vähentää tarvittavan prosessihöyryn määrää, jonka seurauksena tuotantolaitoksen voimalaitoksilla poltettavan polttoaineen tarve vähentyy (kuva 7). Kuumavesisäiliön lämmitys kustantaa yritykselle noin 430 k€ vuodessa (kuumavesisäiliön energian kulutus 25,4 GWh·oman energiantuotannon hinta €/MWh). Hukkalämmön lähde (lastulevytehtaan lauhdesäiliö) ja hyödyntämiskohde (vaneritehtaan kuumavesisäiliö) sijaitsevat rinnakkain samassa 25·15 m kokoisessa tilassa. Luvussa 5.1.2 tarkastellaan tarkemmin lastulevytehtaan paluulauhteen käyttöä kuumavesisäiliön esilämmityksessä ja arvioidaan hyödyntämiskohteen kannattavuutta. (Koskisen Oy 2018.)

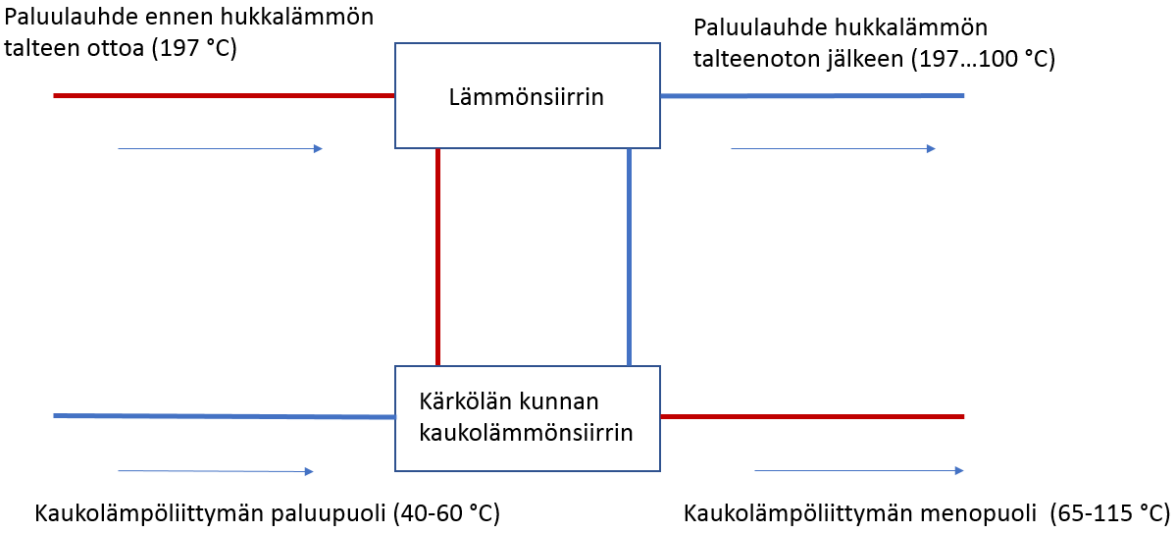
4.1.7 Kolmas hyödyntämiskohde: myynti kaukolämpöverkkoon

Hukkalämpö voidaan hyödyntää ohjaamalla lämpöenergia lastulevytehtaan lauhdesäiliöstä Kärkölän kunnan kaukolämmön lämmönsiirtimeen (kuva 18) ja lämmittää kaukolämpöliittymään paluupuolta (kuva 19). Helmikuussa 2020 ulkoilman lämpötilan ollessa vajaa 2 °C Koskisen Oy:n kaukolämpöliittymän paluupuolella kaukolämpöveden lämpötila on noin 53 °C ja menopuolella menoveden lämpötila on noin 79 °C. Kuvasta 18 nähdään, että kaukolämmön lämpöteho on noin 1 MW ja kuvassa 19 on esitetty kolmannen hyödyntämiskohteen hyödyntämismenetelmä, jossa 197 °C hukkalämpö otetaan talteen lämmönsiirtimellä ja ohjataan Kärkölän kunnan kaukolämmönsiirtimen paluupuolelle.



Kuva 18. Kolmantena hukkalämmön hyödyntämiskohteena on Kärkölän kunnan kaukolämmönsiirrin, jonka energiankulutus on noin 5,8 GWh vuodessa

Kaukolämmön paluupuolen lämpötila vaihtelee vuoden ajan mukaan noin 40-60 celsiusasteen välillä ja menopuoli 65-115 celsiusasteen välillä. Paluulauhde jatkaa prosessissa lämmön talteenoton jälkeen eteenpäin 197-100 celsiusasteen lämpötilassa riippuen, lauhteen sisältämästä energiamäärästä ja asetetusta loppulämpötilarajasta (100-110 °C).



Kuva 19. Kolmannen hukkalämmönhyödyntämiskohteen hyödyntämismenetelmän periaatekuva, jossa lastulevytehtaalla syntyvä paluulauhde hyödynnetään Kärkölän kunnan kaukolämpöliittymässä

Hukkalämmön kaukolämpöverkkoon myyntiin vaikuttaa kaukolämmön kulutuksen vuoden ajan mukainen dynaaminen vaihtelu ja paluulauhteesta saatava lämpöteho. Hukkalämmön lähde (lastulevytehtaan lauhdesäiliö) hukkalämmön hyödyntämiskohde (Kärkölän kunnan kaukolämmön siirrin) ovat rinnakkain samassa 25·15 m tilassa, missä vaneritehtaan kuumavesisäiliökin on. (Koskisen Oy 2020c.)

Nostamalla kaukolämmön paluuveden lämpötilatasoa prosessihöyryä tarvitaan vähemmän ja tämä säästää tuotantolaitoksen voimalaitoksilla käytettävän polttoaineen määrää (kuva 7). Kaukolämmön tuotanto kustantaa yritykselle noin 100 k€ vuodessa (kaukolämmön kulutus 5,8 GWh·oman energian tuotannon hinta €/MWh). Luvussa 5.1.3 tarkastellaan tarkemmin lastulevytehtaan paluulauhteen käyttöä kaukolämpöverkossa ja arvioidaan hyödyntämiskohteen kannattavuutta. (Koskisen Oy 2020c.)

4.1.8 Tulokset

Kirjallisuusselvityksellä saatiin selville Koskisen Oy:n Järvelän tuotantolaitoksen energiatase, tietoa hukkalämmön lähteestä, tietoa yrityksen energiakustannuksista ja energiatuotoista sekä kuvattua työhön valitut hukkalämmön hyödyntämiskohteet: lastulevytehtaan korvausilman lämmitys, kuumapuristimien kuumavesisäiliön esilämmitys ja myynti kunnan kaukolämpöverkkoon. Lisäksi jokaiselle hukkalämmön hyödyntämiskohteelle saatiin muodostettua hyödyntämismenetelmän periaatekuva.

Kuumavesisäiliön lämmittäminen kustantaa Koskisen Oy:lle kaikista eniten rahaa oman energian tuotannon hinnan mukaan arvioituna. Kirjallisuusselvityksen keskeisimmät tulokset on koottu taulukkoon 4. Luvussa 5.2 esitetään tutkimuksessa saatujen tulosten perusteella case-kohteeseen parhaiten soveltuva hyödyntämisratkaisu.

Taulukko 4. Case-tutkimuksen kirjallisuusselvityksen keskeisimmät tulokset.

Energiatase	Koskisen Oy:n prosessiin tulee sisään noin 116 GWh energiaa, joka on peräisin biopolttoainetta käyttäviltä voimalaitoksilta. Energiasta 111 GWh käytetään omissa prosesseissa ja lämmityksessä. Loput 5 GWh päätyy ulkopuolelle myytäväksi kaukolämmöksi.
Hukkalämmön lähde	Hukkalämmön lähde on noin 197 °C lämmin paluulauhde, jota syntyy lastulevytehtaan pinnoitus- ja peruslevypuristimella.
Energiakustannukset ja tuotot	Vuonna 2019 lämpöenergian tuotanto maksoi yritykselle noin 1,9 M€ ja sähköenergian hankinta aiheutti 4,4 M€:n kokonaiskustannukset. Tuotot samana vuonna kaukolämpöverkkoon syötetystä lämpöenergiasta olivat noin 260 k€.
Hukkalämmön hyödyntämiskohteet	Kuvaukset hukkalämmön hyödyntämiskohteista saatiin selvitettyä ja hyödyntämismenetelmistä saatiin muodostettua periaatekuvat.
1. lastulevytehtaan korvausilman lämmitys	Lastulevytehtaan ilmastointijärjestelmän uusimisesta on laadittu vuonna 2018 suunnitelma, jonka tarkoituksena oli lämmittää raakailma pakkasilla 10-20 °C:een. Hukkalämpö voidaan ohjata korvausilman kanavaan ja lämmittää sisään tulevaa raakailmaa ennen kuin se ohjataan tehdashalliin, jonka seurauksena syntyviä säästöjä voidaan arvioida vähentyneenä prosessihöyryn tarpeena.
2. vaneritehtaan kuumavesisäiliön esilämmitys	Kuumavesisäiliön vuotuinen energiankulutus on 25,4 GWh ja lämmityskustannukset ovat oman energian tuotannon hinnan mukaan arviolta 430 k€/a. Kuumavesisäiliöstä lähtee 158-168 °C vettä ja sinne palaa 140 °C vettä. Hukkalämpö voidaan ohjata kuumavesisäiliölle ja käyttää kuumavesisäiliön esilämmityksessä, jonka seurauksena syntyviä säästöjä voidaan arvioida vähentyneenä prosessihöyryn tarpeena.
3. myynti Kärkölän kunnan kaukolämpöverkkoon	Kaukolämpöverkossa on noin 5,8 GWh:n vuotuinen kaukolämmön kulutus, joka vaihtelee välillä 100-900 MWh/kk. Kaukolämmön tuotantokustannukset ovat noin 100 k€/a oman energian tuotannon hinnan mukaan arvioituna. Hukkalämpö voidaan ohjata kaukolämmönsiirtimeen ja käyttää kaukolämpöverkon paluupuolen lämmityksessä, jonka seurauksena syntyviä säästöjä voidaan arvioida vähentyneenä prosessihöyryn tarpeena.

4.2 Kokeellinen tutkimus

4.2.1 Paluulauhteen koejärjestelyt

Lastulevytehtaan lauhdesäiliön paluuputkeen asetettiin kulkuaikavirtausmittari (NIVUS CO100P), jolla mitattiin lauhdesäiliöstä palaavan lauhteen virtaamaa (kuva 20). Virtausmittarin osat ovat ultraäänianturipari, anturikaapelit, mittalaitteen keskusyksikkö, laturi ja anturin kiinnityspannat. Laite mittaa anturien välillä myötävirtaan ja vastavirtaan kulkevan ultraäänipulssin aikaeroa ja antaa mittaustuloksen yksikössä m^3/h.

Virtausmittari asennettiin valmistajan käyttöohjeiden mukaisesti. Ensin valittiin mittauspaikka ja lauhdeputki puhdistettiin (puhdistuslaikalla) anturien sekä asennuskohdat merkittiin putkeen. Mittauspaikasta tarvittavat tiedot otettiin ylös ja ne on koottu taulukkoon 5.

Taulukko 5. Mittauspaikan tiedot laitteen valmistajan mukaisesti koottuna. Putkessa ei ole sisäpinnoitetta.

Putken ulkoympärysmitta	240 mm
Putken ulkohalkaisija	76,4 mm
Seinämän paksuus	3,6 mm
Putken sisähalkaisija	69,2 mm
Materiaali	Hiiliteräs
Fluidin tyyppi	Vesi

Nesteen ja putken tiedot sekä mittayksiköt syötettiin laitteen keskusyksikköön. Lopuksi säädettiin tiedonkerääjän asetukset. Tallennusväliksi asetettiin yksi tunti ja tallennettavien rivien määrä valittiin vastaamaan tallennuskortin kokoa. Arvojen syöttämisen jälkeen anturit, joiden väliin oli laitettu geeliä, kiinnitettiin putkeen pannoilla ja niiden välinen etäisyys asetettiin vastaamaan laitteen MENU 25 antamaa mittaa (29,1 mm). Asennus oli valmis virtausmittauksia varten.

Kuva 20. Lastulevytehtaan lauhdesäiliön paluuputkeen kiinnitetty ultraääni kulkuaika virtausmittari (NIVOS CO100P). Laitteen anturit ovat ”V” asennuksessa noin 29 mm etäisyydellä toisistaan.

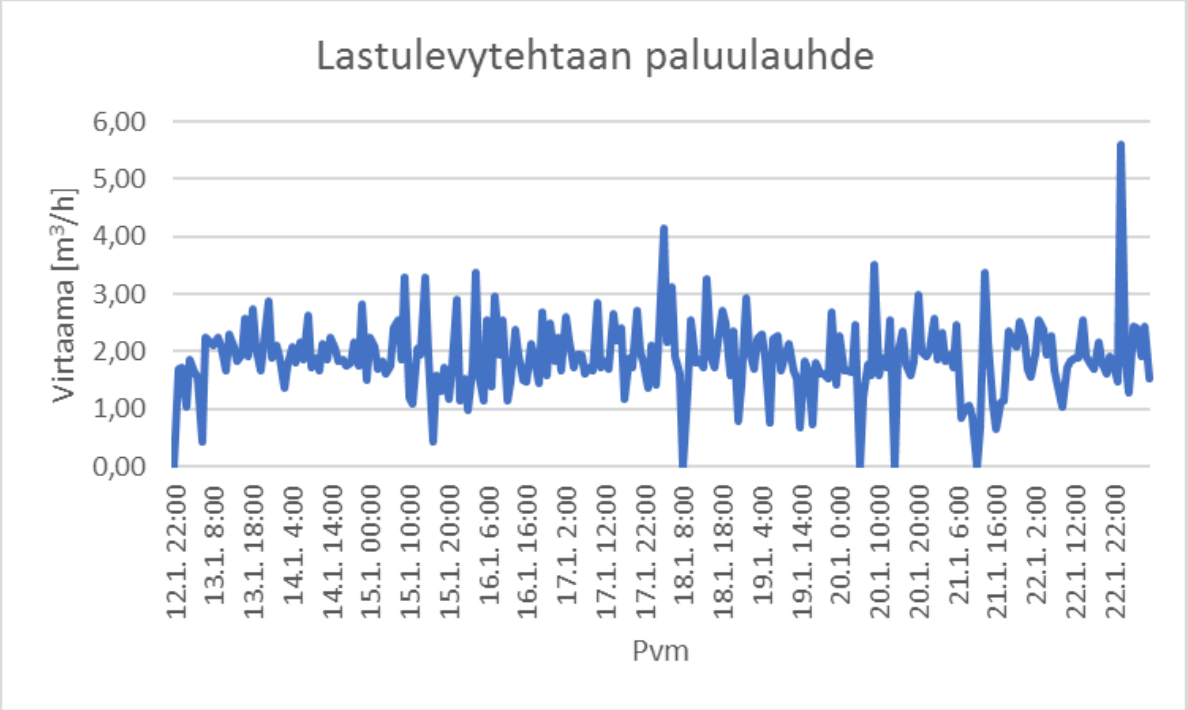
4.2.2 Paluulauhteen virtausmittaukset

Virtausmittarilla mitattiin lastulevytehtaan lauhdesäiliöltä palaavan lauhteen virtaamaa 12.1. ja 23.1.2020 välisenä aikana. Laitteen asetukset pidettiin samana kuin koejärjestelyissä. Virtausmittarin mittasi lauhdeputken viimeisen tunnin aikaisen keskivirtaaman tunnin välein ja tallensi mittauslukemat laitteen tallennuskortille. Mittaukset tehtiin yhtäjaksoisesti.

4.2.3 Tulokset

Keskivirtaaman keskiarvo 11 päivää kestäneissä virtausmittauksissa oli 1,89 m^3/h (kuva 21). Keskivirtaaman vaihteluväli oli 0-5,6 m^3/h. Puolessa välissä mittauksia keskivirtaama kävi hetkellisesti yli 4 m^3/h:ssa, mutta piikkejä lukuun ottamatta suurin osa mittauksista asettui väliin 1-2 m^3/h:ssa.

Tulosten perusteella voidaan laskea lastulevytehtaan lauhdesäiliön paluuputken lämpöteho (eri lämpötilaerojen mukaan), joka saadaan kaavalla 8: $\phi = c_p q_m \Delta T \Leftrightarrow \phi$ = 4,19 kJ/kgK·1,89 m^3/h/3600 s/h·1000 kg/m^3·97 K = 213,4 kW. Lämpöteho on noin 213 kW, mikäli lauhteen lämpötila lasketaan esimerkiksi 197 asteesta 100 asteeseen (ΔT = 97K).



Kuva 21. Case-tutkimuksen kokeellisen tutkimuksen: lastulevytehtaan paluulauhteen virtausmittausten tulokset 12.1.–23.1.2020. Virtaama vaihteli välillä 0-5,6 m^3/h.

4.3 Asiantuntijahaastattelut

4.3.1 Calefa Oy

Haastattelukysymykset hukkalämpöratkaisuihin erikoistuneelle yritykselle Calefa Oy:lle olivat:

1. Mikä hukkalämmön hyödyntämiskohteista soveltuu parhaiten hukkalämmön hyödyntämiseen kohteessa ja miksi?

2. Kuinka paljon parhaiten soveltuvimman hukkalämmön hyödyntämiskohteen tekninen toteutus ja energiankeräysjärjestelmän vaatima investointi kustantaa Koskisen Oy:lle?

3. Hukkalämmön lähteen virtaama voi vaihdella hetkellisesti hyvinkin voimakkaasti välillä 0-5,6 m^3/h, miten se otetaan huomioon energiankeräysjärjestelmän teknisessä toteutuksessa?

Kysymykset lähetettiin Calefa Oy:lle sähköpostitse 14.3.2020 ja heille esitettiin riittävien lähtötietojen takaamiseksi: diplomityön kirjallisuusselvitys, kokeellinen tutkimus sekä niihin liittyvä pohdinta ja siihen mennessä saadut tutkimustulokset.

4.3.2 Tulokset

(1) Calefa Oy:n mukaan hukkalämmön hyödyntäminen kaukolämpöverkkoon myynnissä soveltuu parhaiten case-kohteeseen, koska lastulevytehtaan paluulauhteesta saatava energiamäärä ja sen kautta muodostuvat säästöt ovat sillä tasolla, ettei hukkalämpöä ole kannattavaa jakaa kolmen hyödyntämiskohteen kesken. Hukkalämpö voidaan syöttää kaukolämpöverkkoon täydellä teholla lähes aina, mikä mahdollistaa muihin hyödyntämiskohteisiin verrattuna suurimman vuotuisen energianmäärän hyödyntämisen. Lisäksi hukkalämmön lähteen sijaitseminen samassa tilassa kaukolämpölaitteiden kanssa pienentää investointikustannusta.

(2) Kaukolämpöverkkoon myynnin tekninen toteutus ja energiankeräysjärjestelmän vaatima investointi kustantaa Calefa Oy:n budjettiarvion mukaan Koskisen Oy:lle noin 60-70 k€. Budjettihinnan pääpiirteittäinen sisältö on koottu taulukkoon 6.

(3) Hukkalämmön lähteeseen tuleva lämmönsiirrin on mitoitettavan niin, että painehäviö pysyy sallituissa rajoissa myös lauhteen maksimivirtaamalla. (Lahikainen 2020.)

Taulukko 6. Asiantuntijahaastattelun toisen haastattelukysymyksen tulos. Calefa Oy:n budjettiarvio kohteeseen parhaiten soveltuvasta ratkaisusta (kaukolämpöverkkoon myynnistä) oli noin 60-70 k€.

Calefa Oy:n budjettiarvio	**Ratkaisu: kaukolämpöverkkoon myynti**
Hinta	60-70 k€
Sisältö	
Lämmönsiirrin lämmönlähteelle	
Säätö/ohitusventtiilit lauhdelinja · 2 + säätöventtiili kaukolämpö · 1	
Asennustyöt järjestelmälle	
Anturit, venttiilit ja toimilaitteet	
Säätölaitteiden kaapelointi alakeskukselle (alakeskus ja ohjelmointi tilaajalla)	
Projektointi	
Suunnittelu: järjestelmäsuunnittelu ja automaatiojärjestelmän toiminnan suunnittelu	
Käyttöönotto	
Dokumentointi	

5 POHDINTA

5.1 Lastulevytehtaan paluulauhteen energiasisältö

Lastulevytehtaan paluulauhteesta saatavan lämpöenergian määrä vaihtelee lauhteen alku- ja loppulämpötilaerojen mukaan. Kaavalla (8) ($\phi = c_p q_m \Delta T$) voidaan määrittää lämpötehot eri lämpötilatasoille (taulukko 7). Kaavan (8) massavirta (q_m= tiheys ρ·tilavuusvirta q_v) saadaan selville kokeellisesta tutkimuksessa selvinneen virtaaman 1,89 m^3/h avulla (q_v= 1,89 m3/h/3600 s/h= 0,5 dm^3/s) ja lämpötilaero ΔT saadaan lauhteen alku- ja loppulämpötilojen T_1 ja T_2 erotuksena. Ominaislämpökapasiteetti c_p ja tiheys ρ ovat vakioita.

Taulukko 7. Case-kohteen hukkalämmön lämpötehot eri lämpötilatasoissa, jotka ovat lähellä Koskisen Oy:n määrittämää paluulauhteen loppulämpötilan rajaa 100-110 °C, joka esitettiin luvussa 4.1.4. Taulukkoon on koottu laskennassa käytetyt suureet.

Lastulevytehtaan paluulauhde						
Alkulämpötila T_1 [°C]	197	197	197	197	197	197
Loppulämpötila T_2 [°C]	140	130	120	**110**	**100**	90
Massavirta q_m [kg/s]	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Ominaislämpökapasiteetti c_p [kJ/kgK]	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2
Tiheys ρ [kg/m^3]	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Lämpöteho ϕ [kW]	125,4	147,4	169,4	**191,4**	**213,4**	235,4

Taulukosta 7 nähdään, että paluulauhteen lämpöteho vaihtelee 22 kW (lämpöteho ϕ 100 asteen loppulämpötilassa T_2 213,4 kW – lämpöteho 110 asteen loppulämpötilassa T_2 191,4 kW), kun oletetaan, että prosessi on ollut päällä yhden tunnin ajan. Alku- ja loppulämpötilan välisen lämpötilaeron kasvulla on vuositasolla (8760 h) merkittävä vaikutus, koska 57 asteen lämpötilaerolla (ΔT= 57 °C) saadaan vuodessa noin 1,1 GWh (125,4 kW·8760 h) lämpöenergiaa ja 107 asteen lämpötilaerolla (ΔT= 107 °C) saadaan vuodessa noin 2,1 GWh (235,4 kW·8760 h) lämpöenergiaa. Koskisen Oy:n määrittämässä loppulämpötilarajassa 100-110 °C hukkalämmöstä voidaan vuotuisella tasolla saada käyttöön noin 1,7–1,9 GWh lämpöenergiaa. Paluulauhteen energiasisältöä tarkastellessa oletetaan, että prosessi on koko ajan päällä ja hukkalämpöä on saatavilla ympärivuoden.

5.1.1 Käyttö korvausilman lämmityksessä

Kirjallisuuskatsauksessa selvisi, että korvausilman lämmityksessä on 0,8 GWh potentiaali hukkalämmön käytölle, jossa on huomioitu lämmitysenergian tarpeen dynaaminen vaihtelu vuoden ajan mukaan. Paluulauhteen sisältämästä hukkalämmöstä jää yli noin 0,9–1,1 GWh lämpöenergiaa vuodessa, jos sen sisältämä lämpöenergia (1,7–1,9 GWh/a) käytettäisiin korvausilman lämmityksessä.

Korvausilman lämmityksen vaatimaan energiaan riittäisi, että lauhteesta otettaisiin noin 90 kW:n keskimääräinen lämpöteho ($\phi = c_p q_m \Delta T$ = 4,19 kJ/kgK·1000 kg/m^3·1,89 m^3/h/3600 s/h·41 K = 90,2 kW), mikä vastaa noin 41 asteen lämpötilaeroa eli lauhteen lämpötilan laskua 197 asteesta 156 asteeseen. Keskimääräistä lauhteen lämpötilaa jäisi vielä laskettavaksi 56 astetta, jotta hukkalämpöpotentiaali käytettäisiin kokonaan Koskisen Oy:n määrittämässä loppulämpötilarajassa 100-110 astetta. Hukkalämmön käyttö korvausilman lämmityksessä voisi tuoda Koskisen Oy:lle vuodessa noin 14 k€ (potentiaali 0,8 GWh·oman energian tuotannon hinta €/MWh) säästöjä oman energian tuotannon hinnan mukaan arvioituna, kun oletetaan, että prosessi toimii ympärivuoden ja lauhteen loppulämpötila voidaan laskea 100 asteeseen (käytettävissä oleva hukkalämmön lämpöteho = 213 kW).

5.1.2 Käyttö kuumavesisäiliön esilämmityksessä

Kuumavesisäiliön esilämmityksessä on 25,4 GWh potentiaali hukkalämmön käytölle. Paluulauhteesta saatavaa lämpöenergiaa (1,7–1,9 GWh/a) ei voida käyttää kokonaan

kuumavesisäiliön lämmitykseen, koska lauhteen loppulämpötilan tulee jäädä kuumavesisäiliön paluuveden lämpötilan (140 astetta) yläpuolelle. Loppulämpötila voitaisiin laskea esimerkiksi 145 asteeseen (ΔT = 52 K), mikä vastaa noin 114 kW:n keskimääräistä lämpötehoa ($\phi = c_p q_m \Delta T$= 4,19 kJ/kgK·1000 kg/m^3·1,89 m^3/h/3600 s/h·52 K = 114 kW).

Lauhteen vaikutus kuumavesisäiliöstä lähtevän veden lämpötilaan voidaan laskea lauhteen ja kuumavesisäiliön lämpötehojen 114 kW ja 2,9 MW avulla. Lämpötehoa kuumavesisäiliön lämmitykseen tarvittaisiin prosessihöyrystä lämpötehoeron (kuumavesisäiliön lämpöteho 2900 kW – hukkalämmön lämpöteho 114 kW) verran, mikä vastaa noin 17 asteen lämpötilan nostoa [$\Delta T = \phi / q_m$ = (2786 kW) / (4,19 kJ/kgK·1000 kg/m^3·140 m^3/h/3600 s/h) = 17,1 K]. Paluulauhteella voitaisiin lämmittää kuumavesisäiliön paluuvettä vähentyneen prosessihöyryn tarpeen verran (18 K–17 K), noin yhdellä asteella 140 asteisesta 141 asteiseksi, koska prosessihöyry lämmittää veden 141 asteesta 158 asteeseen.

Hukkalämpöä voitaisiin käyttää vuodessa kuumavesisäiliön esilämmitykseen noin 1 GWh (114 kW·8760 h). Koskisen Oy:n määrittämässä paluulauhteen loppulämpötilarajassa 100-110 asteessa paluulauhteesta jäisi yli 0,7–0,9 GWh lämpöenergiaa ja loppulämpötilaa voisi laskea vielä 45 astetta 145 asteesta 100 asteeseen. Hukkalämmön käyttö kuumavesisäiliön esilämmityksessä voisi tuoda yritykselle noin 17 k€:n (potentiaali 1 GWh·oman energian tuotannon hinta €/MWh) vuotuiset säästöt oman energian tuotannon hinnan mukaan arvioituna, kun oletetaan, että prosessi toimii ympärivuoden ja lauhteen loppulämpötila voidaan laskea 100 asteeseen (käytettävissä oleva hukkalämmön lämpöteho = 213 kW).

5.1.3 Käyttö kaukolämpöverkkoon myynnissä

Kaukolämpöverkkoon myynnissä on noin 5,8 GWh potentiaali hukkalämmön käytölle, mutta kaukolämmön kulutuksen dynaaminen vaihtelu laskee kunnan kaukolämpöverkossa hyödynnettävissä olevan hukkalämmön määrää. Vuoden 2019 kaukolämmön kulutustietojen (kuva 10) mukaan heinä- ja elokuussa kaukolämmön kulutukset ovat noin 106 MWh ja 113 MWh. Kesäkuun 163 MWh:n kulutus riittää vielä kattamaan hukkalämmön kuukausittaisen energiasisällön 138-153 MWh (30 d·24 h/d·191 kW = 138 MWh ja 30 d·24 h/d·213 kW = 153 MWh) määritetyssä 100-110 asteen lauhteen loppulämpötilarajassa. Heinäkuussa hukkalämpöä syntyy maksimissaan 158 MWh (31 d·24 h/d·213 kW) ja hukkalämpöä voi jäädä käyttämättä noin 52 MWh (158–106 MWh), koska kaukolämmön kulutusta on vain

106 MWh. Elokuussa hukkalämpöä syntyy maksimissaan 158 MWh ja hukkalämpöä voi jäädä käyttämättä noin 45 MWh (158–113 MWh), koska kaukolämmön kulutusta on vain 113 MWh. Muuna vuoden aikana kaukolämmön kuukausittainen kulutus ylittää hukkalämmön energiamäärän. Vuotuisesta hukkalämmön energiamäärästä 1,7–1,9 GWh/a voidaan vähentää kesäajan häviöt 52+45 = 97 MWh, jolloin kaukolämpöverkkoon syötettävissä olevalle energialle jää jäljelle noin 1,6–1,8 GWh potentiaali (1,9–0,1 GWh ja 1,7–0,1 GWh).

Kaukolämmön kulutuksen lyhyen aikavälin (tuntitason) vaihtelut voivat vaikuttaa lisäksi todelliseen hyödynnettävissä olevaan potentiaaliin. Kaukolämmönsiirtimen paluupuolelle saadaan syötettyä 213 kW:n lämpöteho, jolla voitaisiin nostaa paluupuolen kaukolämpöveden lämpötilaa esimerkiksi helmikuun 2020 (kuva 14) tilanteessa noin kuudella asteella 52 asteisesta 58 asteiseksi [$\Delta T = \phi/c_p q_m$ = 213 kW/ (4,19 kJ/kgK·1000 kg/m^3·32 m^3/h/3600 s/h) = 5,7 K]. Prosessihöyryn korvaaminen hukkalämmöllä kaukolämpöliittymässä voisi tuoda yritykselle noin 29 k€:n vuotuiset säästöt (potentiaali 1,7 GWh·oman energian tuotannon hinta €/MWh) oman energian tuotannon hinnan mukaan arvioituna, kun oletetaan, että prosessi toimii ympärivuoden ja lauhteen loppulämpötila voidaan laskea sataan asteeseen (käytettävissä oleva hukkalämmön lämpöteho = 213 kW).

5.2 Kannattavin hyödyntämisratkaisu

Lastulevytehtaan paluulauhteen hukkalämpöä voidaan hyödyntää energiamääräisesti kaikista eniten kaukolämpöverkkoon myynnissä, koska kaukolämpöverkossa vallitseva hukkalämpöpotentiaali on hyödyntämiskohteista kaikista suurin (1,6-1,8 GWh/a). Calefa Oy:lle tehtyjen asiantuntijahaastatteluiden tuloksena saatiin tulos, jonka mukaan kaukolämpöverkkoon myynti soveltuu kaikista parhaiten hukkalämmön hyödyntämiseen case-kohteessa, eikä hukkalämpöä kannata myöskään jakaa eri hyödyntämiskohteiden kesken (Lahikainen 2020). Siksi voidaan todeta, että lastulevytehtaan paluulauhteen sisältämä hukkalämpö kannattaa myydä kaukolämpöverkkoon ja investointikustannusten tarkastelu on rajattu tässä diplomityössä pelkästään kaukolämpöverkkoon myynnin tarkasteluun.

Lisäksi lastulevytehtaan korvausilman kanava sijaitsee erillisen matkan päässä (75 m) lastulevytehtaan lauhdesäiliöstä, joka aiheuttaa lisäkustannuksia investoinnissa. Vaneritehtaan kuumavesisäiliön ja Kärkölän kunnan kaukolämmön kaukolämmönsiirtimen sijaitseminen

samassa tilassa lastulevytehtaan lauhdesäiliön kanssa puoltaa suuremman säästöpotentiaalin omaavaa hyödyntämiskohdetta, koska investointikustannusten voidaan olettaa olevan kuumavesisäiliön esilämmityksessä ja kaukolämpöverkkoon myynnissä samaa suuruusluokkaa.

Lastulevytehtaan paluulauhteen sisältämä hukkalämmön vuotuinen säästöpotentiaali (29 k€) on hyödyntämiskohteessa kaukolämpöverkkoon myynti kaikista suurin (taulukko 8). Taulukosta 8 nähdään, että toiseksi suurin säästöpotentiaali voidaan saada kuumavesisäiliön esilämmityksessä (17 k€/a), josta on matkaa 12 k€/a kaukolämpöverkon myynnin säästöpotentiaaliin 29 k/a. Korvausilman lämmityksestä saatavat säästöt (14 k€/a) ovat kaikista alhaisimmat.

Taulukko 8. Case-kohteen säästöpotentiaali eri hyödyntämiskohteissa. Kaukolämpöverkkoon myynnissä säästöpotentiaali on kaikista suurin (29 k€/a).

Hukkalämmön hyödyntämiskohde	**Säästöpotentiaali k€/a**
Korvausilman lämmitys	14
Kuumavesisäiliön esilämmitys	17
Myynti kaukolämpöverkkoon	29

5.2.1 Investointikustannukset

Hukkalämmön hyödyntäminen kaukolämpöverkossa vaatii Koskisen Oy:ltä noin 60-70 k€:n investoinnin, jonka sisältö esitettiin taulukossa 6. Investointikustannuksen tarkempi arvio/ tarjous vaatii Calefa Oy:n mukaan kohdekäyntiä, ja he lisäsivät haastatteluvastausten oheen muutamia huomioita investointiin liittyen. Esimerkiksi paluulauhteen virtaaman vaihtelun takia voisi olla kannattavaa hankkia pieni puskurivarasto, jotta lämpöenergia voitaisiin siirtää tasaisemmin talteen kaukolämpöliittymään (puskurivarastoa ei ole huomioitu investointihinnassa). Hukkalämmön uusiokäytölle on myös mahdollista hakea tukia Business Finlandin kautta. Calefa Oy:n antama budjettiarvio on tehty sillä oletuksella, että Koskisen Oy voi liittää automaation omaan tehdasjärjestelmäänsä.

5.2.2 Takaisinmaksuaika

Koroton takaisinmaksuaika saadaan kaavalla (1): $a = I/S \Leftrightarrow a$ = 65 000 €/29000 €/a = 2,2 vuotta, kun oletetaan investointikustannusten I olevan budjettiarvion (60-70 k€) keskiarvo ja säästöjen S vuotuinen säästöpotentiaali kaukolämpöverkkoon myynnissä (29 k€).

Korollinen takaisinmaksuaika saadaan, kun kumulatiivinen diskontattu nettokassavirta muuttuu positiiviseksi (taulukko 9.)

Taulukko 9. Korollisen takaisinmaksuajan laskennan lähtöarvot case-kohteelle. Investointikustannukset ovat 65 k€ ja vuotuiset nettosäästöt ovat 29 k€. Sisäisen korkokannan on oletettu olevan 4 %.

Vuosi [a]	Nettosäästöt [€/a]	Investointikustannukset [€]	Diskonttaustekijä (i= 4 %)	Säästöjen nykyarvo [€]	Kumulatiivinen diskontattu nettokassavirta [€]
0		65 000			-65 000
1	29 000		0,96	27 885	-37 115
2	29 000		0,93	26 812	-10 303
3	29 000		0,89	25 781	15 478
4	29 000		0,86	24 789	40 267
5	29 000		0,82	23 836	64 103
6	29 000		0,79	22 919	87 022

Korollisen takaisinmaksuajan laskennan lähtötiedot on koottu taulukkoon 9 ja se voidaan laskea kaavalla (5):

$$\frac{X-Y}{Z-Y} = \frac{0 - CDNCF\ (viimeinen\ negatiivinen\ vuosi)}{CDNFC\ (ensimmäinen\ positiivinen\ vuosi) - CDNCF\ (viimeinen\ negatiivinen\ vuosi)}$$

$$\Leftrightarrow \frac{X-2a}{3a-2a} = \frac{0-(-10303\ €)}{15478\ € - (-10303\ €)} \Leftrightarrow \underline{X = 2{,}4 \text{ vuotta}}$$

5.2.3 Tekninen toteutus

Hukkalämmön myyminen kaukolämpöverkkoon edellyttää Koskisen Oy:ltä valmiutta lähteä mukaan budjettiarvion 60–70 k€:n suuruusluokan investointiin yli kahden vuoden

takaisinmaksuajalla. Hukkalämmön hyödyntämismenetelmää voidaan pitää melko yksinkertaisena, koska paluulauhteen lämpöenergia otetaan talteen paluuputkesta lämmönsiirtimellä ja ohjataan putkiston kautta suoraan hukkalämmön lähteeltä kunnan kaukolämpöliittymän lämmönsiirtimeen kuvassa 17 esitetyllä tavalla. Hukkalämmön lähde kuuluu korkeaan lämpötilatasoon, koska sen lämpötila on reilusti yli 100 astetta, mikä mahdollistaa hukkalämmön hyödyntämisen ilman, että sen lämpötilatasoa tarvitsee nostaa välissä esimerkiksi lämpöpumpulla ennen kuin lämpöenergia voidaan hyödyntää kaukolämpöverkossa. Lämpöenergiaa ei myöskään käytetä matkalla muihin hyödyntämiskohteisiin, mikä helpottaa energiankeräysjärjestelmän rakentamista kohteeseen.

Kaukolämpöverkkoon myynnistä saatava vuotuinen säästöpotentiaali (29 k€) on mielestäni suuri vaadittaviin investointikustannuksiin (60-70 k€) ja takaisinmaksuaikaan (koroton 2,2 a ja korollinen 2,4 a) nähden ja investointi vaikuttaa siksi toteuttamiskelpoiselta. Teknisen toteutuksen näkökulmasta hukkalämmön lähde ja kaukolämpöverkon liittymä edellyttänee vähäisiä asennustöitä putkitöiden osalta, koska hukkalämmön lähde ja hyödyntämiskohde ovat lähekkäin toisiinsa nähden ja sijaitsevat samassa 25·15 m kokoisessa tilassa. Lisäksi Calefa Oy:n oletus automaation liittämisestä Koskisen Oy:n omaan tehdasjärjestelmään voi helpottaa energiankeräysjärjestelmän rakentamista kohteeseen, kun sitä verrataan esimerkiksi tapauksiin, joissa energiankeräysjärjestelmälle täytyisi tehdä oma erillinen automaatiojärjestelmä. Tarkemman yksityiskohtaisen selvityksen toteutuksesta, budjettitarjouksesta sekä ratkaisusta voi tilata esimerkiksi asiantuntijahaastattelun antaneelta Calefa Oy:ltä.

5.3 Herkkyys- ja virhetarkastelut

Oman energian tuotannon hinnan muutokset eli lämpöenergian hinnan [€/MWh] kasvu tai lasku vaikuttaa suoraan tässä diplomityössä arvioituihin säästöpotentiaaleihin eri hyödyntämiskohteissa. Hyödyntämiskohteissa saavutetut säästöpotentiaalit kasvavat/laskevat kuitenkin samassa suhteessa toisiinsa nähden, mikäli oman energian tuotannon hinta muuttuu eikä muutos aiheuta siksi vaihtelua hyödyntämiskohteiden kannattavuusjärjestyksessä.

Lämpöenergian hinnan ja investointikustannusten hinnan muutokset ovat suoraan verrannollisia hukkalämpöinvestoinnin nettonykyarvoon. Kuvasta 22 nähdään, että 15 k€:n muutos investointikustannuksissa aiheuttaa noin puolen vuoden muutoksen investoinnin

takaisinmaksuajassa. Takaisinmaksuajan herkkyysanalyysi tehtiin korottomalle takaisinmaksuajalle laskennan yksinkertaistamisen takia.

Kuva 22. Investointikustannusten hinnan muutosten vaikutus case-kohteen kannattavimmassa hukkalämmön hyödyntämisratkaisussa: kaukolämpöverkkoon myynnissä

Hukkalämpöinvestoinnin nettonykyarvo NPV voidaan selvittää kaavalla (10):

$$NPV = a_{n,\,i} \cdot S - I \qquad (10)$$

, jossa $a_{n/i}$ on nykyarvokerroin

S on vuotuiset säästöt

I on investointikustannukset.

Nykyarvokerroin $a_{n,\,i}$ saadaan kaavasta (11):

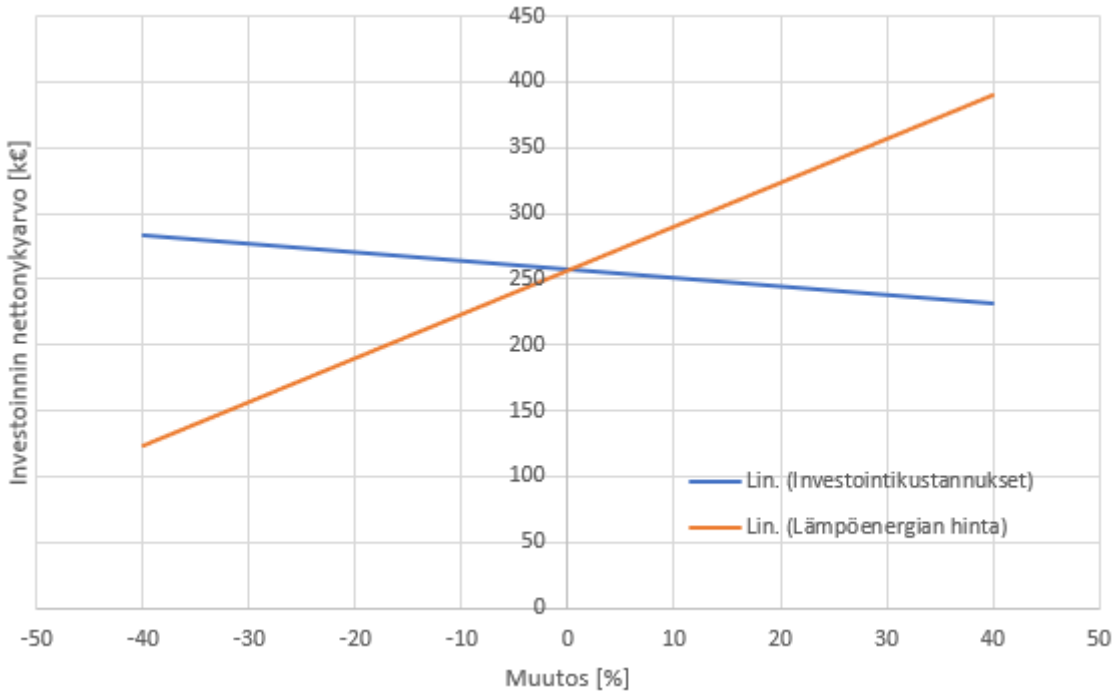
$$a_{n,\,i} = \frac{(1+i)^n - 1}{i \cdot (1+i)^n} = \frac{(1+0{,}04)^{15} - 1}{0{,}04 \cdot (1+0{,}04)^{15}} = \underline{11{,}1} \qquad (11)$$

, jossa n on investoinnin pitoaika [a]

i on korkokanta [%]

Hukkalämpöinvestoinnin nettonykyarvoksi saadaan 257 k€, kun vuotuiset säästöt ovat 29 k€ ja investointikustannukset ovat 65 k€ (NPV= 11,1· 29 k€/a–65 k€ = 257 k€).

Kuvasta 23 nähdään investointikustannusten ja lämpöenergian hinnan prosentuaalisten muutosten vaikutus case-kohteen investoinnin nettonykyarvoon. Investoinnin pitoajaksi *n* oletettiin herkkyysanalyysissä 15 vuotta ja korkokantana *i* käytettiin neljää prosenttia.



Kuva 23. Investoinnin nettonykyarvo käytetyillä oletuksilla on investointikustannusten ja lämpöenergian hinnan muutoksia kuvaavien suorien leikkauspiste (NPV= 257 k€)

Lämpöenergian hinnan muutosten vaikutus investoinnin nettonykyarvoon on case-kohteessa merkittävästi investointikustannuksia suurempi tekijä, koska esimerkiksi 20 % muutos (nousu tai lasku) lämpöenergian hinnassa aiheuttaa noin 70 k€:n muutoksen investoinnin nettonykyarvossa, mutta sama 20 % muutos investointikustannuksissa aiheuttaa vain noin 10 k€:n muutoksen investoinnin nettonykyarvossa (kuva 24).

Hukkalämmön lähteestä saatavan lämpötehon voidaan ajatella olevan tämän diplomityön olennaisin yksittäinen virhetekijä, koska se on määritetty 11 päivää kestäneiden virtausmittausten pohjalta. Saadut tulokset skaalattiin vuositasolle ja tulosten pohjalta laskettiin lastulevytehtaan paluulauhteesta saatavat energiamäärät eri hyödyntämiskohteisiin. Syntyvästä hukkalämpöenergian määrästä olisi ollut hyvä saada tilastollinen pysyvyyskäyrä koko vuoden ajalta, mutta sitä ei ollut saatavilla.

Kokeellisen tutkimuksen tuloksena saatua virtaamaa 1,89 m^3/h voidaan pitää kuitenkin luotettavana, koska virtaama on keskiarvo mittaustuntien aikana tehdyistä mittauksista, jotka ovat keskiarvoja viimeisen tunnin aikaisista virtaamista ja mittauspisteitä kertyi tehtyjen virtausmittausten aikana yli 250 kappaletta. Kuvassa 13 esitetyt lastulevytehtaan paluulauhteiden lämpötilatrendit ovat Koskisen Oy:n mukaan vuositasolla keskiarvoltaan lähellä 197 astetta, joka tukee lauhdesäiliöön palaavan lauhde-energian eli hukkalämmön tasaisuutta lämpötilatasojen näkökulmasta tarkasteltuna. Hukkalämmöstä saatavan lämpötehon suurempi vaihtelu (taulukko 7) vaatii mielestäni suurempia muutoksia yrityksen prosessissa, koska virtausmittausten aikana yrityksen prosessi toimi normaalisti eivätkä mittaukset osuneet esimerkiksi poikkeukselliseen ajankohtaan. Lämpötehon laskennassa paluulauhteen alku- ja loppulämpötilan lämpötilaero on vahvasti riippuvainen Koskisen Oy:n määrittämästä loppulämpötilarajasta (100-110 °C), joka vaikuttaa olennaisesta hukkalämmöstä saatavan energian määrään (1,7–1,9 GWh/a) kohteessa.

6 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Case-kohteessa Koskisen Oy:n Järvelän tuotantolaitoksen lastulevytehtaalla syntyy vuosittain merkittävä energiamäärä korkean lämpötilatason hukkalämpöä, jolle löydettiin tässä diplomityössä kolmesta eri vaihtoehdosta (lastulevytehtaan korvausilman lämmitys, vaneritehtaan kuumavesisäiliön esilämmitys ja myynti kunnan kaukolämpöverkkoon) kannattavin hyödyntämisratkaisu: kunnan kaukolämpöverkkoon myynti (taulukko 8). Hyödyntämismenetelmä kuuluu mielestäni Motivan (2019) hierarkiassa (kuva 1) ensimmäisellä tasolle, koska kyseessä on primäärienergiaa säästävä toimenpide, kun lauhdesäiliöön palaavaa hukkalämpöä otetaan talteen omaa prosessihöyryä (kuva 7) säästäen, vaikka hierarkiassa on määritetty erikseen taso hukkalämmön hyödyntämiselle ulkopuolisessa kaukolämpöverkossa. Case-kohteessa löydetty hukkalämpöenergian potentiaali (1,7 GWh/a) on lähellä Kiilto Oy:n (2019) Lempäälän liimatehtaalla vuosittain säästettävän lämpöenergian potentiaalia (2,6 GWh/a). Euromääräinen ero Kiilto Oy:n säästöjen (150 k€/a) ja Koskisen Oy:n säästöpotentiaalin (29 k€/a) välillä johtuu hukkalämmön arvoa kuvaavien mittarien erosta, koska Kiillolla säästöjä arvioidaan säästetyn maakaasun muodossa, joka on kalliimpaa kuin case-kohteen lämpöenergia, koska Koskisella säästöjä arvioidaan itse tuotetun bioenergian muodossa. Edellä mainittuja potentiaaleja suoraan vertaamalla olisi Koskisen Oy:n vuotuiset säästöt lähes 100 k€, mikäli säästöjä arvioitaisiin säästetyn maakaasun muodossa, kuten Kiillon tapauksessa (150 k€/a/2,6·1,7 = 98 k€/a).

Valtakunnallisella tasolla lastulevytehtaalla syntyvää hukkalämpöä ei voida rinnastaa Nesteen (2019) Porvoon Kilpilahden tuotantolaitoksen kokoluokan hukkalämmön tuottajiin, mutta teollisuudessa vallitsevaan 16 TWh:n hukkalämpöpotentiaaliin (taulukko 1) kuulunee paljon Koskisen Oy:n tapauksen kokoluokan hukkalämmön tuottajia. Pitkät etäisyydet hukkalämpöjen syntypaikan välillä sen hyödyntämiskohteisiin nähden voivat olla yksiä keskeisimmistä syistä sille, miksi teollisuudessa piilevää hukkalämpöä ei ole vielä otettu käyttöön. Case-kohteessa tilanne oli siinä mielessä helppo, että yritys myi kaukolämpöä jo entuudestaan kunnan kaukolämpöverkkoon, joka sijaitsee aivan yrityksen vieressä. Tietoisuuden lisääminen teollisuusyrityksille hukkalämmön hyödyntämismahdollisuuksista ja toteutuneista hukkalämpöratkaisuista ja pidempien kaukolämpöyhteyksien luonti voivat edesauttaa teollisuudessa piilevän hukkalämpöpotentiaalin käyttöönottoa. Toisaalta tällä hetkellä tuntuu,

että hukkalämpöratkaisuja toteuttavat yritykset ovat jo panostaneet vahvasti markkinointiin ja mediassa uutisoidaan, kun esimerkiksi uusia hukkalämpöhankkeita tulee tietoisuuteen. Yksityiskohtaisimmat tiedot teknisistä ratkaisuista jäävät usein kuitenkin uutisoinnista piiloon niin kuin esimerkiksi Helenin (2019) ja Pauligin (2019) tapauksessa Helsingissä. Teollisuusyrityksen kannattaa omata entuudestaan alan asiantuntijuutta, hankkia ulkopuolisia konsulttipalveluita tai palkata työntekijöitä, joiden päätyötehtävät voivat keskittyä hukkalämpöön, jotta hukkalämpömahdollisuuksien tarkastelu voidaan ottaa tarkemman selvityksen alle kohteessa. Nykyään trendi on menossa vahvasti kohti avaimet käteen tyyppisiä ratkaisuja, joissa teknisen ratkaisun suunnitteleva ulkopuolinen yritys toimittaa asiakasyritykselle (esimerkiksi teollisuusyritykselle hukkalämpöselvityksen ja -ratkaisun) kokonaisvaltaisen kohdekohtaisen ratkaisun ostopalveluna. Teollisuusyritys voi hankkia asiantuntijuutta ja tietoa hukkalämmön hyödyntämismahdollisuuksista myös paikalliselta energiayhtiöltä, mistä voi olla erityisesti apua tilanteessa, jossa hukkalämpö voitaisiin hyödyntää yrityksen ulkopuolella (esimerkiksi kaukolämpöverkossa). Hukkalämpöön liittyvä liiketoiminta on teollisuusyrityksille sivuliiketoimintaa ja siksi päätöksentekijät tulee vakuuttaa energiainvestoinnin kannattavuudesta ja tuottavuudesta erityisesti pitkällä aikavälillä. Case-kohteessa investointi osoittautui taloudellisten tunnuslukujensa (luvut 5.2.1-5.2.2) puolesta kannattavaksi jo lyhyellä aikavälillä ja herkkyysanalyysissä (luku 5.3) investoinnille saatiin pidemmällä aikavälillä positiivinen nettonykyarvo (kuva 23). Takaisinmaksuajan ollessa pidempi olisi tarkempi kannattavuus- ja investointilaskenta ollut suositeltavaa. Taloudelliset säästöt ja vähentyneet päästöt sekä energiatehokkaan yhteiskunnan rakentamisessa mukana olo ovat päätekijöitä, jotka kannustavat teollisuusyritystä lähtemään mukaan pidempiaikaisiin energiainvestointeihin. Suomessa vallitsevan energiamurroksen aikakauden väistyminen voi edesauttaa teollisuuden hukkalämmön hyödyntämistä ja energiamarkkinat voivat olla tulevaisuudessa energiainvestointeja entistä enemmän tukevammat. Avoimet kaukolämpömarkkinat ovat hyvä esimerkki uudesta hukkalämmön pariin kehkeytyneestä liiketoiminnasta.

LÄHTEET

Aalborg University. 2013. Heat Roadmap Europe 2 Second Pre-Study for the EU27. Saatavissa: https://vbn.aau.dk/ws/portalfiles/portal/77342092/Heat_Roadmap_Europe_Pre_Study_II_May_2013.pdf

AirExet Oy. 2018. Ilmanvaihto-/lämmitysmuutokset 2018. [Julkaisematon aineisto]

Calefa Oy. 2018. Suomessa kehitetty kuumalämpöpumppu mullistaa teollisuuden energiantuotannon. [Verkkoaineisto] [Viitattu 1.2.2020]. Saatavissa: http://www.calefa.fi/fi/ajankohtaista/suomessa-kehitetty-kuumalampopumppu-mullistaa-teollisuuden-energiantuotannon/

Helen Oy. 2019. Kahvipaahtimon hukkalämpö hyötykäyttöön. [Verkkoaineisto] [Viitattu 9.2.2020] Saatavissa: https://www.helen.fi/uutiset/2019/kahvipaahtimo

Helsingin Sanomat HS. 2020. Kilpilahden hukkalämpö voi kohta lämmittää pääkaupunkiseudun koteja – liki miljardin euron urakassa rakennettaisiin 40 kilometrin yhdysputki Porvoosta Helsinkiin. [Verkkoaineisto] [Viitattu 2.2.2020] Saatavissa: https://www.hs.fi/kaupunki/art-2000006374843.html

Elenia Lämpö Oy. 2015. Elenia Lämmön ja Stora Enson lämpöyhteistyö jatkuu Heinolassa. [Verkkoaineisto] [Viitattu 9.2.2020] Saatavissa: https://www.elenia.fi/uutiset/elenia-l%C3%A4mm%C3%B6n-ja-stora-enson-l%C3%A4mp%C3%B6yhteisty%C3%B6-jatkuu-heinolassa

Elenia Lämpö Oy. 2020. Heinola lämpiää vastuullisesti Stora Enson prosessilämmöllä. [Verkkoaineisto] [Viitattu 9.2.2020] Saatavissa: https://www.elenia.fi/lampo_ja_kaasu/artikkelit/heinola-l%C3%A4mpi%C3%A4%C3%A4-vastuullisesti-stora-enson-prosessil%C3%A4mm%C3%B6ll%C3%A4

Energiatehokkuuslaki 1429/2014. Saatavissa: https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2014/20141429

Energiateollisuus ry. 2018. Kaukolämpötilasto 2017. Saatavissa: https://energia.fi/files/2949/Kaukolampotilasto_2017.pdf

Energiavirasto. 2020. Kustannus-hyötyanalyysi. [Verkkoaineisto] [Viitattu 6.1.2020] Saatavissa: https://energiavirasto.fi/kustannus-hyotyanalyysi

Fortum Oyj. 2019. Fortum mukana selvityksessä: Kilpilahden hukkalämpö voisi kattaa noin neljänneksen pääkaupunkiseudun kaukolämmön tarpeesta. [Verkkoaineisto] [Viitattu 2.2.2020] Saatavissa: https://www.fortum.fi/media/2019/06/fortum-mukana-selvityksessa-kilpilahden-hukkalampo-voisi-kattaa-noin-neljanneksen-paakaupunkiseudun-kaukolammon-tarpeesta

Fortum Oyj. 2020. Avoin kaukolämpö ostohinnat. [Verkkoaineisto] [Viitattu 26.1.2020] Saatavissa: https://www.fortum.fi/yrityksille-ja-yhteisoille/lammitys/kaukolampo-0/avoin-kaukolampo/avoin-kaukolampo-ostohinnat

Ilmatieteenlaitos. 2020. Energialaskennan testivuodet nykyilmastossa. [Verkkoaineisto] [Viitattu 28.2.2020] Saatavissa: https://www.ilmatieteenlaitos.fi/energialaskennan-testivuodet-nyky

Kiilto Oy. 2017. Otetaan lämpöenergiat talteen. [Verkkoaineisto] [Viitattu 5.2.2020] Saatavissa: https://www.kiilto.com/fi/uutishuone/uutiset/otetaan-lampoenergiat-talteen/

Kiilto Oy. 2019. Kiillon esimerkki hukkalämmön hyödyntämisestä sai kiitosta elinkeinoministeriltä. [Verkkoaineisto] [Viitattu 5.2.2020] Saatavissa: https://www.kiilto.com/fi/uutishuone/uutiset/kiillon-esimerkki-hukkalammon-hyodyntamisesta-sai-kiitosta-elinkeinoministerilta/

Koskisen Oy. 2017. Koskisen Oy myy voimalaitoksensa Lahti Energialla. [Verkkoaineisto] [Viitattu 12.2.2020] Saatavissa: https://www.koskisen.fi/tiedotteet/koskisen-oy-myy-voimalaitoksensa-lahti-energialle/

Koskisen Oy. 2018. Etävalvomo. [Julkaisematon aineisto]

Koskisen Oy. 2019. Vuosiraportti, Kaukolämpö. [Julkaisematon aineisto]

Koskisen Oy. 2020a. Energia. [Verkkoaineisto] [Viitattu 12.2.2020] Saatavissa: https://www.koskisen.fi/vastuullisuus/energia/#

Koskisen Oy. 2020b. Perheyritys. [Verkkoaineisto] [Viitattu 12.2.2020] Saatavissa: https://www.koskisen.fi/konserni/perheyritys/

Koskisen Oy. 2020c. Etävalvomo. [Julkaisematon aineisto]

Kostowski, W., Pajaczek, K., Pociecha, A., Kalina, J., Niedzielski P. & Przybyl, A. "Methods of waste heat – A compressor station case study". Energy Conversion and Management, Vol 197, 2019.

Lahikainen, T. 2020. Asiantuntijahaastattelu / budjettikysely. [Sähköpostiviesti 23.3.2020]

Miró, L., Gasia, J. & Cabeza, LF. "Thermal energy storage (TES) for industrial waste heat (IWH) recovery: A review". Applied energy, pp. 285. Vol 179, 2016.

Turunen, T., & Jääskeläinen, J. 2015. Koskisen Oy, Kohdekatselmuksen loppuraportti.

Motiva Oy. 2018. Toimenpiteen taloudellinen kannattavuus Laskentatyökalu – ohje työkalun käyttöön. Saatavissa: https://www.motiva.fi/files/14771/Toimenpiteen_taloudellinen_kannattavuus_laskurin_ohje_2018.pdf

Motiva Oy. 2019. Esiselvitys: Ylijäämälämmön potentiaali teollisuudessa. Saatavissa:

https://www.motiva.fi/files/16214/Esiselvitys_-_Ylijaamalammon_potentiaali_teollisuudessa.pdf

Neste Oyj. 2019. Kilpilahden hukkalämpö voisi kattaa noin neljänneksen pääkaupunkiseudun kaukolämmön tarpeesta. [Verkkoaineisto] [Viitattu 2.2.2020] Saatavissa: https://news.cision.com/fi/neste/r/kilpilahden-hukkalampo-voisi-kattaa-noin-neljanneksen-paakaupunkiseudun-kaukolammon-tarpeesta,c2842982

Papapetrou, M., Kosmadakis, G., Cipollina, A., La Commare, U. & Micale, G. "Industrial waste heat: Estimation of the technically available resource in the EU per industrial sector, temperature level and country". Applied Thermal Engineering, pp. 212. Vol 138, 2018.

Paulig. 2019. Kahvipaahtimon hukkalämpö hyötykäyttöön. [Verkkoaineisto] [Viitattu 9.2.2020] Saatavissa: https://www.paulig.fi/yritys/mediatiedotteet/kahvipaahtimon-hukka-lampo-hyotykayttoon

Smart Energy System Competence Center SENECC. 2018. Social Energy – Prosumer Centric Energy Ecosystem (ProCem). Saatavissa: http://www.senecc.fi/wp-content/uploads/2018/11/ProCem-loppuraportti.pdf

Suomen itsenäisyyden juhlarahasto Sitra. 2017. Kaksisuuntaisen kaukolämmön liiketoimintamallit. Saatavissa: https://media.sitra.fi/2017/02/27175247/Kaksisuuntaisen_kaukolammon_liiketoimintamallit-2.pdf

Suomen itsenäisyyden juhlarahasto Sitra. 2019. Teollisuusyritysten hukkalämpö hyötykäyttöön. [Verkkoaineisto] [Viitattu 4.1.2020] Saatavissa: https://www.sitra.fi/caset/teollisuusyritysten-hukkalampo-hyotykayttoon/

Stora Enso Oyj. 2018. Uusiutuvasta lämmöstä hyötyvät kaikki. [Verkkoaineisto] [Viitattu 9.2.2020] Saatavissa: https://www.storaenso.com/en/newsroom/news/2018/3/uusiutuvasta-lammosta-hyotyvat-kaikki

STT Info. 2019. Kutsu medialle: Ministeri käynnistää Kiillon uuden energiankierrätysjärjestelmän. [Verkkoaineisto] [Viitattu 5.2.2020] Saatavissa: https://www.sttinfo.fi/tiedote/kutsu-medialle-ministeri-kaynnistaa-kiillon-uuden-energiankierratysjarjestelman?publisherId=68350554&releaseId=69870095

Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy. 2015. Tutkimusraportti: Tehokas CHP,

kaukolämpö ja -jäähdytys Suomessa 2010 – 2025. Saatavissa: https://energia.fi/files/412/Raportti_Kaukolampo_ja_CHP_VTT_20151218.pdf

Tilastokeskus. 2018. Asuinrakennusten päälämmönlähteiden kehitys 2010-luvulla. [Verkkoaineisto] [Päivitetty 21.11.2019] [Viitattu 4.1.2020] Saatavissa: https://www.stat.fi/til/asen/2018/asen_2018_2019-11-21_kat_001_fi.html

Tilastokeskus. 2019. Teollisuuden energiankäyttöenergialähteittäin. [Verkkoaineisto] [Viitattu 4.1.2020] Saatavissa: https://www.stat.fi/til/tene/2018/tene_2018_2019-11-01_kuv_002_fi.html

Työ- ja elinkeinoministeriö. 2015. Suomen sähkötehon riittävyys ja kapasiteettirakenteen kehitysvuoteen 2030. Saatavissa: https://tem.fi/documents/1410877/2717655/Suomen_sahkotehon_riittavyys_ja_kapasiteettirakenteen_kehitys_vuoteen_2030_2015.pdf/56b3f402-31fa-48a7-a6ef-d750e4665f78/Suomen_sahkotehon_riittavyys_ja_kapasiteettirakenteen_kehitys_vuoteen_2030_2015.pdf.pdf

Työ- ja elinkeinoministeriö. 2017. Tulevaisuuden energia 2030...2050. Saatavissa: https://tem.fi/documents/1410877/2772829/332_2017_Tulevaisuuden+energia_2030_2050.pdf/4f1c0ec0-58fc-4c1c-9297-7f90ac01615b

Valtioneuvosto. 2019. Osallistava ja osaava Suomi: sosiaalisesti, taloudellisesti ja ekologisesti kestävä yhteiskunta. Saatavissa: http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/161662/Osallistava_ja_osaava_Suomi_2019_WEB.pdf

YIT Teollisuus- ja verkkopalvelut Oy. 2010. Teollisuuden ylijäämälämmön hyödyntäminen kaukolämmityksessä. Saatavissa: https://docplayer.fi/2968184-Tyo-ja-elinkeinoministerio.html

Yleisradio. 2016. Kartonkitehdas laittaa jätevedet kuriin uudella tekniikalla – bonuksena lisää lämpöenergiaa lietteestä. [Verkkoaineisto] [Viitattu 9.2.2020] Saatavissa: https://yle.fi/uutiset/3-9117688

Yleisradio. 2019. Liimatehdas valjasti hukkalämmön hyötykäyttöön: Päästöt putosivat ja energialasku pieneni 100 000 euroa vuodessa. [Verkkoaineisto] [Viitattu 5.2.2020] Saatavissa: https://yle.fi/uutiset/3-10800350