Tampereen yliopisto

Niko Salonen

TEOLLISUUDEN HUKKALÄMPÖJEN HYÖDYNTÄMINEN

Case: moottorivoimalaitos

Diplomityö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Tarkastaja: Yliopistonlehtori Henrik Tolvanen
Marraskuu 2020

TIIVISTELMÄ

Niko Salonen: Teollisuuden hukkalämpöjen hyödyntäminen
Diplomityö
Tampereen yliopisto
Ympäristö- ja energiatekniikan DI-ohjelma
Marraskuu 2020

Hukkalämmön hyödyntämisen odotetaan olevan olennainen osa Suomen energiamarkkinoita tulevaisuudessa. Hukkalämmöllä tarkoitetaan lämpöenergiaa, joka siirtyy hyödyntämättömänä ympäristöön. Hukkalämmön hyödyntämistä ajavia voimia ovat esimerkiksi taloudelliset asiat sekä ympäristö- ja ilmastotavoitteet. Tässä työssä tarkastellaan mitkä hukkalämmön ominaisuudet vaikuttavat sen hyödyntämiseen ja kuinka hukkalämpöä voidaan hyödyntää teknistaloudelliselta kannalta. Työn päätavoite on luoda menetelmä hukkalämmön hyödyntämiskeinojen kartoitukseen ja niiden taloudellisen potentiaalin analysointiin.

Työ koostuu kirjallisuusselvityksestä, menetelmän luomisesta ja kaasumoottorien hukkalämpöjen hyödyntämisen tarkastelusta. Kirjallisuusselvityksessä tarkastellaan hukkalämpöön ja sen hyödyntämiseen liittyvää teoriaa. Kirjallisuusselvityksen ja muiden tietojen perusteella luodaan työssä kehitetty menetelmä. Menetelmää sovellettiin kaasumoottorien hukkalämmön tarkasteluun.

Työn kirjallisuusselvityksessä selvisi, että Suomessa prosessiteollisuus, erityisesti metsäteollisuus, on merkittävin hukkalämmön lähde. Merkittävimmät hukkalämmön hyödyntämiseen vaikuttavat tekijät ovat lähteen ja kulutuskohteen lämpötilatasot sekä niiden tehotasojen aikaprofiilit. Työssä tarkasteltiin kolmea erilaista hukkalämmön hyödyntämisteknologiaa: suoraa siirtoa lämmönvaihtimella, lämpöpumppuja sekä lämpövarastoja.

Työssä kehitetty menetelmä koostui kolmesta eri vaiheesta. Ensimmäisessä vaiheessa tarkastellaan hukkalämmön lähdettä ja mahdollisia kulutuskohteita. Menetelmän toisessa vaiheessa eli teknisessä tarkastelussa kartoitettiin mahdolliset hyödyntämisratkaisut perustuen hukkalämmön lähteen ja lämmön kulutuskohteen ominaisuuksiin. Kolmannessa eli taloudellisessa vaiheessa arvioitiin hukkalämmön ja sen hyödyntämisen taloudellista potentiaalia.

Menetelmää sovellettiin kahdesta kaasumoottorista koostuvan voimalaitoksen hukkalämmön hyödyntämisen analysoinnissa. Menetelmän soveltuvuuden arviointia varten luotiin tarkempi laskenta sähkön ja kaukolämmön aikasarjojen avulla. Tulosten mukaan luotu menetelmä soveltuu hyvin hukkalämmön taloudellisen potentiaalin analysointiin. Moottorivoimalaitoksen hyödyntämisessä tarkasteltiin tarkoilla laskelmilla neljää erilaista kytkentää. Kannattavin vaihtoehto oli yhden moottoreiden yhteisen lämpöpumpun käyttäminen esilämmityksessä. Tämän kytkennän korottomaksi takaisinmaksuajaksi saatiin noin 5 vuotta ja sisäiseksi korkokannaksi noin 18 %, joten investointi on niiden mukaan kannattava.

Tarkastellun kohteen hukkalämmön kannattavuutta tulee tarkastella tarkemmin ennen mahdollista investointipäätöstä. Yleisellä tasolla hukkalämmön hyödyntämistä voidaan lisätä esimerkiksi kaukolämpöverkkojen lämpötilojen laskemisella sekä hyödyntämisteknologioiden kehittämisellä. Työssä luodun menetelmän jatkokehityksessä tulisi tarkastella tarkemmin tutkittujen hyödyntämisteknologioiden ominaisuuksia ja investointikustannuksia. Lisäksi hukkalämmön lähteiden kartoitukselle voidaan luoda oma menetelmä.

Avainsanat: hukkalämpö, lämpöpumput, lämpövarasto, energiatehokkuus

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ABSTRACT

Niko Salonen: Utilization of Industrial Waste Heat
Master Thesis
Tampere University
Master's Programme in Environmental and Energy Engineering
November 2020

Waste heat is expected to be an integral part of the Finnish energy market in the future. Waste heat refers to unused thermal energy that is transferred to the environment. Forces driving the utilization of waste heat include, for example, economic issues and environmental and climate goals. This work examines which properties of waste heat affect its utilization and how waste heat can be utilized. The main goal of the work is to create a method for mapping the utilization of waste heat and analysing the economic potential of waste heat.

The work consists of a literature review, the creation of a method and a review of the utilization of waste heat from gas engines. The literature review examines the theory related to waste heat and its utilization. Based on the literature review and other information, a method in the work is created. The method was applied to the examination of the waste heat of the gas engines.

The literature review revealed that the process industry, especially the pulp and paper industry, is the most significant source of waste heat in Finland. The most significant factors influencing the utilization of waste heat are the temperature levels of the source and the heat consumer, as well as the time profiles of their power levels. Three different waste heat recovery technologies were considered in the work: direct transfer with a heat exchanger, heat pumps and heat storage.

The method developed in the work consisted of three different steps. In the first phase, the source of waste heat and possible consumption targets are examined. In the second stage of the method, that is the technical examination, possible utilization solutions were mapped based on the characteristics of the waste heat source and the heat consumption destination. In the third or economic phase, the economic potential of waste heat and its utilization was assessed.

The method was applied in the analysis of the waste heat utilization of a power plant consisting of two gas engines. A more accurate time series calculation was created to assess the applicability of the method. In the time series calculation, the operation of the engines and the return on waste heat utilization were calculated using the time series of electricity and district heating. The method created according to the results is well suited for the analysis of the economic potential of waste heat. In the utilization of the motor power plant, four different connections were considered by precise calculations. The most profitable option was to use one common heat pump for the engines for preheating. The interest-free payback period of this connection was approximately 5 years and the internal interest rate was approximately 18 %, so the investment is profitable.

The profitability of the waste heat of the examined object must be examined more closely before a possible investment decision. At a general level, the utilization of waste heat can be increased, for example, by lowering the temperatures of district heating networks and developing utilization technologies. In the further development of the method created in the work, the characteristics and investment costs of the studied utilization technologies should be examined in more detail. In addition, a separate method can be created for the mapping of waste heat sources.

Keywords: waste heat, heat pump, heat storage, energy efficiency

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

ALKUSANAT

Tämä diplomityö tehtiin osana MAB Powertec Oy:n Hukkalämpö-kehityshanketta. Haluan kiittää mahdollisuudesta työn tekemiseen sekä kiittää kaikkia työkavereitani tuesta diplomityöni aikana. Teidän kanssanne työnteko on ollut aina mielekästä. Erityiskiitokset työni ohjaajalle Anna Pääkköselle, jonka ammattitaito ja tuki on ollut korvaamatonta työn tekemisen aikana.

Haluan kiittää yliopiston henkilökuntaa hyvästä opetuksesta. Suuret kiitokset työni tarkastajalle Henrik Tolvaselle, joka ideoi ansiokkaasti työtäni ja löysi aina aikaa työn ohjaamiselle. Kiitos myös työn toiselle tarkastajalle Seppo Syrjälälle, joka aikoinaan ohjasi minun kandidaatintyöni. Molempien pitämät kurssit ovat antaneet erinomaiset eväät tulevaisuutta varten.

Suurimmat kiitokset kuuluvat kuitenkin perheelleni sekä kaikille läheisilleni. Vanhemmilleni suuri kiitos tukemisestani koko koulutaipaleen aikana. Kaverini ovat antaneet suuren avun niin opiskellessa kuin vapaa-ajallakin.

Tampereella, 22.11.2020

Niko Salonen

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO 1
2. HUKKALÄMMÖN LÄHTEET JA KÄYTTÖ TEOLLISUUDESSA 3
2.1 Hukkalämmön lähteet 4
2.2 Hukkalämmön hyödyntäminen ja sen käyttökohteet 6
2.3 Hukkalämmön tuotannon ja lämmöntarpeen yhdistäminen 10
2.4 Hukkalämmön tekniseen hyödynnettävyyteen vaikuttavat tekijät 19
3. HUKKALÄMMÖN TALOUDELLINEN KANNATTAVUUS 21
3.1 Investointikustannukset ja taloudellisen kannattavuuden arviointi 21
3.2 Sähkön, lämmön ja polttoaineiden hinnat 23
4. AINEISTO JA MENETELMÄT 27
4.1 Menetelmä hukkalämmön hyödyntämiskeinojen kartoittamiseen 28
4.2 Taloudellisen hyödyntämispotentiaalin arviointi 31
4.3 Esimerkkikohde 34
4.4 Ahtoilmajäähdyttimen hukkalämmön ominaisuudet 36
4.5 Hyödyntämiskohteet 37
4.6 Laskentamenetelmät 38
5. TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU 41
5.1 Menetelmän soveltaminen ja ratkaisujen kartoitus 41
5.2 Hukkalämmön potentiaalin määritys 45
5.3 Vertailulaskenta ja kytkentöjen keskinäinen vertailu 48
5.4 Menetelmän soveltuvuuden analysointi 53
5.5 Yleinen pohdinta 56
6. YHTEENVETO 57
LÄHTEET 58
LIITTEET 62

KUVALUETTELO

Kuva 1. *Kaaviokuva hukkalämmön hyödyntämisestä lämpönä.* 3
Kuva 2. *Hukkalämmön hyödyntämisen eri tasot. Muokattu lähteestä (Brückner et al., 2015).* 4
Kuva 3. *Hukkalämmön hyödyntämiskohteiden arvojärjestys (Motiva, 2019c, s. 27).* 7
Kuva 4. *Hukkalämmön jaottelu aktiivisiin ja passiivisiin teknologioihin, työssä käsitellyt teknologiat korostettuna. Muokattu lähteestä (Brückner et al., 2015).* 11
Kuva 5. *Mekaanisen lämpöpumpun toimintaperiaate ja rakenne. Muokattu lähteestä (Vuorinen, 2019, s. 41).* 14
Kuva 6. *Absorptiolämpöpumpun rakennekuva. Kylmäaineena toimii ammoniakki (NH_3) ja absorbenttina vesi. Muokattu lähteestä (Dinčer & Kanoğlu, 2010, s. 326)* 15
Kuva 7. *Päivittäisen sähköenergian keskiarvohinta Suomen alueella vuonna 2019. (Nord Pool, 2019)* 24
Kuva 8. *Kuvaus tutkimuksen etenemisestä.* 27
Kuva 9. *Kuvaus menetelmästä.* 28
Kuva 10. *Vuokaavio teknisen tarkastelun etenemisestä.* 30
Kuva 11. *Potentiaalin arvioimisen askeleet.* 31
Kuva 12. *Hukkalämmön lähteen ja kulutuskohteen aika-teho-profiilien yhteensopivuus ja vaikutus hyödynnettävän hukkalämmön määrään.* 32
Kuva 13. *Yksinkertaistettu virtauskaavio moottorien kytkennästä kaukolämpöverkkoon.* 35
Kuva 14. *Kytkentä 1: kaukolämmön paluuveden lämmittäminen kahdella erillisellä moottorikohtaisella lämpöpumpulla. Turbon jäähdyttimeltä tuleva lämpö priimataan lämpöpumpussa ja syötetään kaukolämmön paluuveteen ennen HT-piirin jäähdytintä ja pakokaasukattilaa.* 43
Kuva 15. *Kytkentä 2: kaukolämmön paluuveden esilämmitys yhteisellä lämpöpumpulla.* 43
Kuva 16. *Kytkentä 3: hukkalämmön syöttäminen menoveteen kahdella moottorikohtaisella lämpöpumpulla.* 44
Kuva 17. *Kytkentä 4: hukkalämmön syöttäminen kaukolämmön menoveteen moottoreiden yhteisen lämpöpumpun avulla.* 44
Kuva 18. *Hukkalämmön potentiaalit esimerkkikohteessa.* 47
Kuva 19. *Investoinnin suuruuden vaikutus kytkentöjen takaisinmaksuaikoihin. Punainen ja keltainen katkoviiva kuvaavat kytkentöjen 2 ja 4 takaisinmaksuaikaa, kun lämpöpumpun keskimääräinen kuorma on 50 %.* 52
Kuva 20. *Aikasarjalaskennan kytkennän 2 ja potentiaalin laskennan tulosten vertailua.* 54

LYHENTEET JA MERKINNÄT

alv.	arvonlisävero
CAC	engl. charge air cooler, ahtoilman jäähdytin
CHP	engl. combined heat and power, yhdistetty lämmön- ja sähköntuotanto
COP	engl. coefficent of performance, lämpökerroin
EED	engl. Energy Efficiency Directive (2012/27/EU), Energiatehokkuusdirektiivi
EL	esilämmitys
EU	Euroopan unioni
HLHP	hukkalämmön hyödyntämispotentiaali
HT	engl. high temperature, viitataan moottorin korkean lämpötilan jäähdytyspiiriin
KL	kaukolämpö
LP	lämpöpumppu
LT	engl. low temperature, viitataan moottorin matalan lämpötilan jäähdytyspiiriin
LTO	lämmöntalteenotto
JA	jäännösarvo
NPV	engl. net present value, nettonykyarvo
PCM	engl. phase change material, faasimuutosmateriaali
PK	peittokerroin
PKK	pakokaasukattila
TCM	engl. thermo chemical material, termokemiallinen materiaali
TMA	takaisinmaksuaika

A	annuiteetti	[€]
C	kapasiteetti	[-]
c_p	ominaislämpökapasiteetti	[kJ/kgºC]
E	energia	[J]
f	lämpöpumpun osakuorma	[-]
h	hinta	[€/MWh]
I	investoinnin arvo	[€]
i	laskentakorkokanta	[%]
k	kapasiteettieksponentti	[-]
n	pitoaika	[vuotta]
P	teho	[W]
Q	lämpöenergia, lämpövaraston kapasiteetti	[J]
$\dot{Q}$	lämpöteho	[W]
q	laatu	[-]
S	kustannus tai tuotto	[€]
T	lämpötila	[ºC]
t	aika	[-]
V	tilavuus	[m^3]
W	työ	[J]
η	veden tilavuuden osuus varaston tilavuudesta	[-]
ρ	tiheys	[kg/m^3]

1. JOHDANTO

Energiatehokkuus ja siihen liittyvä hukkalämpö ovat nousseet viime vuosina isoiksi puheenaiheiksi teollisuudessa ja energia-alalla. Euroopan unionin (EU) alueella syntyvän hukkalämmön määrän on arvioitu olevan noin 3140 TWh/a, mikä on noin 43 % alueen primäärienergian kulutuksesta. Suomessa hukkalämpöä syntyy vuosittain noin 76 TWh/a. (Persson, 2015) Arviot ovat kuitenkin hyvin vaihtelevia riippuen laskennan oletuksista.

Hukkalämpö (kutsutaan myös ylijäämälämmöksi) on hyödyntämätöntä lämpöenergiaa, joka jää jäljelle tietyn prosessin käyttämästä primaarienergiasta ja joka ohjataan ympäristöön. Hukkalämpöä esiintyy käytännössä kaikkialla, missä lämpöenergiaa syntyy tai tarvitaan. Valtaosa hukkalämmöstä on matalan lämpötilan hukkalämpöä. (Maaskola & Kataikko, 2014, s. 11) Hyviä esimerkkejä nykyisistä hukkalämmön hyödyntämis-kohteista ovat esimerkiksi poistoilman lämmöntalteenotto (LTO) ja lämmöntalteenotto pesuriteknologian avulla voimalaitoksissa.

Hukkalämmön hyödyntämisen kasvua ajavia voimia ovat muun muassa ilmastonmuutos, talous ja poliittiset ohjauskeinot. Euroopan unionin tasolla vuonna 2012 säädetty energiatehokkuusdirektiivi (2012/27/EU, lyh. EED) vaatii jäsenmaita laatimaan toimintasuunnitelman kolmen vuoden välein ja raportoimaan tilanteen kehittymisestä vuosittain Euroopan komissioille (Motiva, 2019a). Lisäksi Suomessa on tehty kansallisia vapaaehtoisia energiatehokkuussopimuksia useiden eri toimialojen kanssa (Motiva, 2019b). Hukkalämmön hyödyntäminen voi olla taloudellisesti kannattavaa, jolloin toimijan kannattavuus kasvaa.

Hukkalämmön hyödynnettävissä olevaa potentiaalia on vaikea arvioida tarkasti sen monimuotoisuuden ja teknologian kehityksen takia. Teoreettinen potentiaali on kuitenkin merkittävä (Bröckl et al., 2014, s. 13). Esimerkiksi Kilpilahden öljynjalostamon teollisuusalueella hukkalämpöä syntyy 1000 MW teholla, millä voitaisiin teoriassa täyttää neljäsosa pääkaupunkiseudun lämmöntarpeesta (Juvonen, 2020). Gaia Consulting Oy:n selvityksen mukaan suurien kaupunkien kaukolämmön tarpeesta hukkalämmön osuus voisi olla keskimäärin 4 – 6 % luokkaa (Bröckl et al., 2014, s. 14). Vaikka hukkalämmön lähteitä on paljon, niin kaikki eivät ole järkevästi hyödynnettävissä ja niillä voi olla teknisiä rajoitteita.

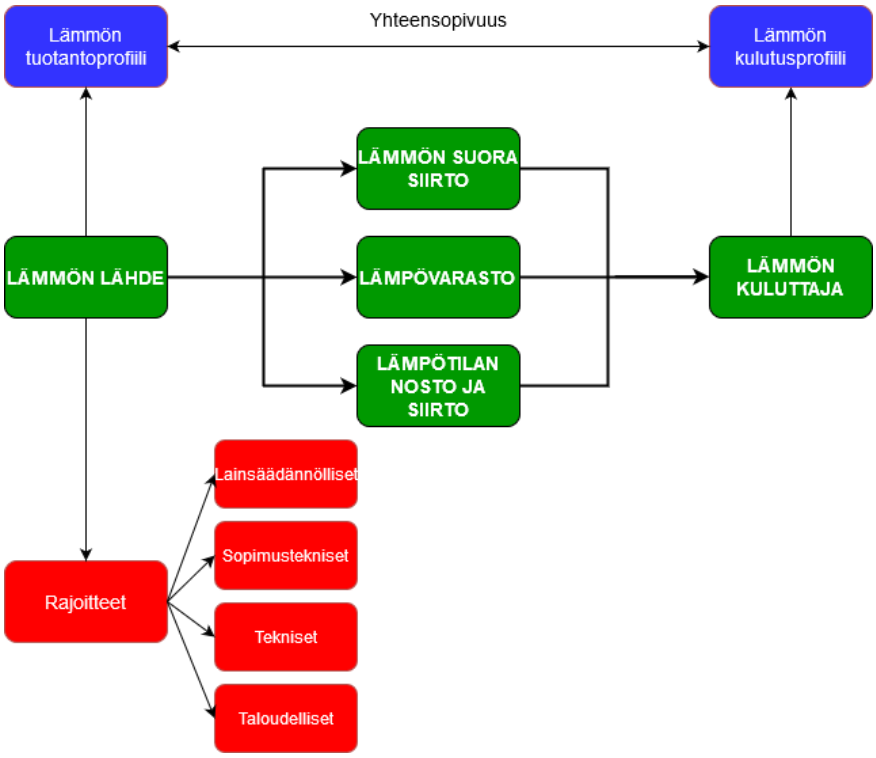
Tässä työssä tarkoituksena on kehittää menetelmä hukkalämpöjen hyödyntämismenetelmien kartoitusta varten. Koska hukkalämpö on usein matalassa lämpötilassa, niin työn pääpaino on matalan lämpötilan hukkalämmön hyödyntämisessä. Työssä ei käsitellä hukkalämmön käyttöä sähköntuotantoon. Työn tutkimuskysymyksiä ovat:

1. Mistä ja minkä laatuisia hukkalämpöjä teollisuudesta syntyy?
2. Millä tavalla hukkalämpöjä voidaan karakterisoida?
3. Millaisella menetelmällä voidaan tunnistaa tarkastellun kohteen hukkalämmön hyödyntämispotentiaali?
4. Mitkä ovat tarkastellussa kohteessa hukkalämpöjen hyödyntämismahdollisuudet ja mikä niistä on taloudellisesti kannattavin?

Hukkalämpöön lähteitä ja niiden hyödyntämistä on käsitelty työn luvussa 2. Teoreettisen taustan pohjalta pohditaan hukkalämmön hyödyntämisen kannattavuuteen vaikuttavia tekijöitä luvussa 3. Luvussa 4 esitellään työssä rakennettu menetelmä hukkalämpölähteiden ja sen hyödyntämisteknologioiden tunnistamiseksi. Menetelmää sovelletaan myös kohteisiin luvussa 5, joiden tulosten pohjilta arvioidaan työssä luodun menetelmän toimivuutta ja tarkastellun kohteen hukkalämpöpotentiaalia. Luku 6 sisältää yhteenvedon, jossa esitetään parannuksia menetelmään.

2. HUKKALÄMMÖN LÄHTEET JA KÄYTTÖ TEOLLISUUDESSA

Tässä kappaleessa esitellään hukkalämmön lähteet, sen hyödyntäjät ja keinot sen hyödyntämiseen. Kuvassa 1 on esitetty kuvaus hukkalämmön hyödyntämisestä ja sen rajoitteista sekä keinoista.



Kuva 1. *Kaaviokuva hukkalämmön hyödyntämisestä lämpönä.*

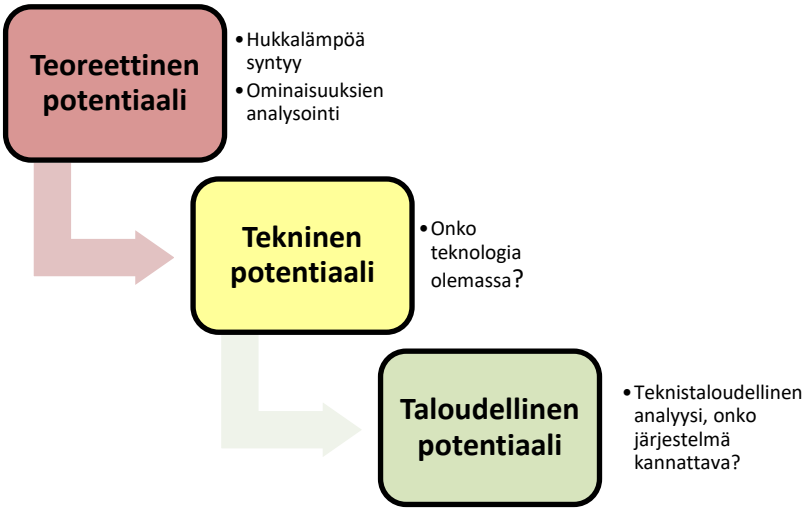
Lämmön lähteen kohdalla on oleellista tietää, kuinka paljon lämpöä (MWh) on saatavilla ja mitkä sen ominaisuudet ovat. Tärkeitä ominaisuuksia ovat muun muassa lämmön lähteen lämpötila, paine ja väliaineen olomuoto. Lämmön lähteellä voi olla rajoitteita. Esimerkki rajoitteesta on savukaasun happokastepiste, joka rajoittaa lämpötilan laskemista. Kuluttajalla on omat vaatimuksensa ja rajoitteet käyttämälleen lämmölle.

Hukkalämmön hyödyntämisen edellytyksenä on sille sopiva kuluttaja. Lämmön kuluttaja voi olla hukkalämpöä tuottava osaprosessi itse, laitoksen kokonaisprosessi tai kuluttaja voi olla prosessin ulkopuolelta. Kokonaisprosessilla viitataan tässä työssä tuotteen koko valmistusprosessiin, joka koostuu osaprosesseista. Osaprosessilla tarkoitetaan tässä työssä tiettyä, selkeästi erotettavissa olevaa kokonaisprosessin osaa. Lämmön kuluttajalle hukkalämmön käyttäminen on kannattavaa, jos sen kustannukset ovat pienemmät

kuin vaihtoehtoisen lämmön kustannukset. Lämmön tuotanto- ja kulutusprofiilien ajallinen yhteensopivuus on myös tarkasteltava.

Lämmön siirtämisessä on lähtökohtaisesti kaksi erilaista tapaa: suora siirto ja lämmön siirto kohottamalla lämpötilaa. Suorassa siirrossa lämpö siirretään esimerkiksi lämmön vaihtimen avulla suoraan kohteelle. Jos lämmön kuluttaja vaatii korkeampaa lämpötilaa kuin lämmön lähteen alkuperäinen lämpötila on, niin silloin lämpötilaa tulee nostaa. Lämpötilan nosto tapahtuu lämpöpumpun avulla. Mikäli tuotanto- ja kulutusprofiilit eivät sovi yhteen riittävän hyvin, apuna erojen tasaamisessa voidaan käyttää lämpövarastoja. Lämmön siirtämistä lähteestä kuluttajalle käsitellään tarkemmin luvussa 2.3.

Kaikki hukkalämpö ei ole aina järkevästi hyödynnettävissä. Hukkalämmön hyödyntämisen analysointia voidaan tehdä kolmessa eri tasossa, jotka on esitetty kuvassa 2.



Kuva 2. *Hukkalämmön hyödyntämisen eri tasot. Muokattu lähteestä (Brückner et al., 2015).*

Kuvan 2 teoreettisella potentiaalilla tarkoitetaan, että prosessissa syntyy hukkalämpöä. Hukkalämmön lähteen ominaisuudet ja rajoitteet tulee analysoida, jotta sen tekninen hyödyntämispotentiaali saadaan selville. Lisäksi hukkalämmölle tarvitaan hyödyntämiskohde. Mikäli hukkalämpö on teknisesti hyödynnettävissä, toteutetaan teknistaloudellinen analyysi. Siinä tutkitaan, onko systeemin toteuttaminen taloudellisesti kannattavaa.

2.1 Hukkalämmön lähteet

Hukkalämmön lähteiden paikallistaminen on oleellinen osa hukkalämmön hyödyntämistä. Lähteiden tunnistamisessa kartoitettava kokonaisprosessi on kannattavaa jakaa tarkastelussa osaprosesseihin, jolloin potentiaaliset hukkalämmön kohteet ovat helpommin havaittavissa. Energiatehokkuuden mittaaminen vaatii riittävät mittalaitteistot. Kartoituksessa tulee kuitenkin tarkastella kaikkia osaprosesseja kokonaisuutena, koska ne

vaikuttavat toisiinsa. (Männistö et al. 1980, s. 17) Samalla voidaan esimerkiksi havaita sisäisiä hyödyntämiskohteita hukkalämmölle.

Suomalainen prosessiteollisuus, kuten metsä-, kemian- ja metalliteollisuus, on merkittävä energian kuluttaja ja potentiaalinen hukkalämmön tuottaja. Taulukossa 1 on esitetty erilaisten toimialojen synnyttämiä hukkalämpöjä.

Taulukko 1. Hukkalämpöjen määriä eri toimialoilla (YIT et al., 2010, s. 46)

Toimiala	**Energian käyttö vuonna 2008 TWh/a**	**Ylijäämälämpö-määrä (TWh/a)**		**Tekninen hyödyntämispo-tentiaali (TWh/a)**	
		alle 55 ºC	**yli 55 ºC**	**alle 55 ºC**	**yli 55 ºC**
Elintarvike	3.3	1.8	0.9	1.7	0.5
Sahatavaran sekä puu- ja korkkituotteiden valmistus (pl. huonekalut); olki- ja punontatuotteiden valmistus	7.3	2.6	1.9	0.9	0.7
Paperin, paperi- ja kartonkituotteiden valmistus	81.3	11.9	6.9	4.1	2.7
Koksin ja öljytuotteiden valmistus	14.3	7.5	4.4	2.5	1.3
Kemikaalien ja kemiallisten tuotteiden valmistus	13.1	2.6	0.4	1.0	0.1
Muiden ei-metallisten mineraalituotteiden valmistus	4.9	-	-	-	0.5
Metallien jalostus	24.4	10.1	3.4	0.9	2.0
Yhteensä	**148.6**	**36.5**	**17.9**	**11.1**	**7.8**

Taulukon 1 mukaan metsäteollisuus tuottaa eniten hukkalämpöä. Muita merkittäviä hukkalämpöä tuottavia aloja ovat öljyteollisuus sekä elintarvikeala. Lämpöpumppujen kehittymisen takia entistä matalamman lämpötilan hukkalämmöt ovat nykyään hyödynnettävissä. Näin ollen teknisen hyödyntämispotentiaalin voidaan olettaa olevan suurempi kuin mitä on esitetty taulukossa 1.

2.1.1 Moottorivoimalaitos

Moottorivoimalaitos tuottaa sähköä pyörittämällä generaattoria mäntämoottorien avulla. Sähköntuotannon hyötysuhde on usein noin 40 % luokkaa. Moottorivoimalaitoksella voidaan myös tuottaa lämpöä. Kaasumoottoreilla kokonaishyötysuhde voi olla jopa 90 %. Polttoöljyllä taas hyötysuhde jää yleensä alle 80 %. Moottorivoimalaitokset soveltuvat siis hyvin CHP-tuotantoon (engl. combined heat and power) eli yhdistettyyn sähkön ja lämmön tuotantoon. (Sadeharju, 2014, s. 25)

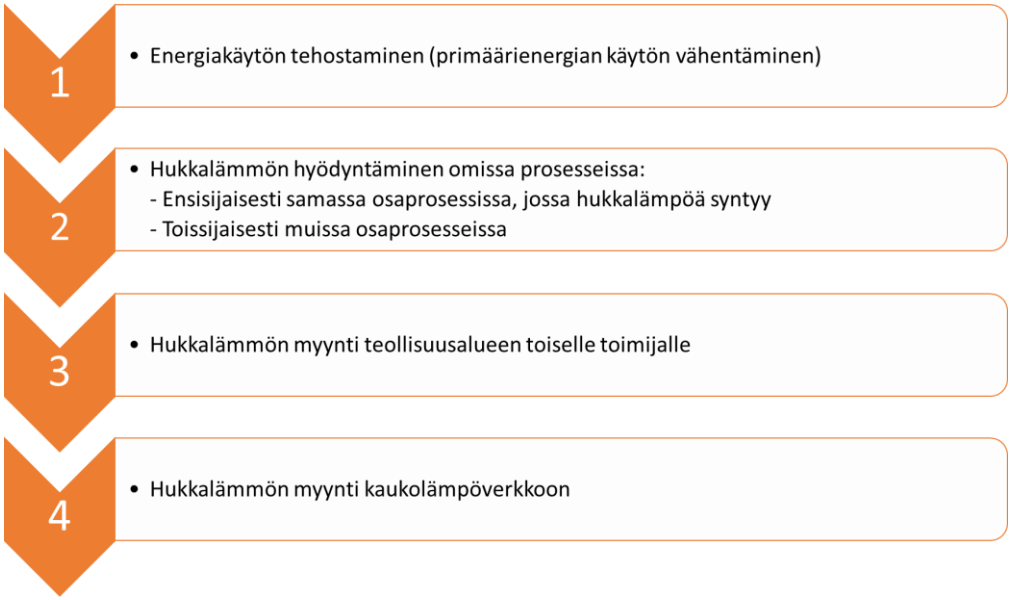
Moottorivoimalaitoksen jäähdytys toteutetaan yleensä kahdella erillisellä jäähdytyspiirillä. HT-piiri (engl. hight temperature circuit) eli kuumapiiri toimii korkeammassa lämpötilassa. HT-piiriin kytketään korkeammassa lämpötilassa toimivia jäähdytettäviä osia. LT-piirin (engl. low temperature circuit) eli kylmäpiirin lämpötila on matalampi kuin HT-piirillä. Piirien rakenne vaihtelee moottorista ja sen valmistajasta riippuen. Yleisiä jäähdytystä vaativia moottorin osia ovat (Sadeharju, 2014, s. 33):

- Turbon ahtoilman jäähdytin eli CAC (engl. charge air cooler) (usein 2 kpl)
- Voiteluöljyn jäähdytin
- Moottorin vaipan jäähdytys

CHP-tuotantoa ajatellen HT-piiri soveltuu paremmin kaukolämmön tuotantoon sen korkeamman lämpötilan takia. Jos kaukolämmön paluulämpötila on riittävän matala, niin LT-piirin lämmöllä voidaan lämmittää kaukolämpöverkon paluuvettä.

2.2 Hukkalämmön hyödyntäminen ja sen käyttökohteet

Hukkalämpöä voidaan hyödyntää sekä *sisäisissä että ulkoisissa prosesseissa*. Sisäisessä kohteessa hukkalämpö kierrätetään takaisin kohteen prosessiin. Mikäli kuluttaja on ulkoinen, hukkalämpö siirretään ulkoiselle kohteelle. Hukkalämmön lähteiden ja kuluttajien valinnassa on huomioitava hukkalämmön *tuotanto- ja kulutusprofiilien yhteensopivuus.* Hyödyntämiskohteiden arvojärjestys on esitetty kuvassa 3 sivulla 7.



Kuva 3. *Hukkalämmön hyödyntämiskohteiden arvojärjestys (Motiva, 2019c, s. 27).*

Arvojärjestyksellä viitataan hyödyntämisjärjestykseen. Hukkalämmön hyödyntämisen energiatekninen hyötysuhde on parempi, kun hukkalämpö käytetään mahdollisimman lähellä sen alkuperäistä lähdettä. Kannattavuus voi kuitenkin poiketa hyötysuhdehierarkiasta. Tässä työssä keskitytään kuvan 3 kohtiin 2-4, joista kohdat 3 ja 4 käsitellään yhdessä ulkoisina prosesseina. Kohtaan 2 viitataan tässä työssä sisäisillä prosesseilla. Hukkalämmön hyödyntämisellä voidaan myös korvata primäärienergian käyttöä, mihin kohdassa 1 viitataan. Työssä ei kuitenkaan huomioida hukkalämmön ulkopuolisia toimia, jotka vähentävät primäärienergian käyttöä, kuten esimerkiksi prosessioptimoinnit.

2.2.1 Hyödyntäminen sisäisissä prosesseissa

Kierrättämällä hukkalämpöä takaisin prosessiin, voidaan prosessin hyötysuhdetta nostaa korvaamalla hukkälämmöllä osa prosessiin tuodusta energiasta. Hukkalämmön tuotanto- ja kulutuskäyrää ajatellen tuotettu hukkalämpö on yleensä tehokkaampaa hyödyntää sisäisessä prosessissa, koska profiilit vastaavat toisiaan paremmin kuin ulkoisissa prosesseissa (Sebbas, 1977, s. 10). Mitä lähempänä hukkalämmön lähdettä kulutuskohde sijaitsee, sitä helpompi siirtoteknologia on toteuttaa ja hyödyntämisteknologian investointikustannukset tyypillisesti pienenevät (Motiva, 2019c, s. 27). Lisäksi, investoija hyödyntää itse hukkalämmön ja saa säästöjä paremman energiatehokkuuden kautta.

Hukkalämmön hyödyntäminen sisäisissä prosesseissa vaatii yksityiskohtaista tarkastelua ja prosessin ymmärtämistä. Jokainen prosessi on omanlaisensa, joten valmista tietoa

hyödyntämiskohteista ei usein ole. Usein matalalämpötilaisilla, mutta energiaintensiivisillä prosesseilla on suurin potentiaali hukkalämmön hyödyntämisessä, koska iso osa korkean lämpötilan hukkalämmöistä on jo kartoitettu.

Haasteita hukkalämmön hyödyntämisessä sisäisissä prosesseissa voivat olla prosessien monimutkaisuus, taloudelliset haasteet, investointikohteiden sisäinen kilpailu yrityksessä sekä tietoisuuden puute. Hukkalämmön hyödyntäminen voi aiheuttaa muutoksia vanhaan prosessiin, mikä laskee rohkeutta investointeihin. Vaikka hukkalämmön hyödyntäminen olisi taloudellisesti järkevää, niin investointien suuruus ja pitkät takaisinmaksuajat voivat vähentää kiinnostusta ratkaisuja kohtaan. Lisäksi, monelle yritykselle hukkalämpö ei kuulu ydintoimintoihin, jolloin investoinnit keskittyvät yleensä muualle. (Motiva, 2019c, s. 28-29)

2.2.2 Hyödyntäminen ulkoisissa prosesseissa

Hukkalämpöä voidaan käyttää lämmitysenergiana ulkoisissa kohteissa. Motivan raportissa (2019c) ulkoiset prosessit on jaettu edelleen kahteen osaan: teollisuusalueen muihin toimijoihin ja kaukolämpöverkkoon (Kuva 3 sivulla 7). Hukkalämmön syöttämisen kaukolämpöverkkoon tulee olla yhteensopiva kaukolämpöyritysten tuotantomuotojen ja laitosrakenteen kanssa. Hukkalämmön hyödyntäminen kaukolämpönä kiinnostaa kaukolämpöyhtiöitä, mikäli se on taloudellisesti järkevää (Bröckl et al., 2014, s. 12).

Teollisuusalueilla on jo nykyään paljon teollisuuskohteita, jotka hyödyntävät toistensa sivuvirtoja esimerkiksi polttoaineena energiantuotannossa. Hukkalämmön hyödyntämisessä on kuitenkin edelleen suuri potentiaali. Teollisuusalueiden energiantuotanto on yleensä keskitettyä, joten hukkalämmön hyödyntäminen voi olla iso muutos. (Motiva, 2019c, s. 29) Esimerkkejä merkittävistä hukkalämpöä tuottavista teollisuusalueista ovat öljynjalostamot ja biotuotetehtaat.

Teollisuusalueella hukkalämpöä voidaan hyödyntää esimerkiksi myymällä se paikalliselle energiayhtiölle kaukolämpönä tai suoraan lähialueen yrityksille lämmitysenergiana. Hukkalämpö voi myös tarjota mahdollisuuksia uusille yritystoimijoille, jotka tarvitsevat lämpöä toiminnoissaan. Ongelmia voivat aiheuttaa hukkalämmön lähteen ja lämmön tarvitsijan erilaiset hukkalämmön tarjonta- ja kysyntäprofiilit. Hukkalämmön lisäksi saatavilla tulisi olla varalämmönlähde, mikäli hukkalämpöä tuottava prosessi pysähtyy. (Motiva, 2019c, s. 29)

Hukkalämmön syöttäminen kaukolämpöverkkoon on yksinkertainen tapa hyödyntää teollisuudessa syntyvää hukkalämpöä. Tähän liittyviä jo kaupallisia ja suosittuja sovelluksia ovat esimerkiksi savukaasupesurit, jotka ottavat lämpöä talteen savukaasuista ja syöttävät sitä kaukolämpöverkkoon.

Hukkalämpöä voidaan syöttää sekä meno- että paluuverkkoon. Menoverkossa lämpötila on korkeampi, mitoitusarvona käytetään usein lämpötilaa 120 ºC. Paluuverkossa lämpötila on yleensä 40 ºC – 60 ºC, joten hukkalämmön syöttäminen paluuveteen on yleensä helpommin toteutettavissa. Paluuveden nostaminen laskee myös kaukolämpöverkossa olevan CHP-voimalaitoksen hyötysuhdetta, koska voimalaitosprosessin lauhdutuslämpötila nousee. (Tiitinen, 2019) Erityisesti CHP-tuotanto rajoittaa ylijäämälämmön hyödyntämistä. Sähkön tuottaminen on usein kannattavampaa kuin sen vähentäminen hukkalämmön kustannuksella. Mikäli kyseessä on pelkkä lämpölaitos, hukkalämmön hyödyntäminen on kannattavaa, jos sen tuotantokustannukset ovat pienemmät kuin lämpölaitoksen tuottamalla lämmöllä. (Bröckl et al., 2014, s. 15-16)

Nykyään kaukolämpöverkon omistaja omistaa usein myös lämpöä verkkoon tuottavat voimalaitokset. Tämä voi rajoittaa kaukolämpöverkon omistajan kiinnostusta tukea verkon käyttäjien investointeja ylijäämälämmön syöttämiseen kaukolämpöverkkoon. Erityisesti ylijäämälämmön syöttäminen paluuverkkoon voi vaikuttaa CHP-voimalaitosten hyötysuhteeseen ja sitä kautta niiden kannattavuuteen, joten verkon ja voimalaitoksen omistaja voi suhtautua kielteisesti näihin ratkaisuihin. Tulevaisuudessa on mahdollista, että kaukolämpöverkon omistajat eriytyvät voimalaitosten omistajista. Sen seurauksena lämmöntuotannon kilpailu voi muuttua luonnollisemmaksi perinteisten voimalaitosten ja kaukolämpöverkon asiakkaiden tuottaman ylijäämälämmön välillä.

Kaukolämpöyhtiöillä on myös lämmön toimitusvelvoite, joten se voi rajoittaa kiinnostusta ylijäämälämpöä kohtaan. Tämän takia ylijäämälämmön tuottajan ja kaukolämpöyhtiöiden on sovittava vastuunjaosta. Luottaminen teollisuuden hukkalämmön tuotantoon voi olla riskialtista seisokkien ja toiminnan loppumisen takia. Riski kasvaa, mitä suuremman osuuden koko verkon tuotannosta yksittäinen hukkalämmön tuottaja syöttää verkkoon. Kaukolämpöyhtiöiden mukaan myös pienimpien hukkalämmön lähteiden hyödyntäminen voi olla haastavaa niiden hallinnoinnin takia (Bröckl et al., 2014, s. 13).

Yksi potentiaalinen ulkoinen kohde on matalalämpötilaverkko, jota voitaisiin hyödyntää esimerkiksi talojen lämmityksessä. Verrattuna perinteiseen kaukolämpöverkkoon, matalalämpötilaverkko sijoittuu usein pienemmälle alueelle ja se hyödyntää lämmityksessään hajautettua tuotantoa. Verkon lämpötila on matalampi, jolloin potentiaalisten hukkalämpölähteiden määrä kasvaa. Samalla myös verkoston lämpöhäviöt pienevät verrattuna

normaaliin kaukolämpöverkkoon. (Schmidt & Kallert, 2017, s. 14-16) Matalalämpötilaverkkoa voidaan hyödyntää myös hybridiverkkona perinteisen kaukolämpöverkon kanssa (Pesola et al., 2011, s. 34).

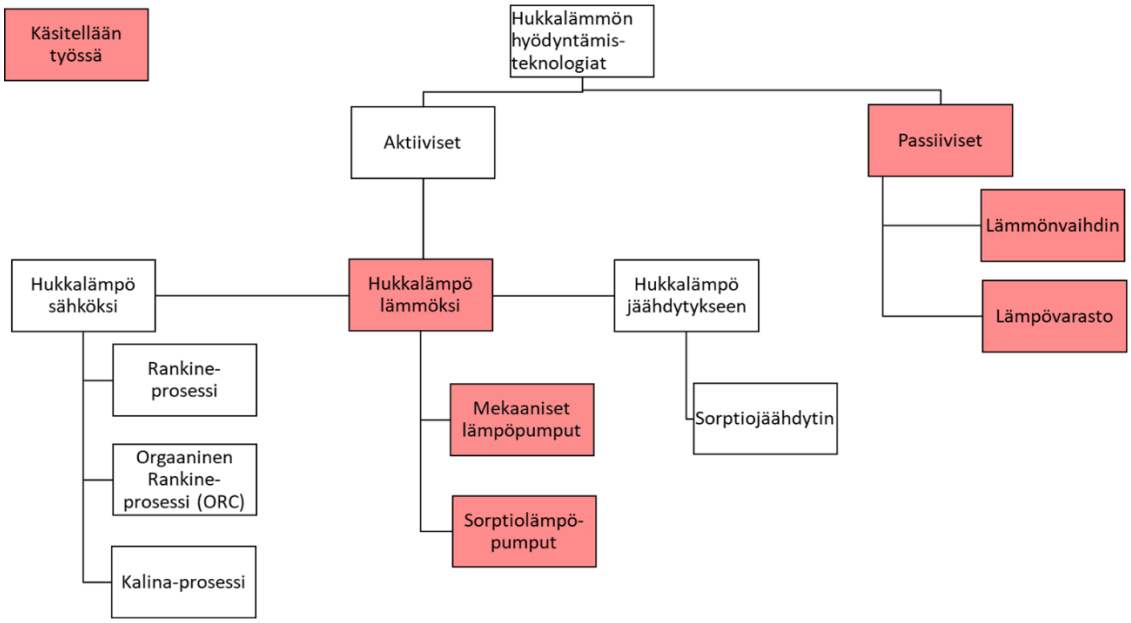
Matalalämpötilaverkon lämpötilan tulee kuitenkin olla yli 65 ºC, koska legionellabakteerit tulee pystyä hävittämään lämpimästä käyttövedestä. Tästä voidaan poiketa, jos käyttövesi priimataan erikseen. Lämpötila voi olla myös matalampi, jos matalalämpöverkkoa ei käytetä käyttöveden lämmityksessä. Tämä tosin lisää kustannuksia huomattavasti. Verkon matalammasta lämpötilasta johtuen tilavuusvirta kasvaa, joten myös pumppausteho kasvaa. Investointikustannukset voivat rajoittaa kiinnostusta erillisen matalan lämpötilan verkkoja kohtaan. (Pesola et al., 2011, s. 34)

Hybridiverkon rakentaminen voi olla potentiaalinen ratkaisu erityisesti uusille kaukolämpökohteille. Alueellinen matalalämpötilaverkko voidaan kytkeä lämmönvaihtimilla korkean lämpötilan verkkoon, kuten on tehty esimerkiksi Turun Skanssin asuinalueella (Lyytikäinen, 2015, s. 73). Hybridiverkoissa ongelmia voi tulla verkkojen yhteensovittamisessa. Lisäksi hukkalämmön tuottajien lämmön tuotannon vaihtelut voivat aiheuttaa häiriöitä lämpöverkoissa. Hybridiverkkoja voidaan mahdollisesti hyödyntää myös teollisuusalueilla.

2.3 Hukkalämmön tuotannon ja lämmöntarpeen yhdistäminen

Sivulla 3 esitetyn kuvan 1 mukaisesti hukkalämpöä voidaan siirtää kahdella eri periaatteella. Suoralla siirrolla hukkalämmön lämpötila on riittävän korkea hyötykäyttöön. Jos lämpötila ei ole riittävän korkea, niin tarvitaan lämpöpumppusysteemi, joka nostaa eli *priimaa* siirrettävän lämmön lämpötilaa. Lisäksi apuna voidaan käyttää lämpövarastoja, jotka tasaavat tuotannon ja kulutuksen keskinäisiä eroja.

Hyödyntämisteknologioita voidaan myös jakaa niiden periaatteiden mukaan. Kuvassa 4 sivulla 11 on esitetty menetelmien jakaminen perustuen aktiivisiin ja passiivisiin teknologioihin. Aktiivisilla teknologioilla tarkoitetaan menetelmiä, joissa hukkalämmön lämpötilaa nostetaan tai se muutetaan toiseen energianmuotoon Passiivisilla menetelmillä hukkalämpö hyödynnetään suoraan ilman energiamuodon muuttamista (Brückner et al., 2015)



Kuva 4. *Hukkalämmön jaottelu aktiivisiin ja passiivisiin teknologioihin, työssä käsitellyt teknologiat korostettuna. Muokattu lähteestä (Brückner et al., 2015).*

Työssä keskitytään hukkalämmön suoraan käyttöön (lämmönvaihdin), lämpövarastointiin sekä lämpöpumppuihin (hukkalämpö lämmöksi). Taulukossa 2 sivulla 12 on esitetty hukkalämmön eri hyödyntämisteknologioiden ominaisuuksia.

Taulukko 2. Hukkalämmön hyödyntämisen menetelmien ominaisuuksia. (Dinčer & Kanoğlu, 2010, s. 330-331; Motiva, 2019c, s. 19-20)

Teknologia	**Hukkalämmön lähteen lämpötila**	**Edut**	**Haitat**
Mekaaninen lämpöpumppu	10 – 100 ºC	+ Kaupallinen teknologia + Matalalämpöisen hukkalämmön tehokas hyödyntäminen + Suhteellisen nopea käynnistys ja osakuormaominaisuudet	- Vaatii riittävän suuren ja tasaisesti hukkalämpöä tuottavan lähteen ja käyttävän kuluttajan - Ylijäämälämmön ja sähkön hinta voivat vaikuttaa kannattavuuteen huomattavasti
Suora käyttö lämmitykseen	~ 40 – 100 ºC	+ Yksinkertaisuus +Investointikustannukset usein alhaiset	- Lämmön laatu ja vaatimukset eivät välttämättä kohtaa
Absorptiolaitteet (lämpöpumput ja jäähdytys)	~ 60 – 200 ºC	+ Laaja säädettävyys + Ylijäämälämmön käyttö myös jäähdytykseen + Yksinkertaisuus, kestävyys ja pienet huoltokustannukset + Alhainen sähkönkulutus + Ei värähtely- ja meluongelmia + Korkea primäärienergian hyötysuhde	- Alhainen COP matalissa lämpötiloissa - Investointikustannus hyötyihin nähden - Lämmönsiirto vaatii isot pinta-alat -Kylmäaineiden myrkyllisyys ja niiden aiheuttama korroosio - Vaatii korkean lämpötilan lähteen - Tietotaidon puute

Valtaosa teollisuuden hukkalämmöstä on matalassa lämpötilassa, joten mekaanisilla lämpöpumpuilla on todennäköisesti suurin tarve hukkalämpöjen hyödyntämisessä.

2.3.1 Suora siirto

Lämmön suora siirto lämmitykseen on yksinkertaisin tapa hyödyntää hukkalämpöä. Hukkalämmön lämpötilatason tulee olla riittävän korkea, jotta suora lämmittäminen on järkevää. Samalla kuluttajakohteen lämpötilatason tulee olla riittävän matala, jotta suora siirto onnistuu. Koska välissä ei ole lämpöpumppua, niin kohteen ja kulutuksen yhteensopivuus saattaa häiriintyä herkemmin priimausvaran puuttumisen takia. Säätövaraa on mahdollista lisätä esimerkiksi lämpövarastolla.

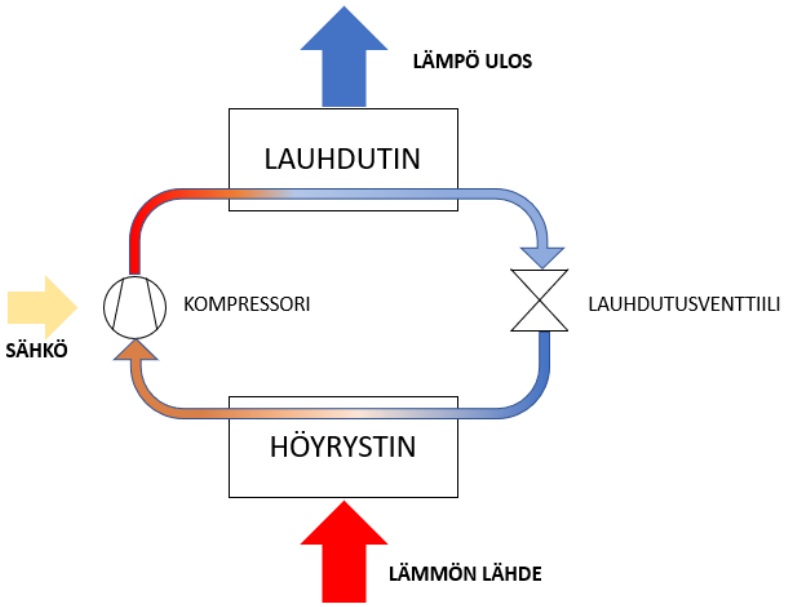
2.3.2 Lämpötilan nosto ja siirto lämpöpumpulla

Lämpöpumppujen perusajatuksena on siirtää lämpöä matalasta lämpötilasta korkeampaan lämpötilaan. Tämän takia lämpöpumppuja voidaan käyttää lämmitysenergian tuottamiseen. Lämpöpumppuja käytetäänkin esimerkiksi asuinrakennusten lämmitysmuotona. Myös suuressa mittakaavassa ja teollisuudessa hyödynnetään lämpöpumppuja. Esimerkiksi Helenin Katri Valan lämpöpumppulaitos tuottaa jopa 105 MW lämpötehoa jäteveden sisältämästä lämmöstä (Helen, 2020b).

Lämpöpumput voidaan jakaa niiden toimintaperiaatteiden mukaan kahteen eri pääryhmään: suljetun ja avoimen kierron lämpöpumppuihin. Yleisempiä lämpöpumppuja ovat suljetun kierron pumput, joten tässä työssä keskitytään ainoastaan niihin. Suljetun kierron pumput voidaan edelleen jakaa *mekaanisiin lämpöpumppuihin* ja *sorptiosysteemeihin.* (Maaskola & Kataikko, 2014, s. 16) Lämpöpumpun suorituskykyä *kuvaa COP-arvo eli lämpökerroin* (engl. Coefficent of Performance). COP-arvolla tarkoitetaan tuotetun lämmön ja tehdyn työn suhdetta:

$$COP = \frac{Q_{output}}{W} = \frac{Q_{output}}{Q_{output} - Q_{input}} \tag{1}$$

missä Q viittaa lämpöenergiaan ja W viittaa lämpöpumpun kuluttamaan sähköenergiaan. Mekaaniset lämpöpumput muodostavat valtaosan kaupallisista lämpöpumppusovelluksista (Dinčer & Kanoğlu, 2010, s. 296). Kuvassa 5 sivulla 14 on esitetty perinteisen mekaanisen lämpöpumpun toimintaperiaate ja rakenne. Kaikkien lämpöpumppujen toimintaperiaate on sama, mutta niiden rakenne voi vaihdella.



Kuva 5. *Mekaanisen lämpöpumpun toimintaperiaate ja rakenne. Muokattu lähteestä (Vuorinen, 2019, s. 41).*

Höyrystimessä lämpöä siirtyy lämpöpumpussa kiertävään kylmäaineeseen, joka höyrystyy. Kompressorissa kylmäaineen lämpötila ja paine nousevat. Lämpötila nousee korkeammaksi kuin lämmön luovutuskohteen lämpötila, jolloin kylmäaine luovuttaa lämpöä lauhduttimessa. Kylmäaine lauhtuu paisutusventtiilin avulla takaisin höyrystimen lähtötilaan. (Vuorinen, 2019, s. 41)

Perinteisillä lämpöpumpuilla kuuman puolen lämpönielun lämpötila on alle 80 ºC (Arpagaus et al., 2018). Kuluttajamarkkinoilla tämä on jo riittävä lämpötila esimerkiksi huoneiden lämmitystä varten, mutta teollisuuden prosesseissa on kysyntää korkeammille lämpötiloille. Markkinoille on saatu jo melko korkeita lämpötiloja tuottavia kuumalämpöpumppuja, jolla voidaan tuottaa jopa 130 ºC lämpötiloja (Harmaala, 2018). 130 ºC on esimerkiksi riittävän korkea lämpötila kaukolämpöverkon menopuolelle, tosin lämmönsiirto voi olla heikkoa kovimpien kuormien aikana pienen lämpötilaeron takia. Lämpöpumpun COP-arvo myös laskee, kun kuumalähteen lämpötila kasvaa (Lähteenaro, 2019, s. 18).

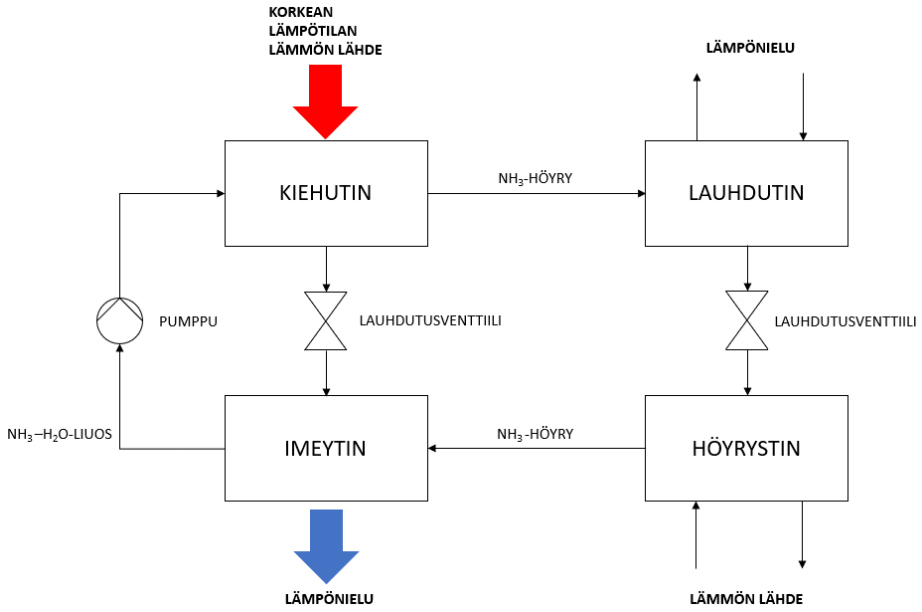
Laboratorio-olosuhteissa on testattu jopa 200 ºC lämpötiloja tuottavia lämpöpumppuja (Arpagaus et al., 2018). Näiden kaupallistumisessa on vielä monia haasteita. Korkean lämpötilan lämpöpumppujen käyttöä teollisuudessa ovat jarruttaneet esimerkiksi tietoisuuden puute, tietotaidon puute prosessi-integroimisen kanssa ja sopivien kylmäaineiden puute. (Arpagaus et al., 2018) Mekaanisten lämpöpumppujen ongelmana on myös heikkenevä hyötysuhde osakuormituksen laskiessa. Nykyteknologian kehitys on kuiten-

kin parantunut tätä ongelmaa. Riippuen lämpöpumpun säätötekniikasta, ajaminen osakuormilla voi olla jopa hyötysuhteeltaan parempaa kuin täydellä kuormalla. (Fahlén, 2012)

Sorptiojärjestelmät voidaan edelleen jakaa alakategorioihin ja lähes kaikki nykyiset kaupalliset lämpöpumppusovellukset lukeutuvat *absorptiolämpöpumppuihin* (Dinčer & Kanoğlu, 2010, s. 276, 324). Absorptiolaitteita käytetään jäähdytyslaitteistona, mutta niillä on myös potentiaalia lämmityssovelluksissa (Maaskola & Kataikko, 2014, s. 18).

Absorptiolämpöpumppujen isoin eroavaisuus mekaanisiin lämpöpumppuihin on siinä, että käyttöenergiana käytetään lämmönlähdettä sähkön sijasta. Absorptiolämpöpumpulla ainoat sähkönkuluttajat ovat aineiden kiertopumput. Lähistöllä on kuitenkin oltava riittävän edullinen korkean lämpötilan lähde, kuten esimerkiksi höyry tai savukaasu. Absorptiolämpöpumppu soveltuu erityisen hyvin kohteisiin, jossa vaaditaan sekä lämmitysenergiaa että jäähdytystä. (Dinčer & Kanoğlu, 2010, 324 - 326; Motiva, 2019c, s. 23)

Absorptiolämpöpumpussa mekaanisen kompressorin paikalla on imeytin-pumppu-kiehutin-systeemi. Toinen eroavaisuus on kiertoaineessa. Absorptiolämpöpumpussa kiertoaineena toimii absorbentti-kylmäaine-seos. Kaksi yleisintä seosta ovat ammoniakki-vesi- ja vesi-LiBr-seokset. (Dinčer & Kanoğlu, 2010, s. 324 - 326) Absorptiolämpöpumpun rakenne on esitetty kuvassa 6.



Kuva 6. *Absorptiolämpöpumpun rakennekuva. Kylmäaineena toimii ammoniakki (NH_3) ja absorbenttina vesi. Muokattu lähteestä (Dinčer & Kanoğlu, 2010, s. 326)*

Absorptiolämpöpumpussa höyrystin ja lauhdutin toimivat samalla tavalla kuin mekaanisessa kompressorissa. Höyrystimessä tuodaan ulkoista lämpöenergiaa matalapaineiseen ja matalassa lämpötilassa olevaan kylmäaineeseen, jolloin kylmäaine höyrystyy.

Imeyttimessä höyrystynyt kylmäaine imeytyy absorbenttiin, jolloin ne muodostavat seosliuoksen. Samalla reaktio tuottaa lämpöä. Liuos pumpataan korkeaan paineeseen, josta liuos etenee kiehuttimelle. Kiehuttimessa lämpöä tuodaan korkean lämpötilan lämpövarastosta. Lämpövarastona voi toimia höyry tai esimerkiksi kaasupoltin. Kiehuttimessa kylmäaine höyrystyy jälleen ja se eroaa absorbentista. Absorbentti siirtyy imeyttimelle lauhdutusventtiilin kautta. Höyrystynyt kylmäaine jatkaa matkaansa lauhduttimelle, jossa se luovuttaa lämpöä. Jäähtynyt kylmäaine palaa höyrystimelle lauhdutusventtiilin kautta. (Dinčer & Kanoğlu, 2010, s. 326)

Lämpöpumput omaavat suuren potentiaalin teollisuuden hukkalämmön hyödyntämisessä, koska niillä pystytään priimaamaan lämpövirtoja korkeammille lämpötilatasoille, jolloin hyödyntämiskohteiden määrät kasvavat. Mekaaniset lämpöpumput ovat jo kaupallista teknologiaa, joten niiden osalta kaupallistumisen esteet ovat jo ylitettyjä.

2.3.3 Lämmön varastointi

Hukkalämpöjen hyödyntämisessä haasteeksi voi tulla ajallisen tuotannon ja kysynnän yhteensopivuus. Lämmön varastointi voi helpottaa näiden yhteensopivuuden parantamisessa. Yksinkertainen ja yleisin tapa lämmön varastointiin on vesi (Cabeza, 2012, s. 216). Esimerkiksi Helen Oy on rakentamassa 11,6 GWh luolalämpövarastoa, jossa lämpöä varastoidaan kuumaan veteen ja sitä voidaan siirtää kaukolämpöverkkoon (Galkin-Aalto, 2018).

Varastoinnissa huomioitavia tärkeimpiä ominaisuuksia ovat varastokapasiteetti, lataus- ja purkuteho, varastoinnin lämpötila sekä varastoitava aika. Hukkalämmölle sopivat parhaiten keskipitkän tai pitkän varastointiajan lämpövarastot. Keskipitkällä varastointiajalla tarkoitetaan vuorokausien mittaisia ajanjaksoja. Pitkän aikajakson varastoinnilla tarkoitetaan lämmön varastointia viikoista kuukausien mittaisella jaksolla. Lyhyen aikavälin varastoinnilla tarkoitetaan vuorokausitason vaihtelun tasaamista varaston avulla. (Alanen et al., 2003, s. 12-40) Lämpövarastot voidaan jakaa periaatteensa mukaan kolmeen (3) eri ryhmään (Cabeza, 2012):

1. Tuntuvan lämmön varastot
2. Faasimuutosvarastot (lyh. PCM-varasto, engl. phase change materials)
3. Termokemialliset varastot (lyh. TCM-varasto, engl. thermo chemical materials)

Tuntuvan lämmön varastointi on yleisin menetelmä ja se perustuu varastoitavan aineen lämpökapasiteettiin ja lämpötilan muutokseen. Varastointimateriaalina voidaan käyttää useita erilaisia vaihtoehtoja, kuten vettä, ilmaa tai talojen rakenteita. (Alva et al., 2018) Varastointiajat voivat vaihdella päivistä jopa vuoteen. Vaikka tuntuvan lämmön varastot

ovat yleisin menetelmä, niin kaupallisella valmiusasteella on lähinnä veteen perustuvia varastoja. (IEA-ETSAP & IRENA, 2013) Tuntuvan lämmön varaston mitoitus riippuu sen käyttötarkoituksesta. Esimerkiksi kausivarastointi vaatii erilaisen kapasiteetin kuin päivätason varastointiin tarkoitettu lämpövarasto. Mitoitukselle on siis haastavaa antaa yleispätevää sääntöä. Kaukolämmön käsikirjassa (Koskelainen et al., 2006) on annettu yleisenä ohjeena kaukolämpöakun purkutehoksi 10 – 15 % kaukolämpöverkon maksimitehosta ja varaston kapasiteetin tulisi riittää 2 – 4 tunniksi huipputeholla (Karhu, 2010). Lämpövaraston tilavuus voidaan laskea varaston kapasiteetin ja varaston lataus- ja purkulämpötilojen perusteella:

$$V = \frac{Q_{akku}}{\eta \rho C_p \Delta T} \tag{2}$$

missä V on akun tilavuus, Q_{akku} = akun kapasiteetti [kJ], η = veden osuus varaston tilavuudesta (oletus 94 %), ρ = veden tiheys, c_p = ominaislämpökapasiteetti (vedelle 4.2 kJ/kgºC) ja ΔT = varastoon tulevan ja poistuvan veden lämpötilojen ero.

Faasimuutosvarastot perustuvat olomuodon muutokseen. Yleensä lämpöä varastoidaan sulamislämpöön, koska aineen höyrystyminen aiheuttaisi tilavuuden suuren muutoksen (Alva et al., 2018). Faasimuutosvarastojen varastointiaika on yleensä tunneista viikkoihin (IEA-ETSAP & IRENA, 2013).

Termokemiallinen varastointi on edellisiin verrattuna kallista ja sen soveltaminen ei ole vielä kaupallisella asteella. TCM-varastointi perustuu reversiibelien reaktioiden sitomaan ja vapauttamaan lämpöön. Latausvaiheessa lämpö sitoutuu varastointimateriaaleihin ja purkautuessa reaktio on päinvastainen eli lämpöä vapautuu ympäristöön. (Alanen et al., 2003, s. 16; Alva et al., 2018) Termokemiallisten varastojen varastointiaika on tunneista päiviin (IEA-ETSAP & IRENA, 2013). Tosin Alva et al. (2018) mukaan termokemialliset varastot sopivat pitkään varastointiin olemattomien lämpöhäviöiden takia. Taulukossa 3 sivulla 18 on esitetty jokaisen lämmönvarastointitekniikan vahvuudet ja heikkoudet.

Taulukko 3. Eri varastotyyppien vahvuudet ja heikkoudet (Alva et al., 2018; IEA-ETSAP & IRENA, 2013; Sarbu & Sebarchievici, 2018)

Varastointityyppi	Vahvuudet	Heikkoudet
Tuntuva lämpö	+ Materiaalien edullisuus + Yksinkertaisuus + Stabiilius korkeissa lämpötiloissa + Veteen perustuva varastointi kaupallista teknologiaa	- Lämpötilan muutos varaston latautumisen tai purkautumisen aikana - Lämpöhäviöt korkeassa lämpötilassa - Pienempi energiatiheys kuin faasimuutokseen perustuvissa varastoissa ja tämän takia suuremmat tilavaatimukset
Faasimuutos	+ Suurempi energiatiheys kuin tuntuvan lämmön varastoissa, jolloin pienemmät tilavaatimukset + Lämpötilan pysyminen vakiona + Yleensä myrkytön varastointimateriaali	- Heikko lämmönjohtavuus - Materiaalikohtaisia heikkouksia - Kaupallisen asteen sovelluksia huomattavasti vähemmän kuin tuntuvan lämmön varastoilla
Termokemiallinen	+ Suurin energiatiheys + Pienet lämpöhäviöt	- Ei kaupallisella asteella - Materiaalien häiriöt reaktioissa

Lämpövarastojen kaupallistumisessa on vielä isoja haasteita, joista merkittävimmät ovat teknologian valmiusaste sekä taloudellinen kannattavuus (Miró et al., 2016) Lämpövarastojen kustannukset syntyvät pääasiassa perushankintakustannuksista (Alva et al., 2018). Suuret alkuinvestoinnit sitovat rahaa pitkäksi aikaa, joten tuoton tulisi olla varmaa rahoituspäätöstä tehdessä.

Lämpövarastoilla on paljon hyviä ominaisuuksia ja potentiaalia hukkalämmön hyödyntämisessä. Niiden varastointikapasiteettia voidaan muuttaa helposti, varastoja on monelle eri lämpötilatasolle, ja varastoja voidaan tehdä niin kausi- kuin päivätason varastointia varten. Lisäksi, niissä käytettävät varastointimateriaalit ovat yleensä myrkyttömiä, joten ne ovat usein ympäristöystävällinen ratkaisu (Alva et al., 2018). Laajamittainen kaupallistuminen vaatii kuitenkin kehittymistä niin teknologisella kuin taloudellisella puolella.

2.4 Hukkalämmön tekniseen hyödynnettävyyteen vaikuttavat tekijät

Hukkalämmön hyödyntämiseen vaikuttavat tekijät voivat olla esimerkiksi teknisiä, taloudellisia tai lainsäädännöllisiä. Tässä luvussa keskitytään lähinnä teknisiin rajoitteisiin.

Hukkalämmön hyödyntämisen potentiaali on suurinta, kun tuotanto on tasaista ja ennustettavaa suhteessa kysyntään. Mitä vaihtelevampaa ja vaikeasti ennustettavissa (suhteessa kysyntään) hukkalämmön tuotanto on, sitä hankalampaa sen hyödyntäminen on. Varastoinnin ja lämmön varalähteiden määrät kasvavat, kun hukkalämmön tuotannon epävarmuus kasvaa. Mikäli hukkalämpöä syntyy satunnaisesti ja tuotannon suuruusluokkaa ei pystytä arvioimaan, sitä ei oletettavasti ole kannattavaa hyödyntää pääsääntöisenä lämpölähteenä. Sekä hukkalämmön talteenoton että varalla olevan lämmöntuotannon kustannukset nousevat todennäköisesti liian suuriksi, jotta ratkaisu olisi kannattava.

Merkittävimmät rajoitteet liittyvät sopivaan lämpötilatasoon, lämmön saatavuuden varmuuteen ja sen ajalliseen sopivuuteen kulutukseen verrattuna (Bröckl et al., 2014, s. 17). Hukkalämpöä ei välttämättä synny tasaisesti ja teollisuusprosessit voivat häiriintyä, jolloin niiden hukkalämmön tuotanto voi keskeytyä. Hukkalämpö voi vaatia näissä tapauksissa varalämmönlähteen, mikä aiheuttaa lisää kustannuksia ja voi tehdä hukkalämmön hyödyntämistä kannattamatonta. Mikäli hukkalämpö hyödynnetään samassa prosessissa, niiden ajallinen yhteensopivuus yleensä paranee ja hukkalämmön tuotannon häiriötilanteen riski pienenee. Lämmön varastointi voi myös parantaa ajallista yhteensopivuutta ja hukkalämmön toimitusvarmuutta. Ajallisen yhteensopivuuden lisäksi tulee tarkastella syntyvän hukkalämmön teho- ja lämpötilatason sopivuutta kuluttajan vaatimuksiin nähden.

Hukkalämmön lähteessä on oleellista missä kohdissa lämpöä syntyy. Hukkalämpöä voi syntyä pienempiä määriä prosessin monessa eri kohdassa tai sitä voi syntyä keskitetysti suurempia määriä muutamassa eri kohdassa. Investointikustannukset ovat tyypillisesti pienemmät jälkimmäisessä vaihtoehdossa, koska lämmöntalteenottoa ei tarvita monessa eri kohdassa. Syntyvän hukkalämmön lämpötilatasot voivat olla myös erilaisia prosessin eri osissa. Eri lämpötilatasot voivat vaatia erilaisia ratkaisuja hukkalämmön hyödyntämiselle, mikä voi myös nostaa investointikustannuksia.

2.4.1 Rajoittavat tekijät

Savukaasujen ja prosessivesien kohdalla haasteita voivat aiheuttaa kemialliset koostumukset, jotka voivat aiheuttaa korroosiota lämmönvaihtimissa ja putkistoissa (Bröckl et

al., 2014, s. 16). Lämmönvaihtimet voivat myös tukkeutua likapartikkelien takia (Shah & Sekulić, 2003, s. 29). Savukaasuissa tulee huomioida erityisesti rikin happokastepiste. Happokastepisteellä tarkoitetaan lämpötilapistettä, jossa savukaasun sisältämä rikkihappo alkaa tiivistymään nesteeksi. Tyypillisesti kastepisteen arvo on alle 200 ºC (Ympäristöministeriö, 2012, s. 19). Mitä suurempi savukaasun rikkihappopitoisuus on, sitä korkeampi sen kastepiste on (Huijbregts & Leferink, 2004). Rikkihapon tiivistymisen seurauksena pintojen korroosio kasvaa. Korroosion estämiseksi savukaasujen lämpötilan on pysyttävä riittävän korkealla. Happokastepistettä voidaan laskea vähentämällä polttoaineen rikki- tai kosteuspitoisuutta (Tornberg, 2015, s. 115). Rikkihappoa voidaan myös poistaa savukaasun käsittelyssä. Rikkihapon lisäksi myös muilla aineilla on omia happokastepisteitä (Huijbregts & Leferink, 2004).

Hyödyntämisteknologioiden tilavaatimukset voivat olla myös rajoittavia tekijöitä. Esimerkiksi Katri Valan lämpöpumppulaitoksen uusin lämpöpumppu on 22.5 metriä pitkä, korkeudeltaan 7 metriä ja leveydeltään 11 metriä (Helen, 2020a).

3. HUKKALÄMMÖN TALOUDELLINEN KANNATTAVUUS

Merkittävä osuus hukkalämmön hyödyntämisen kustannuksista riippuu perusinvestointikustannuksista. Lämpöpumppujen kohdalla myös sähkön hinta vaikuttaa sen käyttökustannuksiin. Kustannusten lisäksi kannattavuutta analysoidessa tulee tarkastella tuotetusta lämmöstä saadut tulot. Hukkalämmön hyödyntämisen kustannuksia voidaan myös vertailla vaihtoehtoiseen lämmöntuotantotapaan. Vertailua voidaan tehdä esimerkiksi kaukolämpölaitoksen tuotantokustannuksiin tai säästetyn primääripolttoaineen arvoon.

3.1 Investointikustannukset ja taloudellisen kannattavuuden arviointi

Investointien kannattavuuden analysointiin on monia erilaisia menetelmiä, joista yleisempiä on esitelty tässä kappaleessa. Menetelmän valinta on riippuvainen tilanteesta ja menetelmiä kannattaa käyttää rinnakkain kannattavuuden analysoinnissa.

Eri teknologioiden tyypillisiä kustannuksia on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4. Hyödyntämisteknologioiden tyypillisiä investointikustannuksia. Tehot ja energiat viittaavat lämpöön.

Hyödyntämisteknologia	Investointikustannus	Lähde
Mekaaninen lämpöpumppu	150 000 – 350 000 €/MW 470 000 – 730 000 €/MW	Raiko & Mäki-Mantila [2005] Maaskola & Kataikko (2014)
Absorptiolämpöpumppu	72 000 – 102 000 €/MW	Maaskola & Kataikko (2014)
Lämpövarastot		
Tuntuva lämpö (vesi)	5 – 5.5 €/kWh 55 000 €/MW	(Karhu, 2010, s. 81-82)
Faasimuutos	10 – 50 €/kWh	IEA-ETSAP & IRENA (2013)
Termokemiallinen	8 – 100 €/kWh	IEA-ETSAP & IRENA (2013)

Suorassa siirrossa tarvittavaa lämmönvaihdinta ei ole esitetty taulukossa 4, koska sen investointikustannukset riippuvat monesta eri tekijästä. Lämmönvaihtimella investointikustannukset kasvavat lämmönsiirtopinta-alan kasvaessa. Tarvittava lämmönsiirtopinta-ala kasvaa, kun virtausten välinen lämpötilaero pienenee. Lisäksi myös esimerkiksi väliaineet vaikuttavat lämmönsiirtokertoimeen ja sitä kautta lämmönsiirtopinta-alaan. Lämmönvaihtimen tyyppi riippuu sovelluskohteesta, joten yleistä investointikustannusta suhteessa lämpötehoon on hyvin vaikeaa arvioida.

Lämpöpumppuinvestoinneille on myös haastavaa antaa yleisiä investointikustannusten suuruuksia, koska ratkaisut ovat tapauskohtaisia ja vaativat erilaisia ratkaisuja. Esimerkiksi Raiko & Mäki-Mantila [2005] arvioivat investointikustannusten vaihtelevat välillä 150 000 – 350 000 €/MW_{th}. (Luoranen, 2017, s. 47) Maaskola & Kataikko (2014, s. 64) arvioivat lämpöpumppujärjestelmien kustannuksiksi 470 000 – 730 000 €/MW_{th}.

Tuntuvan lämmön varastoilla investointikustannukseen vaikuttaa erityisesti eristyskustannukset. Esimerkiksi Saksassa tuntuvan lämmön varastojen investointikustannukset ovat 0.5 – 3.0 €/kWh. Tämän takia taulukossa 4 on keskitytty investointikustannuksiin Suomen olosuhteissa tuntuvan lämmön varaston kohdalla. Muita tuntuvan lämmön varaston investointikustannuksiin vaikuttavia tekijöitä ovat varastointiaika, lämpötila ja purkuteho. (IEA-ETSAP & IRENA, 2013) Varaston investoinnin suuruutta voidaan arvioida sen energiakapasiteetin ja tilavuuden perusteella. Lämpövaraston tilavuus voidaan laskea kaavalla (2). Varaston kapasiteettiin perustuvassa investointikustannusten arvioinnissa ongelmaksi voi tulla varaston fyysisen koon huomioimatta jättäminen. Varaston eristyskustannukset ovat merkittävä osuus investoinnin suuruudesta ja ne kasvavat varaston koon kasvaessa. Erityisesti hukkalämmön tapauksessa varaston lämpötilatasot voivat olla matalammat kuin perinteisissä kaukolämpöverkon varastoissa, jolloin varaston tilavuusvaatimus kasvaa kaavan (2) mukaan.

Investointien suuruutta karkealla tasolla voidaan arvioida *kapasiteettieksponenttimenetelmällä*. Kapasiteettieksponenttimenetelmässä uuden laitoksen investointikustannuksia verrataan aiemman laitoksen kokoon ja sen investointikustannuksiin. Uuden laitoksen investointikustannus voidaan laskea kaavan avulla:

$$I_{\text{uusi laitos}} = I_{tunnettu\ laitos} \cdot \left(\frac{C_{uusi\ laitos}}{C_{tunnettu\ laitos}}\right)^{k} \tag{3}$$

missä I viittaa investointikustannuksiin, C viittaa kapasiteettiin ja k tarkoittaa kapasiteettieksponenttia. Kapasiteettieksponentin arvoja on esitetty kirjallisuudessa ja yleisesti käytetty arvo on $k = 0.7$. (Suomala et al., 2011, s. 166-167)

Annuiteettimenetelmässä eli tasaerämenetelmässä investointi jaetaan saman suuruisiksi eriksi pitoajan ajaksi. Erissä huomioidaan sekä poisto että korko. Annuiteetin suuruus lasketaan annuiteettitekijän avulla. Annuiteettitekijä lasketaan kaavalla

$$annuiteettitekij\text{ä} = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \tag{4}$$

missä i on korko ja n on pitoaika. Erän annuiteetti lasketaan kertomalla investoinnin suuruus annuiteettitekijällä. Investointi on kannattava, mikäli vuosittainen tuotto on suurempi kuin annuiteetin suuruus. (Neilimo & Uusi-Rauva, 1999, s. 214)

Takaisinmaksuajalla tarkoitetaan sitä aikaa, jolloin laitteiston käytön kumuloituvat säästöt ovat yhtä suuret kuin laitteiston investointikustannukset. Yksinkertaisimmillaan se takaisinmaksuaika voidaan laskea korottomana. Takaisinmaksuaika voidaan myös laskea nettonykyarvon avulla, jolloin rahan aika-arvo otetaan huomioon (niin sanottu korollinen takaisinmaksuaika). (Götze et al., 2008, s. 44, 76) Takaisinmaksuaika ei huomioi sen jälkeisiä tapahtumia, joten se ei varsinaisesti osoita investoinnin kannattavuusvaikutuksia. Yksinkertaisuuden vuoksi se on kuitenkin yksi yritysten suosituimmista taloudellisista menetelmistä investointien kannattavuuden arvioinnissa. (Neilimo & Uusi-Rauva, 1999, s. 216-218)

Sisäisen korkokannan menetelmässä tutkitaan, millä korkokannalla investoinnin nettonykyarvo on nolla. Mikäli sisäinen korkokanta on pienempi kuin tuottovaatimusprosentti, investointi on kannattava. Sisäisen korkokannan menetelmä on takaisinmaksuajan kanssa suosituimpia investoinnin arviointimenetelmiä. Niitä käytetään rinnakkain, koska, sisäinen korkokanta korostaa investoinnin kannattavuutta ja takaisinmaksuajan menetelmä rahoitusvaikutuksia. (Neilimo & Uusi-Rauva, 1999, s. 215 - 218)

Nettonykyarvoa (*NPV*, engl. Net Present Value) laskettaessa tulevien vuosien tuotot ja kustannukset diskontataan nykyhetkeen. Nettonykyarvo kuvaa investoinnin elinkaaren taloudellista tulosta. (Götze et al., 2008, s. 54-56) Nettonykyarvo lasketaan:

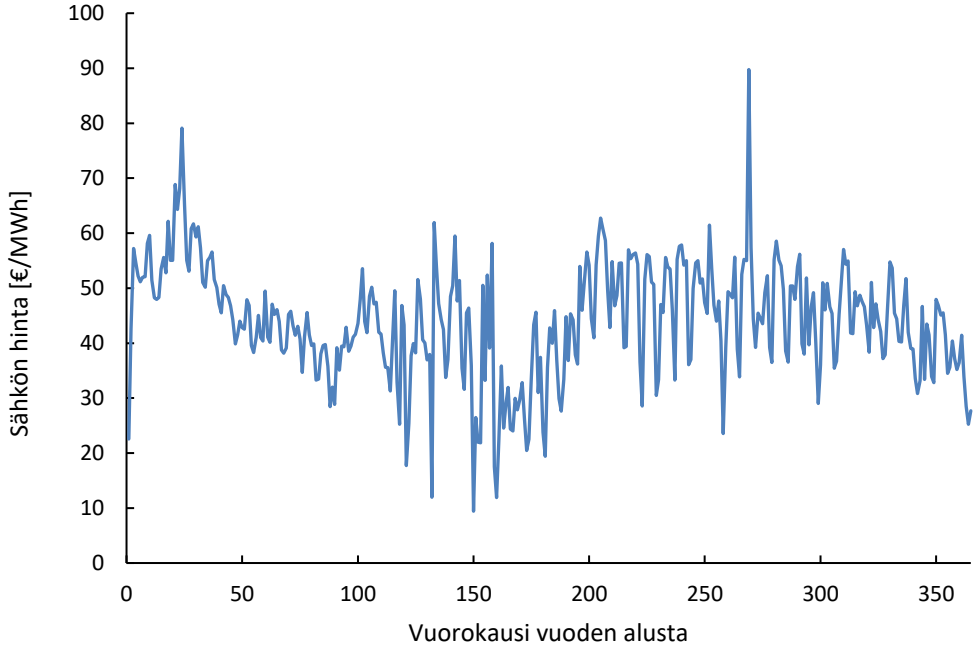
$$\mathrm{NPV} = \sum_{t=1}^{n} \frac{S_t}{(1+i)^t} + \frac{JA_n}{(1+i)^n} - I_0 \qquad (5)$$

missä S_t on investoinnin vuotuinen nettotuotto vuotena t, i on laskentakorkokanta, JA_n on investoinnin jäännösarvo n. ajanjakson jälkeen ja I_0 on alkuperäinen investointikustannus.

Jokaisella edellä esitetyllä tunnusluvulla on omat hyvät ja huonot ominaisuudet. Investointipäätöstä tehdessä kannattaa huomioda useampi kuin yksi tunnusluku ja analysoida niihin vaikuttavat tekijät.

3.2 Sähkön, lämmön ja polttoaineiden hinnat

Sähkön hinta vaikuttaa lämpöpumpun käyttökustannuksiin. Sähkön hinta muodostuu *sähköenergiasta*, *sähkön siirrosta* sekä *sähköverosta*. Keskisuuren teollisuuden (sähkön kulutus 2000 – 19 999 MWh/a) sähkön kokonaishinta 2010-luvulla on ollut noin 80 €/MWh. (Tilastokeskus & Energiavirasto, 2020) Kuvassa 7 sivulla 24 on esitetty sähköenergian hintakuvaaja vuonna 2019.



Kuva 7. *Päivittäisen sähköenergian keskiarvohinta Suomen alueella vuonna 2019. (Nord Pool, 2019)*

Sähkön hinta vaihtelee tuntikohtaisesti. Tyypillisesti talvisin sähkön hinta on korkeampi kuin kesällä. Lisäksi öisin sähkön kysyntä on matalampaa kuin päivällä, joten sähkön hinta on öisin halvempi kuin päivällä. Vuoden 2019 sähköenergian keskihinta oli noin 44 €/MWh. (Nord Pool, 2019)

Sähkön siirron kustannukset riippuvat maantieteellisestä sijainnista sekä kuluttajatyypistä. Sähköverot maksetaan yleensä niiden yhteydessä. Vuonna 2019 teollisuuden sähkön siirtohinta oli keskimäärin noin 33.60 €/MWh sisältäen arvonlisäveron (alv. 24 %) (Energiavirasto, 2019).

Suomessa sähköveron luokalla on merkittävä vaikutus sähkön kokonaishintaan. Sähkövero koostuu energiaverosta sekä huoltovarmuusmaksusta (0.13 €/MWh). Sähköveroluokka II on tarkoitettu teollisuutta varten ja sen nykyinen sähkön verotushinta on 7.03 €/MWh. Muut sähkönkuluttajat kuuluvat veroluokkaan I, jonka vero on 22.53 €/MWh. (Verohallinto, 2019b) Näiden lisäksi sähköstä ja sähköverosta maksetaan arvonlisäveroa (alv. 24 %). CHP-voimalaitoksen toimintaan integroidun lämpöpumpun kuluttama sähkö on verotonta omakäyttösähköä. Muissa tapauksissa lämpöpumppujen kuluttaman sähkön veroluokka muodostuu lämpöpumpun tuottaman lämmön käyttökohteen perusteella. Jos lämpö kulutetaan teollisuudessa, niin sähkö kuuluu veroluokkaan II. Muissa tapauksissa lämpöpumpun veroluokaksi määräytyy veroluokka I. (Verohallinto, 2019a) Näin ollen esimerkiksi lämpöä kaukolämpöverkkoon syöttävät lämpöpumput kuuluvat sähkön veroluokkaan I.

Hallitusohjelman (2019) tavoitteena on siirtää kaukolämpöä tuottavat lämpöpumput sähköveron luokkaan II. Lisäksi kyseisen luokan verotusta on tarkoitus alentaa kohti EU:n minimitasoa (Valtioneuvosto, 2019, s. 24). EU:n neuvoston energiaverodirektiivin 2003/96 määrittelemä minimivero on 0.5 €/MWh. Veroluokan muuttaminen voi nostaa merkittävästi lämpöpumppujen kannattavuutta kaukolämpötuotannossa.

Mikäli lämpöpumpulla tuotettua lämpöä hyödynnetään toiminnallisesti CHP-voimalaitoksessa, niiden tuottama lämpö lasketaan osaksi koko voimalaitoksen hyötylämpöä (Verohallinto, 2019a). Se voi laskea lämpöpumpun kannattavuutta, koska lämpöpumpun tuottamaa lämpöä verotetaan voimalaitoksen käyttämän pääpolttoaineen mukaan.

Kaukolämmön myyntihinta vaihtelee alueellisesti. Kaukolämmön hinta riippuu kuluttajatyypistä. Kuluttajatyypit voivat olla esimerkiksi kerrostaloja tai pientaloja. Vuonna 2019 kaukolämmön keskihinta kaikkien kuluttajatyyppien kesken oli noin 66 €/MWh (alv. 0 %). Tilastojen mukaan kaukolämmön hinta on kasvanut viimeisten vuosien aikana. (Tilastokeskus, 2020)

Päätös investoida hukkalämmön hyötykäyttöön riippuu usein lämmön vaihtoehtoisesta tuotantotavasta ja sen hinnasta. Esimerkiksi metsäteollisuudessa fossiilisten polttoaineiden korvaaminen hukkalämmöllä on kannattavaa, mutta huomattavasti halvemman puupolttoaineen korvaaminen taas ei ole kannattavaa (Lähteenaro, 2019, s. 60). Yleisimpien voimalaitoksessa käytettävien polttoaineiden hintoja on esitetty taulukossa 5.

Taulukko 5. Lämmöntuotannossa käytettyjen polttoaineiden verottomia hintoja vuoden 2020 2. neljänneksellä (Tilastokeskus & Energiavirasto, 2020)

Polttoaine	Hinta
Hake	22.31 €/MWh
Kivihiili (joulukuu 2019, rannikolla)	9.22 €/MWh
Maakaasu (joulukuu 2019, alempi lämpöarvo)	26.84 €/MWh
Jyrsinturve	16.29 €/MWh

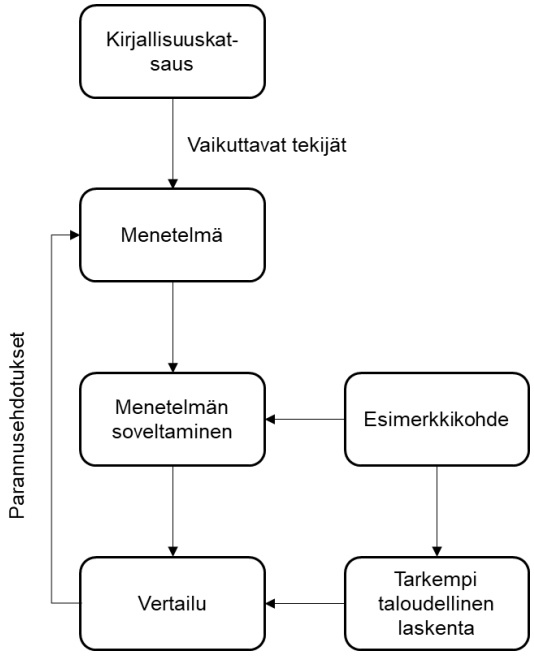
Taulukossa 5 esitettyjen hintojen lisäksi tulee myös huomioida mahdollisten verojen ja muiden maksujen vaikutus polttoaineen kokonaishintaan. Erityisesti fossiilisilla polttoaineilla verot voivat nostaa polttoaineiden kustannuksia merkittävästi. Fossiilisilla polttoaineilla tulee lisäksi huomioida päästökauppa. Nykyisillä hinnoilla hukkalämmön hyödyntäminen vaikuttaa kilpailukykyiseltä ainakin fossiilisiin polttoaineisiin nähden. Esimerkiksi Lähteenaro (2019, s. 38) esittää erään lämpöpumpun energiakustannusten vaihtelevan noin 15 – 30 €/MWh välillä riippuen sähkön hinnasta sekä COP-arvosta.

Polttoaineet eivät suoraan vaikuta hukkalämmön hyödyntämisen kannattavuuteen. Hukkalämpö on polttoainevapaata, koska ilman hyödyntämistä se menisi hukkaan ympäristöön. Epäsuorasti polttoaineen hinta voi vaikuttaa hukkalämmön lähteen kautta. Esimerkiksi hiilivoimalalle hukkalämpöjärjestelmän asentaminen voi olla kannattamatonta, jos laitoksen käyttöaika jää vähäiseksi hiilen ja päästökaupan korkean hinnan takia.

4. AINEISTO JA MENETELMÄT

Luvussa luodaan pohja menetelmälle, jolla voidaan kartoittaa hukkalämmön hyödyntämisteknologioita. Lisäksi esitellään kohde, johon menetelmää sovelletaan. Luvussa 4 on tavoitteena vastata tutkimuskysymykseen “Millaisella menetelmällä voidaan tunnistaa tarkastellun kohteen hukkalämmön hyödyntämispotentiaali?” Menetelmän soveltaminen ja kohteen tulokset esitellään luvussa 5.

Tutkimuksen eteneminen esitetään kuvassa 8. Luvun 2 kirjallisuuskatsauksen ja muun tarkastellun aineiston pohjalta voidaan selvittää hukkalämmön hyödyntämiseen vaikuttavat tekijät. Menetelmä jakaantuu kahteen eri osaan. Ensimmäisessä osassa (luku 4.1) tarkoitus on luoda menetelmä hukkalämmön hyödyntämisratkaisujen kartoitukseen. Toisen osan (luku 4.2) tavoite on löytää menetelmä hukkalämmön taloudellisen potentiaalin analysointiin.

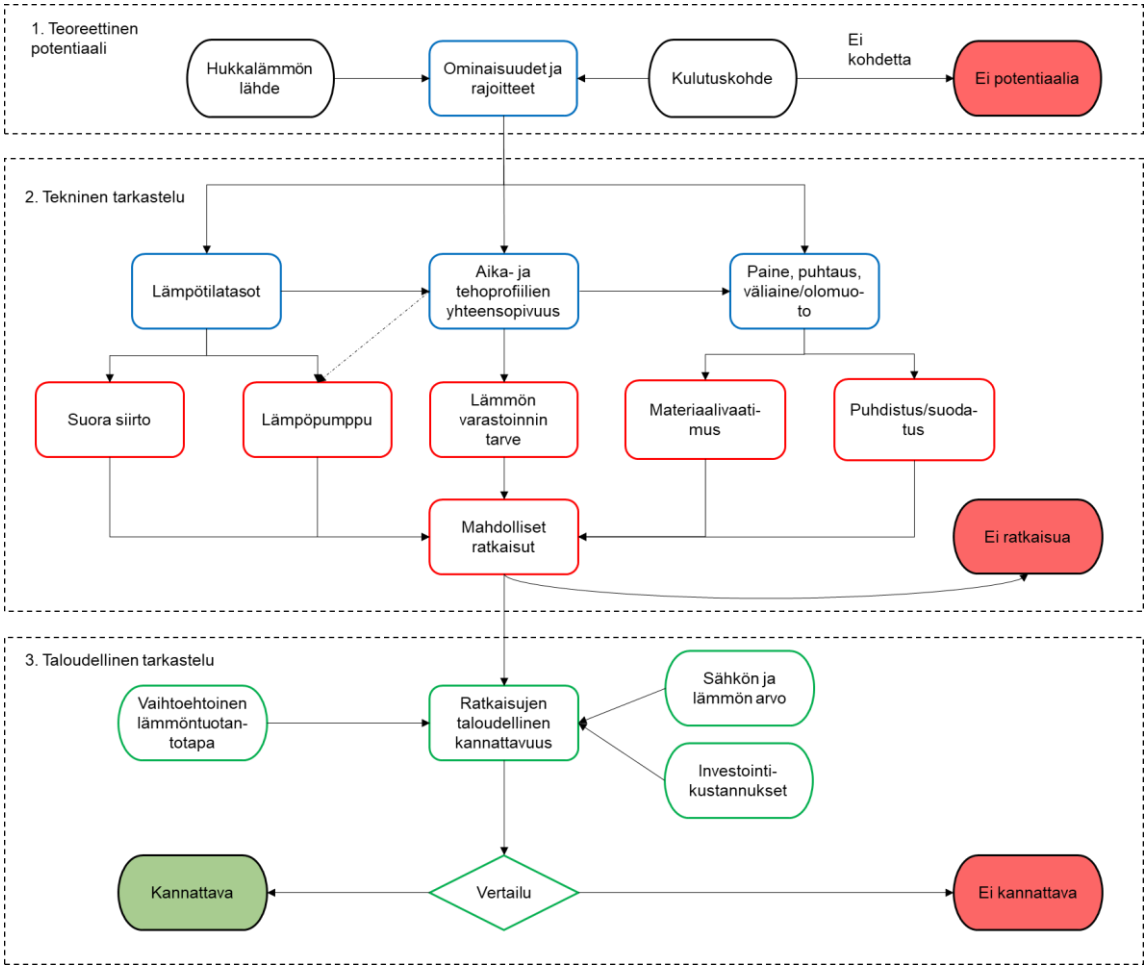


Kuva 8. *Kuvaus tutkimuksen etenemisestä.*

Esimerkkikohteen ominaisuudet analysoidaan ja menetelmää sovelletaan moottorivoimalaitoksen hukkalämmön hyödyntämisen analysoinnissa. Hyödyntämiskeinojen valinnan jälkeen analysoidaan hukkalämmön taloudellinen potentiaali. Menetelmän tuloksena saatua taloudellista potentiaalia verrataan tarkempaan taloudelliseen laskelmaan. Vertailun pohjalta esitetään parannusehdotuksia menetelmään.

4.1 Menetelmä hukkalämmön hyödyntämiskeinojen kartoittamiseen

Hyödyntämiskeinojen kartoituksen menetelmän päärakenne on kuvattu kuvassa 9. Menetelmä koostuu kolmesta päävaiheesta, jotka perustuvat sivulla 4 esitetyn kuvaan 2.



Kuva 9. *Kuvaus menetelmästä.*

Hukkalämmön hyödyntäminen lähtee teoreettisen potentiaalin löytymisestä. Tällöin olemassa on hukkalämmön lähde ja lämpöä tarvitseva kuluttaja. Kummallakin on omat vaatimukset ja rajoitteet. Työn menetelmän ensimmäinen osa keskittyy erityisesti päävaiheeseen 2. Tekninen tarkastelu. Teknisessä tarkastelussa ominaisuudet ja rajoitteet analysoidaan. Tärkeimmät ominaisuudet ovat lähteen ja kulutuskohteen lämpötilatasot ja aika-teho-profiilien yhteensopivuus. Näiden ominaisuuksien pohjalta valitaan hukkalämmön siirtoteknologia sekä mahdollinen lämmön varastointi. Muut tekijät, kuten hukkalämmön paine ja väliaine, vaikuttavat esimerkiksi käytettäviin materiaaleihin ja puhdistamisvaatimuksiin. Rajoitteet voidaan esimerkiksi listata taulukkoon ja samalla selvittää kuinka ne voidaan kiertää tai välttää.

Mikäli hukkalämmön lähteen lämpötila on matalampi kuin kuluttajan vaatima lämpötilataso, hukkalämmön lämpötilaa on priimattava lämpöpumpun avulla. Tietyissä tapauksissa vaihtoehtoinen ratkaisu lämpöpumpulle voi olla prosessimuutos, kuten esimerkiksi matalan lämpötilan kaukolämpöverkon käyttäminen. Prosessimuutokset ovat kuitenkin yleensä kalliita ratkaisuja, joten lämpöpumppu on yleensä todennäköisempi vaihtoehto. Lämpöpumppujen valinnassa vaikuttavat väliaine sekä sen lämpötila ja puhtaus. Mekaaninen lämpöpumppu on yleisempi vaihtoehto kuin kuuman väliaineen vaativa absorptiolämpöpumppu. Lähteen lämpötilan ollessa korkeampi kuin kuluttajan vaatima lämpötilataso, suora siirto on riittävä siirtotapa hukkalämmön hyödyntämiselle.

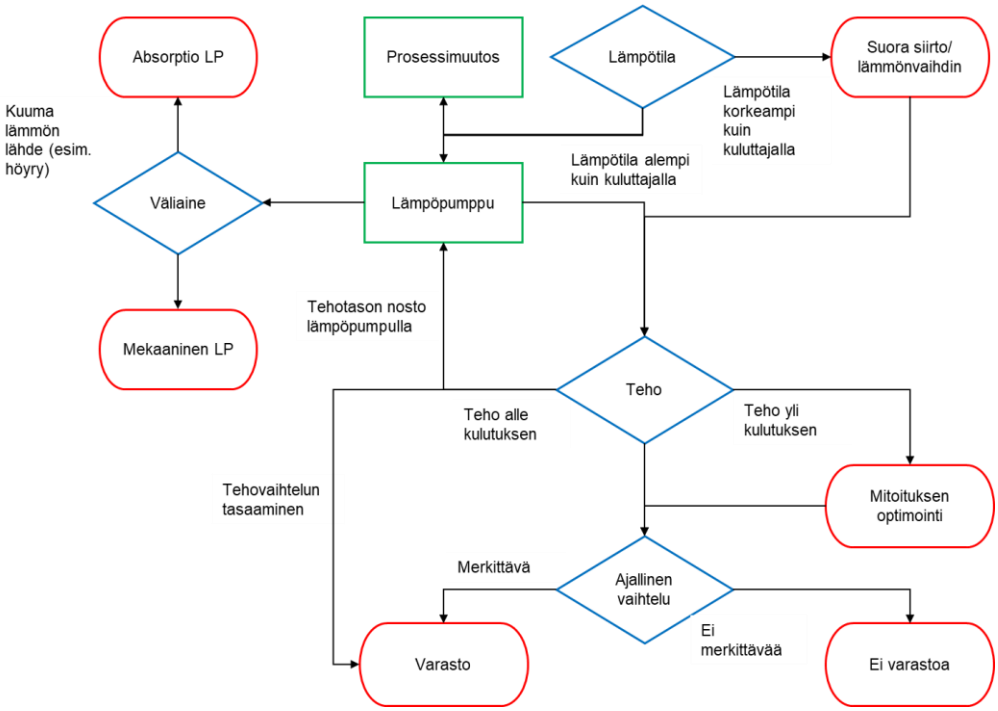
Hukkalämpölähteen lämpöteho vaikuttaa hyödyntämismenetelmään sekä varaston tarpeeseen. Lämpöpumpulla voidaan nostaa hukkalämpötehon suuruutta. Mikäli hukkalämmön lähteen teho on välillä korkeampi ja välillä taas matalampi kuin kuluttajan tehokysyntä, voidaan lämpövarastolla tasata tehovaihtelua. Hukkalämpötehon ollessa yleensä korkeampi kuin lähteellä, kannattaa hyödyntämislaitteiston mitoitukset optimoida kysynnän tehon mukaan.

Hukkalämmön tuotannon ja lämmön kysynnän ajalliset vaihtelut määrittelevät varaston tarpeen. Mikäli vaihtelut ovat pienet, varastoa ei tarvitse tarkastella. Jos vaihtelu on suurta, varasto tulee tarkastella laskennassa. Tarkasteltavat tilanteet ja järjestelmärratkaisut ovat yksilöllisiä, joten erityisesti aika-teho-profiilien tarkastelussa on haastavaa luoda yleisesti pätevää sääntöä esimerkiksi varastoinnin suhteen. Menetelmässä hukkalämmön lähteelle määritellään kolme eri ajallista tuotantoprofiilityyppiä, joista viimeinen (satunnainen) voidaan jakaa kahteen alakategoriaan. Tyypit on esitetty taulukossa 6 sivulla 30.

Taulukko 6. Hukkalämmön tuotantoprofiilityyppien luokittelu.

Tyyppi ja kuvaus	Varaston tarpeellisuus
Tasainen: hukkalämpöä syntyy tasaisesti ja se pystytään ennustamaan	Hukkalämpöä voidaan hyödyntää suoralla siirrolla tai lämpöpumpulla (riippuen lämpötilatasosta) ilman lämpövarastoa.
Syklinen: hukkalämpöä syntyy sykleissä ja niitä pystytään ennustamaan riittävällä tarkkuudella	Hukkalämpöä voidaan hyödyntää suoralla siirrolla tai lämpöpumpulla (riippuen lämpötilatasosta). Lämpövarasto voidaan tarvita tasaamaan vaihtelua syklin ollessa alatasolla.
Satunnainen, ennustettavissa: hukkalämpöä syntyy satunnaisesti ja sen määrä (MWh) voidaan ennustaa riittävällä tarkkuudella päivätasolla	Varasto voidaan tarvita tasaamaan vaihtelua.
Satunnainen, ei ennustettavissa: hukkalämpöä syntyy satunnaisesti ja sen määrää (MWh) ei voida ennustaa riittävällä tarkkuudella päivätasolla.	Varasto tarvitaan yleensä tasaamaan vaihtelua. Varaston kapasiteetti isompi kuin yllä olevassa tapauksessa. Tarvitaan mahdollisesti vaihtoehtoinen tuotantotapa varalle, mikäli varaston kapasiteetti ei ole riittävä.

Varaston suhteen on hyvä vertailla taloudellisia tuloksia ilman varastoa sekä varaston kanssa. Kuva 10 esittää vuokaavion hyödyntämisteknologioiden valitsemisesta.



Kuva 10. *Vuokaavio teknisen tarkastelun etenemisestä.*

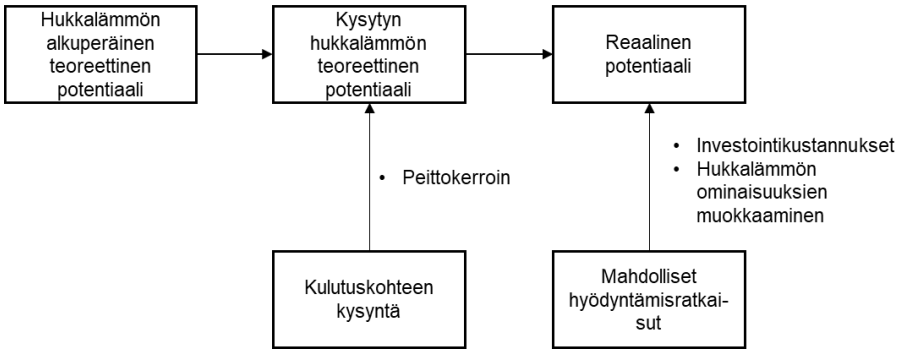
Lämpötilan, tehon ja ajallisen vaihtelun lisäksi myös paine ja väliaineen puhtaus vaikuttavat laitteistojen valintaan. Niitä ei kuitenkaan käsitellä menetelmässä, koska ne eivät olennaisesti vaikuta hukkalämmön hyödyntämismenetelmiin. Ne voivat kuitenkin asettaa laitteistoille esimerkiksi materiaalivaatimuksia tai puhdistuslaitteistojen asentamista.

4.2 Taloudellisen hyödyntämispotentiaalin arviointi

Hukkalämmön hyödyntämispotentiaalin arvioinnin menetelmässä tavoitteena on kuvata hukkalämmön rahallista arvoa ja kuinka rahallinen arvo muuttuu eri hyödyntämiskeinojen suhteen. Menetelmää käytetään ja sen tuloksia verrataan tarkemman investointilaskelman tuloksiin. esimerkkikohteessa Hukkalämmön hyödyntämispotentiaalin vaikuttavat hukkalämmön lähteen sekä kulutuskohteen ominaisuuksien lisäksi myös hyödyntämisteknologia. Kirjallisuuskatsauksen perusteella *hukkalämmön hyödyntämispotentiaali* (lyh. $HLHP$) riippuu kolmesta eri tekijästä:

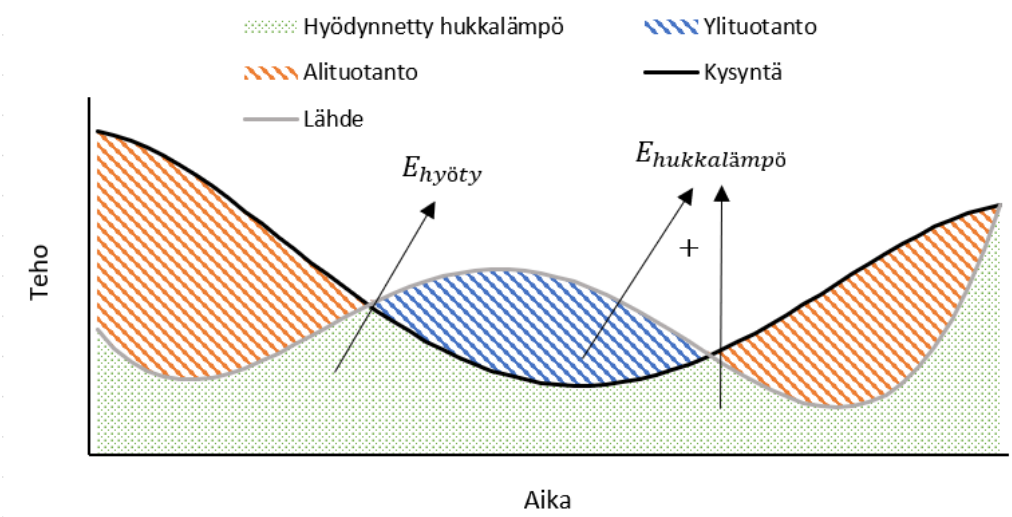
$$HLHP(P(t), T, q) \tag{6}$$

missä $P(t)$ on lähteen ja kuluttajan aika-teho-profiilien yhteensopivuus, T on hukkalämmön lämpötila ja q kuvaa hukkalämmön muita laatutekijöitä (esimerkiksi puhtaus). Kuvassa 11 on kuvattu potentiaalin arvioimisen askeleet.



Kuva 11. *Potentiaalin arvioimisen askeleet.*

Teoreettisen potentiaalin hukkalämmölle asettaa hukkalämmön tehon suuruus ja lämmön hinta. Kulutuskohteen aika-teho-profiili rajoittaa teoreettista potentiaalia. Aika-teho-profiilien yhteensopivuutta on havainnollistettu kuvassa 12 sivulla 32.



Kuva 12. *Hukkalämmön lähteen ja kulutuskohteen aika-teho-profiilien yhteensopivuus ja vaikutus hyödynnettävän hukkalämmön määrään.*

Menetelmää varten määritellään hukkalämmön lähteen ja kulutuskohteen aika-teho-profiilien yhteensopivuutta kuvaava *peittokerroin* (PK). Peittokerroin kuvaa hyödynnetyn hukkalämmön (kuva 12 $E_{hyöty}$) ja kaiken syntyneen hukkalämmön (kuva 12 $E_{hukkalämpö}$) suhdetta tietyllä ajanjaksolla:

$$PK = \frac{E_{hyöty}}{E_{hukkalämpö}} \tag{7}$$

$E_{hyöty}$ on hyödynnetty hukkalämpö, $E_{hukkalämpö}$ on syntynyt kokonaishukkalämpö. Laskennassa kulutuksen ja hukkalämmön tehot (energiamäärät) on laskettava ja tarkasteltava erikseen joka aika-askeleella. Alituotannossa kulutuksen tehon tarve on suurempi kuin hukkalämmön teho, jolloin peittokertoimen arvoksi tulee 100 %. Tällöin kaikki syntynyt hukkalämpö voidaan hyödyntää. Ylituotannossa kulutuksen teho on pienempi kuin hukkalämmöllä, ja osa hukkalämmöstä jää hyödyntämättä kyseisellä aika-askeleella.

Hyödyntämisteknologia voi nostaa hukkalämmön potentiaalia. Samalla sen vaatima investoinnin suuruus laskee potentiaalia. Työn menetelmässä teknologiassa voidaan hyödyntää seuraavia ratkaisuja, jotka valitaan edellisessä luvussa 4.1 esitetyllä menetelmällä:

1. Lämmönvaihdin
2. Lämpöpumppu
3. Varasto
4. Väliaineen puhdistamiseen tarvittavat komponentit (tarkasteltava erikseen)

Lämmönvaihdinta tarvitaan suorassa siirrossa. Potentiaali ei nouse sen käytön takia. Varasto kasvattaa peittokertoimen arvoa, jolloin potentiaali kasvaa suuremman peittokertoimen ansiosta. Lämpöpumppu nostaa hukkalämmön lämpötehoa ja lämpötilaa. Lämpötehon kasvu nostaa potentiaalia. Puhdistamiseen tarvittavat komponentit eivät nosta potentiaalia.

Hukkalämmön alkuperäinen teoreettinen potentiaali [€/a] voidaan laskea vuotuisen hukkaenergian ($E_{hukkalämpö}$) [MWh/a] ja lämpöenergian hinnan ($h_{lämpö}$) [€/MWh] tulona:

$$Potentiaali = E_{hukkalämpö} \cdot h_{lämpö} \tag{8}$$

Hyödynnettävä potentiaali otetaan huomioon laskemalla hukkalämmön lähteen ja kuluttajan ajalliset yhteensopivuudet. Hyödynnettävä potentiaali lasketaan kertomalla yhtälö (8) aiemmin esitetyllä peittokertoimella (kts. yhtälö (7)).

Hyödyntämiskeinon vaikutus potentiaaliin otetaan huomioon laskemalla sen investointikustannuksen vuosittainen annuiteetti. Lämpöpumpun investointikustannukseksi oletetaan potentiaalin laskennassa 325 000 €/MWh. Lämpöpumpulla potentiaaliin vaikuttavat investointikustannusten lisäksi sen tuotto eli tuotetusta lämmöstä saadut tulot ja lämpöpumpun käyttämän sähkön kustannukset. Tuotto tuntia [€/h] kohden lasketaan

$$S = \dot{Q}_{LP} \cdot h_l - P_{LP} \cdot h_e \tag{9}$$

missä $\dot{Q}_{LP}$ on lämpöpumpun tuottama lämpöteho [kW], h_l on lämmön hinta [€/kWh], P_{LP} on lämpöpumpun kuluttama sähköteho [kW] ja h_e on sähkön hinta [€/kWh].

Varasto taas kasvattaa ajallista yhteensopivuutta ja nostaa näin ollen todellisen potentiaalin suuruutta. Menetelmässä tarkastellaan vain tuntuvan lämmön varastoja, koska faasimuutokseen ja termokemiaan perustuvat varastot eivät ole vielä kaupallisella asteella. Menetelmässä käytetään kaukolämmön käsikirjan (2006) yleistä ohjetta. Sen mukaan kaukolämpöakun purkutehoksi tulee mitoittaa 10 – 15 % kaukolämpöverkon maksimitehosta ja varaston kapasiteetin tulisi riittää 2 – 4 tunniksi huipputeholla. Lämpövaraston investointikustannukseksi oletetaan menetelmässä 5.5 €/kWh (katso taulukko 4 sivulla 21). Muita varastoon liittyviä kustannuksia ei huomioida menetelmässä. Myös lämpövaraston lämpöhäviöt jätetään huomioimatta menetelmässä. Karhun työssä analysoidulla lämpövarastolla vuotuisen säästetyn lämpöenergian ja varaston energiakapasiteetin suhde oli noin 21. Tässä työssä taloudellisen potentiaalin laskemisessa oletetaan tämän kertoimen olevan kaksikymmentä. Näin ollen varaston avulla hyödynnettävissä oleva hukkaenergian määrä voidaan laskea yhtälöllä (10):

$$E_{hyöty} = 20 \cdot Q_{var} + E_{hyöty,orig} \tag{10}$$

missä Q_{var} on lämpövaraston varastointikapasiteetti ja $E_{hyöty,orig}$ on alkuperäinen hyödynnetty energia. Yhtälöstä (10) voidaan johtaa kaava uuden peittokertoimen laskemiselle alkuperäisen peittokertoimen arvon avulla. Edellä määritettyjen eri potentiaalien laskemisen yhtälöt on esitetty taulukossa 7.

Taulukko 7. Yhtälöt potentiaalin laskemiseen.

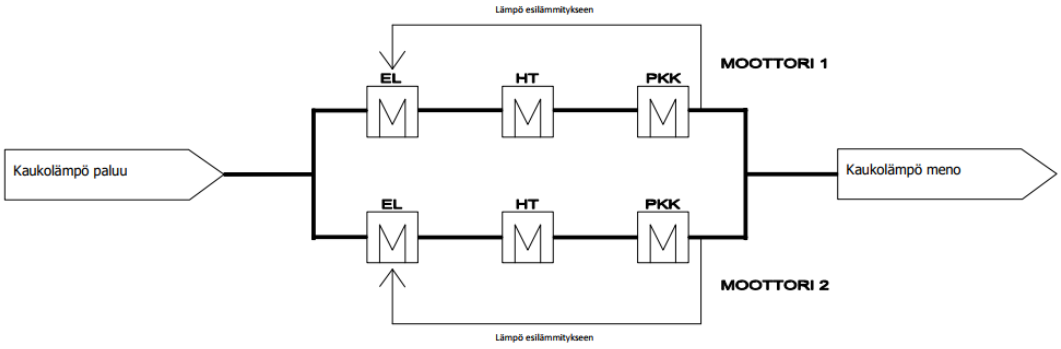
Määritelmä	**Yhtälö**
Teoreettinen potentiaali	$Potentiaali = E_{hukka} \cdot h_{lämpö}$
Hyödynnettävissä oleva potentiaali	$Potentiaali = PK \cdot E_{hukka} \cdot h_{lämpö}$
Lämpöpumpun vaikutus	$Potentiaali_{LP} = Q_{LP} \cdot h_l - W_{LP} \cdot h_e - A$
Varaston vaikutus	$Potentiaali_{var} = \left(1 + 20 \cdot \frac{Q_{var}}{E_{hyöty,orig}}\right) \cdot PK_{orig} \cdot E_{hukka} \cdot h_{lämpö} - A$

Lämpöpumpun kohdalla taulukossa 7 ei ole avattu sen potentiaalin riippuvuutta peittokertoimesta. Lämpöpumpun tuottaman lämpöenergia Q_{LP} lasketaan kuitenkin hyödynnettävissä olevan hukkalämmön perusteella.

4.3 Esimerkkikohde

Tarkasteltavaan kohteeseen kuuluu kaksi erillistä moottoria. Moottorit ovat CHP-yksiköitä eli ne tuottavat sähköä kantaverkkoon ja kaukolämpöä alueen kaukolämpöverkkoon. Yksittäisen moottorin nimellinen sähköteho on 1700 kW. Kaukolämpöverkkoon lämpöä syötetään nykytilanteessa moottorin kuumapiirin eli HT-piirin (engl. high temperature) jäähdytyksestä sekä pakokaasukattilasta (lyh. PKK). Kaukolämpöverkko toimii siis samalla moottoreita jäähdyttävänä virtana.

Kaukolämmön paluuveden mitoitusarvoksi on annettu 45 ºC. Menoveden lämpötilan mitoitusarvo on 110 ºC. Nykytilanteessa kaukolämpövesi palaa verkosta ensin moottorin kuumapiirin jäähdyttimelle ja sen jälkeen pakokaasujen hukkalämpö siirretään kaukolämpöveteen pakokaasukattilassa, josta vesi etenee kaukolämpöverkkoon. HT-piirille menevän kaukolämpöveden lämpötilan on oltava noin 65 ºC eli palaavaa kaukolämpövettä on esilämmitettävä. Esilämmitys toteutetaan siirtämällä lämpöä kaukolämpöverkon menopuolen vedestä paluuveteen. Kaukolämpöverkossa on myös muita laitoksia. Moottorien kytkentä kaukolämpöverkkoon on esitetty kuvassa 13.



Kuva 13. *Yksinkertaistettu virtauskaavio moottorien kytkennästä kaukolämpöverkkoon.*

Kuvan lyhenteiden selitteet on esitetty taulukossa 8.

Taulukko 8. Kuvassa 13 käytetyt lyhenteet.

Lyhenne	Selite
EL	esilämmitys
HT	moottorin kuumapiirin jäähdytin
PKK	pakokaasukattila

Moottorin sähkötehotase ja Kuvassa 13 esitetyn kaukolämpösysteemin lämpötaseet on esitetty taulukossa 9 sivulla 36. Hukkaan meneviä energiavirtoja ei ole esitetty taulukossa. Turboahtimen ahdettua ilmaa jäähdytetään ahtoilmajäähdyttimen avulla (lyh. CAC, engl. charge air cooler), mutta sitä ei syötetä kaukolämpöverkkoon. CAC-jäähdytys toteutetaan niiden omalla turbon jäähdytyspiirillä.

Taulukko 9. Yhden moottorisysteemin energiatase.

Kohde	Teho 100 % moottori-kuormalla [kW]
Polttoaineteho	4000
Lämmön tuotanto	
HT-piiri	1100
Pakokaasukattila	750
Esilämmitys	-1200
Kaukolämpö (verkkoon)	650
Tuotetun kaukolämmön hyötysuhde	16.3 %
Sähkön tuotanto	
Generaattorin sähköteho	1700
Sähköteho (verkkoon)	1700
Sähköntuotannon hyötysuhde	42.5 %

Moottoreiden ajoprofiilit riippuvat sähkön hinnasta ja kaukolämmön kysynnästä. Myös kaukolämmöntuotannossa käytettävien polttoaineiden (kaasu) hinnat vaikuttavat niiden käyttöön. Moottorien ajoprofiileista ei ole tarkkaa tietoa, joten niiden kohdalla joudutaan tekemään oletuksia ja arvioita. Laskentamenetelmä ajoprofiilien laskemiseen on esitetty luvussa 4.6.

4.4 Ahtoilmajäähdyttimen hukkalämmön ominaisuudet

Kummallakin moottorilla ahtoilmajäähdyttimen jäähdytystarpeeksi oletetaan 200 kW. Jäähdyttimelle tulevan jäähdytysveden lämpötila on 40 ºC. Jäähdyttimeltä palaavan jäähdytysveden lämpötila on noin 50 ºC.

Moottorin toimivuuden kannalta on tärkeää, ettei jäähdytysveden 40 ºC:n menolämpötila nouse liian korkeaksi tai laske liian matalaksi, jotta ahtoilman lämpötila moottorille mentäessä on sopiva. Moottorien toiminnan ajallinen tuotantoprofiili voidaan alustavasti karakterisoida satunnaiseksi mutta riittävällä tarkkuudella ennustettavaksi. Tarkempi aikaprofiili ja sen ennustettavuus esitetään luvussa 5. Ennustaminen on mahdollista arvioimalla sähkön hintaa ja kaukolämmön kysyntää. Taulukossa 10 sivulla 37 on tiivistetty hukkalämmön lähteen ominaisuudet.

Taulukko 10. Listaus ahtoilman jäähdytyspiirin hukkalämmön ominaisuuksista. Taulukossa huomioitu on vain yhden moottorin hukkalämmön lähde, koska moottorit ovat identtiset.

Selite	Suuruus/kuvaus
Teho	200 kW
Lämpötilataso	40 - 50 ºC
Paine	max. 5 bar
Ajallinen vaihtelu	satunnainen, voidaan arvioida sähkön hinnan ja kaukolämmön kysynnän perusteella
Väliaine	vesi-glykoli-seos
Puhtaus	puhdas, ei vaadita puhdistusta

Taulukossa 10 listattujen ominaisuuksien perusteella vaikuttaa siltä, että erityisiä materiaalivaatimuksia ei ole. Lisäksi hukkalämpöä voidaan joutua priimaamaan, koska lämpötilataso on suhteellisen matala.

4.5 Hyödyntämiskohteet

Selkeä mahdollinen kohde on kaukolämpöverkko. Moottoreiden rinnalla ja varalla käytetään muita kaukolämpöverkossa olevia laitoksia. Hukkalämmön hyödyntäminen voisi vähentää vaihtoehtoisten tuotantotapojen käyttöä ja siten laskea kaukolämmön kustannuksia. Lisäksi myös moottorien hyötysuhteet voivat parantua.

Energiateknisen hyötysuhteen perusteella hukkalämpö olisi järkevintä käyttää moottorien sisäisissä prosesseissa. Potentiaalinen sisäinen hyödyntämiskohde on kaukolämpöverkon paluuveden esilämmitys ennen HT-piiriä. Moottorivoimalaitoksen läheisyydessä ei ole muuta teollisuutta, joka tarvitsisi hukkalämpöä prosesseissaan. Muita mahdollisia kohteita alueella voisivat teoriassa olla esimerkiksi rakennusten lämmittäminen suoraan ahtoilmajäähdyttimien hukkalämmöllä. Tämä tosin vaatisi uuden erillisen lämmityskytkennän hukkalämmölle ja rakennusten lämmityksellä on oltava kuitenkin varalämmityslähde moottoreiden tuotannon mukaan vaihtelevan hukkalämmön tuotannon takia. Se ei todennäköisesti ole järkevää, koska lämmitys voidaan toteuttaa olemassa olevalla kaukolämpöverkolla ja hukkalämmön syöttäminen kaukolämpöverkkoon on tässä tapauksessa yksinkertaisempi ratkaisu.

Tarkemmin tutkittavia hyödyntämiskohteita ovat näin ollen kaukolämpöverkon paluuveden esilämmitys sekä hukkalämmön syöttäminen kaukolämpöverkon menopuolelle. Näiden ominaisuudet on listattu taulukossa 11 sivulla 38.

Taulukko 11. Hyödyntämiskohteiden tärkeimmät ominaisuudet.

Kohde	Lämpöteho-tarve	Lämpötila	Ajallinen kysyntä
KL-verkon paluuveden esilämmitys	1100 kW/moottori	45/65 ºC	Tarve riippuu moottorin käytöstä. Samassa tahdissa hukkalämmön aikaprofiilin kanssa.
KL-verkon menoveden lämmitys	Riippuu kaukolämmön kysynnästä.	110 ºC	Kaukolämmön kysynnän aikasarjan mukainen, ennustettavissa kohtalaisella tarkkuudella.

Kuten taulukosta 11 nähdään, niin hukkalämmön määrä ei riitä kattamaan esilämmityksen tehon tarvetta. Myös kaukolämpöverkon tehon tarve on yleensä suurempi kuin hukkalämpöteho.

4.6 Laskentamenetelmät

Esimerkkikohdetta tutkittiin aikasarjamenetelmällä. Aikasarjamenetelmässä tarkastellaan moottoreiden tuotantoa kaukolämmön kysynnän ja sähkön tuntikohtaisten spot-hintatilastojen avulla.

Työssä tarkat tulokset laskettiin aikasarjamenetelmällä. Menetelmässä lasketaan sähkön tuntihintojen ja oletetun tuntikohtaisen kaukolämpökysynnän perusteella moottorien tuotanto. Moottorit ovat toiminnassa, mikäli niiden tuotanto on taloudellisesti kannattavaa. Rajahinnan laskemisessa huomioidaan myös lämpöpumpun sähkön kulutus ja lämmön tuotanto lämpöpumpun täydellä kuormalla. Kumpikin moottori voi toimia kuormitusalueella 50 % - 100 %. Menetelmässä ei oteta huomioon käynnistys- tai sammutuskustannuksia. Lisäksi oletetaan, että moottorit voivat käynnistyä ja sammua ilman viivettä. Laskennassa ei ole huomioitu osakuorman vaikutusta moottorin hyötysuhteeseen, vaan sen on oletettu pysyvän vakiona. Moottorien lämpövirtojen ja sähkötehon oletettiin käyttäytyvän myös lineaarisesti kuormituksen suhteen.

Aikasarjalaskennasta saadaan tulokseksi lämpöpumpun tuottama lämpö, kuluttama sähkö sekä sen tuotto. Lisäksi siitä voidaan laskea lämpöpumpun keskikuormitus, keskimääräinen COP-arvo sekä käyttötunnit. Jälkimmäisiä voidaan käyttää apuna karkeassa laskennassa. Keskimääräinen COP-arvo laskettiin Fahlenin (2012) tulosten perusteella johdetulla sovitteella:

$$COP(f) = (-0{,}7796 \cdot f^2 + 1{,}621 \cdot f + 0{,}1586) \cdot COP_{100} \quad (11)$$

missä f viittaa lämpöpumpun osakuormaan ja COP_{100} tarkoittaa lämpöpumpun COP-arvoa täydellä kuormalla. Yhtälö (11) pätee Fahlenin (2012) mukaan tapauksissa, jossa höyrystymis- ja lauhdutuslämpötilat pysyvät vakiona.

Hukkalämmön hyödyntäminen lämpöpumpuilla muuttaa systeemin energiatasetta. Tuotettu sähkön määrä laskee lämpöpumpun omakäyttösähkön takia. Kaukolämmön tuotanto sen sijaan kasvaa. Tuotetut sähkön ja kaukolämmön määrät voidaan laskea kaavoilla

$$P_{e,net} = P_{gen} - P_{ok} - P_{LP} \quad (12)$$

$$\dot{Q}_{KL} = \dot{Q}_{HT} + \dot{Q}_{PKK} - \dot{Q}_{EL} + \dot{Q}_{LP} \quad (13)$$

missä P viittaa sähkötehoon ja $\dot{Q}$ viittaa lämpötehoon. Yhtälössä (12) alaindeksi gen viittaa generaattorin tuottamaan sähkötehoon, ok tarkoittaa omakäyttösähköä, LP tarkoittaa lämpöpumpun kuluttamaa sähkötehoa. Yhtälössä (13) alaindeksi KL viittaa kaukolämpöverkkoon syötettyyn lämpötehoon ja EL esilämmityksen vaatimaan lämmitystehoon.

Laskettuja kaukolämpö- ja sähkötehon arvoja käytetään laskennassa sähkön rajahinnan laskemiseen. Rajahinnan avulla voidaan arvioida moottorien toimintaa tuntitasolla. Moottorin toiminnan perusteella lasketaan syntyvän hukkalämmön määrä ja lämpöpumppujen toiminta.

Tulosten pohjalta tarkastellaan erilaisten kytkentöjen kannattavuutta ja vertaillaan niitä keskenään. Samalla saadaan luotua vertailutulos työssä esitettyä potentiaalimenetelmää varten. Taulukossa 12 on esitetty laskennan lähtötietojen oletusarvoja.

Taulukko 12. Laskennan lähtötietojen oletusarvoja.

Suure	**Arvo**	**Yksikkö**
Pitoaika	15	vuotta
Laskentakorkokanta	5	%
Huoltokustannukset vuodessa	2	% investointikustannuksista
Lämpöpumpun investoinnin suuruus (ellei toisin mainittu)	325 000	€/MW_{TH}
Sähkön hinta	45	€/MWh
Lämmön hinta	55	€/MWh
Varaston investointikustannus	5500	€/MWh

Koska laskennan oletukset ovat yksinkertaistuksia ja pohjautuvat teoreettisiin arvoihin, niin tulokset sisältävät epävarmuuksia. Yksi tapa analysoida epävarmuutta ja sen merkitystä on herkkyysanalyysi. Työssä herkkyysanalyysilla tarkastellaan investoinnin kannattavuuden tunnuslukuja. Herkkyysanalyysin tarkoitus on tutkia miten tekijöiden muuttuminen vaikuttaa investoinnin kannattavuuteen. Herkkyysanalyysi paljastaa, millä tekijöillä merkitys kannattavuuteen on merkittävä ja millä vähemmän merkittävä. (Neilimo & Uusi-Rauva, 1999, s. 218-219)

5. TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU

Luvussa sovelletaan kehitettyä menetelmää ja esitellään tulokset. Ratkaisujen kartoitus menetelmää käyttäen esitetään luvussa 5.1. Hukkalämmön potentiaali määritellään menetelmän avulla luvussa 5.2. Vertailutulokset ja kytkentöjen keskinäinen vertailu esitetään luvussa 5.3. Viimeisessä alaluvussa 5.4 tarkastellaan luodun menetelmän soveltuvuutta.

5.1 Menetelmän soveltaminen ja ratkaisujen kartoitus

Hukkalämmön lähteelle ja potentiaalisille kuluttajille on löydettävä sopivat hyödyntämisratkaisut. Hyödyntämisratkaisut kartoitetaan tarkastellulle moottorivoimalaitokselle luvussa 4.1 kuvatulla menetelmällä.

Lämpötilatasot

Lämmön lähteen lauhdutuslämpötila on 40 ºC, joten se on liian matalassa lämpötilassa jopa kaukolämmön paluuveden esilämmittämistä (65 ºC) ajatellen. Prosessimuutoksia ei ole kannattavaa tehdä, koska siinä tulisi huomioida koko kaukolämpöverkon toiminta. Hukkalämmön lämpötilaa tulee priimata siis lämpöpumpuilla. Mekaaninen lämpöpumppu on ainoa vaihtoehto, koska absorptiolämpöpumput vaativat huomattavasti korkeamman lämpötilan omaavan hukkalämmön lähteen.

Väliaineena hukkalämmön lähteellä toimii vesi-glykoli-seos. Vesi-vesi-lämpöpumpulla sen höyrystimen ja lauhduttimen lämmönsiirto on tehokkaampaa kuin ilma-ilma- tai ilma-vesi-lämpöpumpuilla. (Lähteenaro, 2019, s. 40) Hukkalämmön lähteen lauhdutuslämpötila on 45 ºC. Sopivaksi asteisuudeksi kaikilla lämpöpumpun lämmönvaihtimilla oletetaan 5 ºC (Xu et al., 2018). Lämpöpumpun höyrystimen mitoituslämpötila on tällöin 40 ºC. Esilämmitetyn kaukolämpöveden tulee olla 65 ºC, joten hukkalämmön lämpötilataso priimataan 70 ºC asti. Kaukolämmön menopuolelle (110 ºC) voidaan syöttää lämpöä kysynnän mukaan. Hukkalämmön lämpötila tulisi siinä tapauksessa priimata lämpötilaan 115 ºC.

Ajallinen vaihtelu ja tehotasot

Moottorivoimalaitos soveltuu vaihtelevaan sähköntuotantoon, jolloin myös sen kaukolämmöntuotanto voi vaihdella. Kaukolämmön kysyntä on myös vaihtelevaa. Työssä on oletettu moottoreiden toiminnan riippuvan sähkön hinnasta ja kaukolämmön kysynnästä. Näin ollen se voidaan karakterisoida taulukon 6 mukaan satunnaiseksi, mutta ennustettavissa olevaksi. Lämmön varastointi voi siis auttaa lämmöntuotannon tasaamisessa.

Tutkittavien hukkalämpöjen lämpötehot ovat melko pienet, joten varasto on kannattavampaa rakentaa koko kaukolämpöverkon lämmöntuotannolle eikä vain tässä työssä tutkittavalle hukkalämmön lähteelle.

Hukkalämmöllä ei kyetä korvaamaan kaikkea lämmön tarvetta. Kaukolämmön paluuveden esilämmityksessä tarvittava lämmitysteho on keskimäärin 1100 kW. Tehotasoja voidaan nostaa lämpöpumpun avulla, mutta suuri tehon nosto kasvattaa lämpöpumpun sähkönkulutuksen kustannuksia. Samalla myös investointikustannukset kasvavat lämpöpumpun isompien komponenttien takia.

Painetasot, väliaineet ja niiden ominaisuudet

Hukkalämmön väliaineena on vesi-glykoli-seos, joka ei aiheuta erityisiä materiaali- tai puhdistusvaatimuksia. Painetasot ovat myös melko matalia, joten se ei aiheuta erityisvaatimuksia materiaaleille.

Menetelmän perusteella hukkalämmön hyödyntämisessä tulee käyttää lämpöpumppua. Muita teknologioita ei välttämättä tarvita. Myös varaston käyttöä tarkastellaan menetelmän soveltuvuuden arvioinnin takia. Lämpöpumppukytkentöjen osalta vertaillaan yhteensä neljää erilaista ratkaisuvaihtoehtoa:

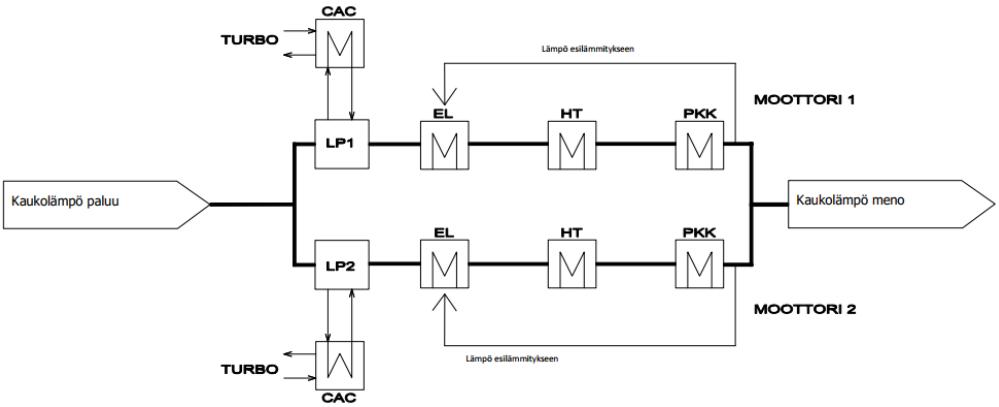
- Kaukolämmön paluuveden esilämmitys:
  1. moottorien omilla lämpöpumpuilla (kuva 14)
  2. yhdellä yhteisellä lämpöpumpulla (kuva 15)
- Kaukolämmön menoveden lämmittäminen
  3. moottorien omilla korkean lämpötilan lämpöpumpuilla (kuva 16)
  4. yhdellä yhteisellä korkean lämpötilan lämpöpumpulla (kuva 17)

Huomioitavat rajoitteet on listattu liitteen 1 taulukossa. Ratkaisuvaihtoehtojen prosessikaaviot ovat esitetty kuvissa 14 – 17 seuraavilla sivuilla. Kuvissa käytetyt lyhenteet on selitetty taulukossa 13.

Taulukko 13. Kuvissa 14 – 17 käytettyjen lyhenteiden selitteet.

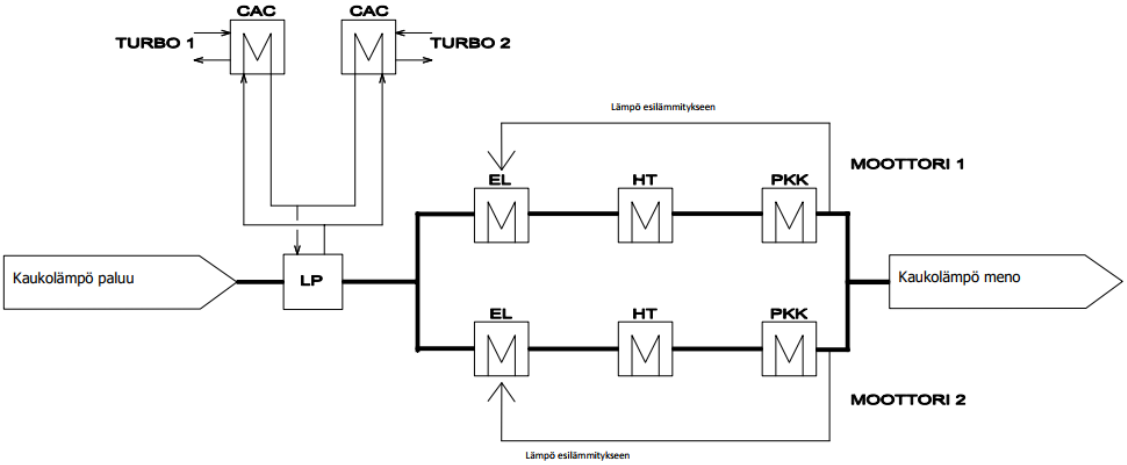
Lyhenne	Selite
CAC	ahtoilman jäähdytin
EL	esilämmitys
HT	moottorin kuumapiirin jäähdytin
LP	lämpöpumppu
PKK	pakokaasukattila

Kaukolämpöverkon paluuvettä on esilämmitettävä moottorin kuumapiirille sopivaan lämpötilaan. Nykytilanteessa esilämmitys toteutetaan siirtämällä lämpöä kaukolämmön menopuolelta paluuveteen. Esilämmityksen toteuttaminen hukkalämmöllä voisi nostaa moottorivoimalaitoksen hyötysuhdetta. Lämpöpumpulla toteutettava lämpötilan noston suuruus on sopiva ja sen COP-arvoksi arvioidaan noin 4.33.



Kuva 14. *Kytkentä 1: kaukolämmön paluuveden lämmittäminen kahdella erillisellä moottorikohtaisella lämpöpumpulla. Turbon jäähdyttimeltä tuleva lämpö priimataan lämpöpumpussa ja syötetään kaukolämmön paluuveteen ennen HT-piirin jäähdytintä ja pakokaasukattilaa.*

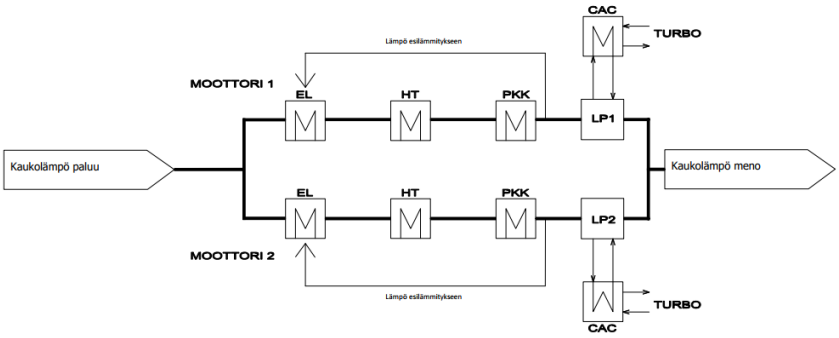
Lämpöpumppujärjestelmän toimivuuden kannalta ja mekaanisten lämpöpumppujen mahdollisten säätöongelmien takia olisi järkevämpää rakentaa molemmille moottoreille omat lämpöpumput (Maaskola & Kataikko, 2014). Yhden yhteisen lämpöpumpun rakentaminen voi kuitenkin olla taloudellisesti kannattavampaa.



Kuva 15. *Kytkentä 2: kaukolämmön paluuveden esilämmitys yhteisellä lämpöpumpulla.*

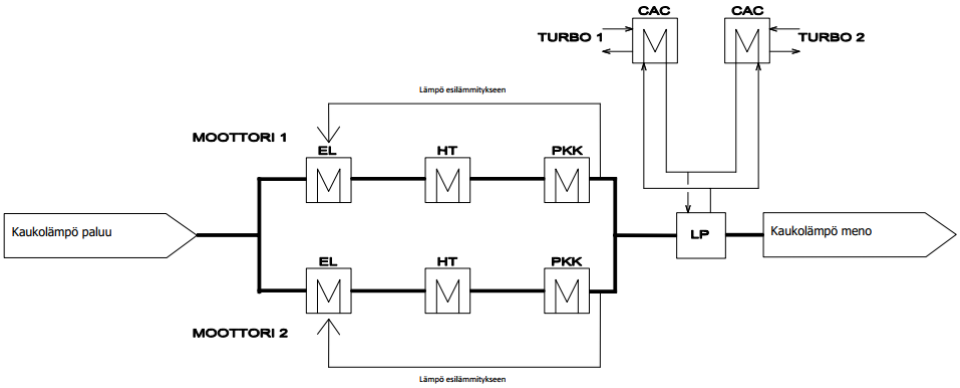
Hukkalämmön priimaus ja lämmön syöttö kaukolämpöverkon menopuolelle vaatii korkean lämpötilan lämpöpumpun. Kyseisellä ratkaisulla COP-arvo on noin 3.1 eli pienempi kuin esilämmityksen lämpöpumpulla (Lähteenaro, 2019, s. 18). Ratkaisu voi kuitenkin

olla yksinkertaisempi toteuttaa kuin esilämmitys, koska lämpöpumpun kytkennälle voi olla enemmän tilaa. Lisäksi muutoksen vaikutuksia moottorin jäähdytyksen toimintaan ei tarvitse huomioida yhtä tarkasti.



Kuva 16. *Kytkentä 3: hukkalämmön syöttäminen menoveteen kahdella moottorikohtaisella lämpöpumpulla.*

Kuten esilämmityksessä, myös hukkalämmön syöttämisessä kaukolämpöverkon menopuolelle yhden yhteisen lämpöpumpun käyttäminen voi olla taloudellisesti kannattavampaa.



Kuva 17. *Kytkentä 4: hukkalämmön syöttäminen kaukolämmön menoveteen moottoreiden yhteisen lämpöpumpun avulla.*

Kytkentöjen tarkkoja sijainteja ja ratkaisuja ei käsitellä tarkasti tässä työssä. Lämpöpumppujen suorituskykyarvot täydellä kuormalla on laskettu taulukossa 14.

Taulukko 14. Lämpöpumppujen energiatase täydellä kuormalla. Arvot lämpöpumppua kohden. Kytkennöissä 1 ja 3 on yhteensä kaksi lämpöpumppua. Kytkennöissä 2 ja 4 on yksi lämpöpumppu.

	Kytkentä 1	**Kytkentä 2**	**Kytkentä 3**	**Kytkentä 4**
COP	4.33	4.33	3.1	3.1
Lähteen energia [kW]	200	400	200	400
Tuotettu lämpöteho [kW]	260	520	295	590
Kulutettu sähkö [kW]	60	120	95	190

Yhtälöiden (12) ja (13) perusteella voidaan laskea moottorien uudet lämpö- ja sähkötehojen taseet. Nämä on esitetty taulukossa 15. Kytkentöjen 2 ja 4 lämpöpumppujen energiatase on jaettu puoliksi kummallekin moottoreille. Tällöin niiden vaikutus moottorien energiataseeseen on samanlainen kuin kytkennöillä 1 ja 3.

Taulukko 15. Moottorien sekä lämpöpumppujen kaukolämmön ja sähköntuotanto esilämmityksen ja menoveden tapauksessa.

	Esilämmitys (kytkennät 1 ja 2)	**Menovesi (kytkennät 3 ja 4)**
Lämpövirrat		
Lämpöteho moottorilta [kW]	1850	1850
Esilämmitys [kW]	-1200	-1200
Priimattu hukkalämpöteho [kW]	260	295
Kaukolämpöteho verkkoon [kW]	910	945
Sähkön tuotanto ja omakäyttösähkö		
Generaattoriteho [kW]	1700	1700
Lämpöpumpun sähköteho [kW]	-60	-95
Sähköteho verkkoon [kW]	1640	1605

Laskettuja kaukolämpö- ja sähkötehon arvoja käytetään laskennassa sähkön rajahinnan laskemiseen. Moottorin toiminnan perusteella lasketaan syntyvän hukkalämmön määrä ja lämpöpumppujen toiminta.

5.2 Hukkalämmön potentiaalin määritys

Hukkalämmön potentiaalin määrityksessä käytetään luvussa 4.2 luotua laskentamenetelmää ja sen oletuksia. Tarkasteltavia komponentteja esimerkkikohteessa ovat lämpöpumput. Hukkalämmön potentiaalit lasketaan sekä esilämmitykselle että menoveden

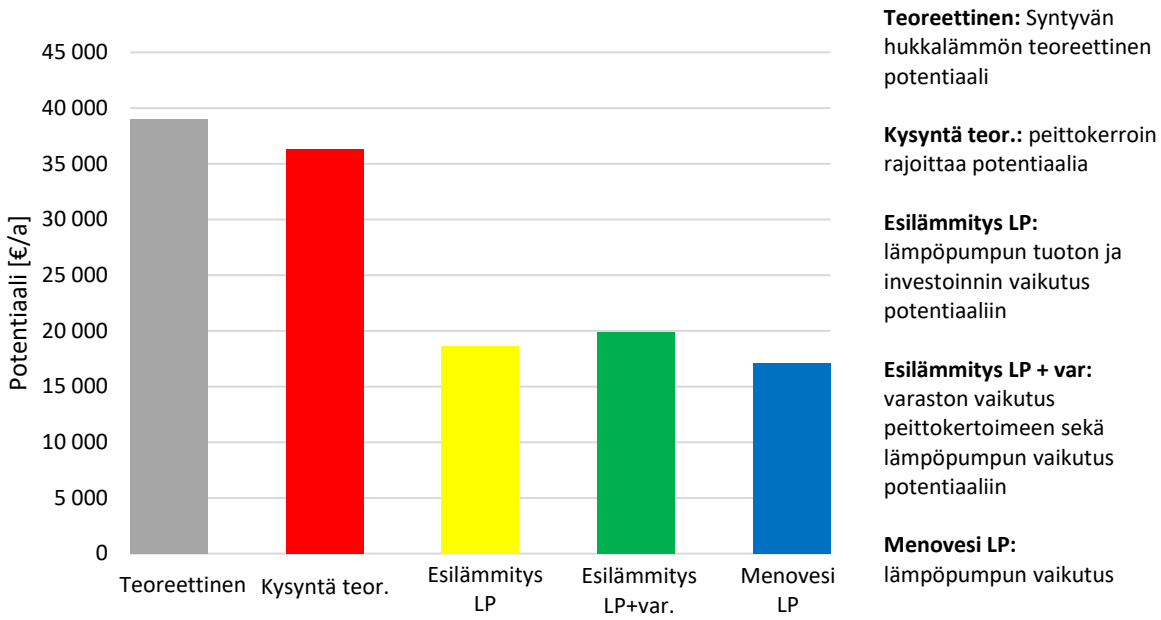
lämmitykselle. Yksittäisille kytkennöille potentiaalia ei lasketa, koska tulokset olisivat menetelmällä samat kytkennöille 1 ja 2 sekä kytkennöille 3 ja 4. Aikasarjalaskennan tulosten (luku 5.3) perusteella moottoriparin vuoden huipunkäyttötunneiksi oletettiin 1775 h.

Oletetulla käyttötuntimäärällä hukkalämpöä syntyy vuodessa noin 710 MWh kahta moottoria kohden. Lämmön hinnan ollessa 55 €/MWh, tämän vuosittaiseksi teoreettiseksi potentiaaliksi yhtälöllä (5) saadaan 39 050 €.

Kaukolämmön kysyntä rajoittaa hyödynnettävän hukkalämmön määrää. Aikasarjalaskennan perusteella hyödyntämätöntä hukkalämpöä syntyy noin 7 % kytkennän 2 kohdalla. Yhtälössä (7) esitetyn peittokertoimen arvo on tällöin 93 %. Hukkalämmön hyödynnettäväksi potentiaaliksi tulee tällöin noin 36 300 €.

Hukkalämmön hyödyntämisessä tarvitaan lämpöpumppuja. Potentiaali lasketaan sekä esilämmitykselle että menoveden lämmitykselle. Lämpöpumppujen vuotuinen huipunkäyttöaika on 93 % moottoriparin huipunkäyttöajasta (1775 h) eli noin 1650 tuntia vuodessa. Lämpöpumppujen investointikustannukseksi tuotettua lämpötehoa kohti oletetaan 325 000 €/MW_{TH}. Esilämmitykselle (tuotettu lämpöteho 520 kW) investointikustannukseksi tulee noin 169 000 € ja menovedelle (590 kW) noin 192 000 €. Investointilaskennassa pitoajoiksi oletettiin 15 vuotta ja korkokannaksi 5 %. Huoltokustannusten vuosittaiseksi suuruudeksi arvioidaan noin 2 % investoinnin suuruudesta. Sähkön hinta laskennassa oli 45 €/MWh.

Lisäksi tarkastellaan varaston vaikutusta potentiaaliin esilämmityksessä. Peittokertoimen arvo 93 % on iso ja todennäköisesti varasto ei merkittävästi paranna hukkalämmön hyödyntämisen taloudellista potentiaalia. Menetelmän oletuksien testaamista varten, varastoa kuitenkin tarkastellaan esilämmityksen tapauksessa. Menetelmässä oletetaan 1 MWh:n varastointikapasiteetin kasvattavan hyödynnettävissä olevan lämmön määrää 20 MWh:a. Tämän mukaan maksimikapasiteetti varastolle olisi 2.5 MWh, kun hyödyntämätöntä hukkalämpöä syntyy 50 MWh vuodessa. Varaston investointikustannukseksi menetelmän oletusten (5.5 €/kWh) avulla saadaan noin 14 000 €. Lämpöpumpun ja varaston yhteiset investointikustannukset ovat tällöin 183 000 €. Edellä esitettyjen potentiaalien arvot on esitetty kuvassa 18 sivulla 47. Laskelmat on tarkemmin taulukoituna liitteeseen 2.



Kuva 18. *Hukkalämmön potentiaalit esimerkkikohteessa.*

Tuloksista mukaan hyödyntämisteknologioiden investointikustannusten vuosittaiset annuiteetit pudottavat merkittävästi hukkalämmön potentiaalia teoreettisista potentiaaleista. Esilämmityksessä lämpöpumpun ja varaston käyttö antaa suurimman vuotuisen potentiaalin hyödyntämisratkaisuista. Varaston merkitys on kuitenkin melko pieni, ero esilämmitykseen ilman varastoa on noin 1 300 €/a eli alle 7 %. Varaston kohdalla tuloksiin tulee kuitenkin suhtautua kriittisesti, koska tarkasteltu varasto on kooltaan hyvin pieni verrattuna isoihin kaukolämpöakkuihin, joiden perusteella varaston investointikustannuksia ja peittokertoimen kasvua suhteessa varaston kapasiteettiin on arvioitu. Laskennasta voidaan myös johtaa investointien kannattavuuslaskennan arvoja. Näitä on esitetty taulukossa 16.

Taulukko 16. Hukkalämmön hyödyntämisen kannattavuuden mittareita eri vaihtoehdoissa. Korostettuna jokaisen mittarin kannattavin vaihtoehto.

	Esilämmitys LP	**Esilämmitys LP + varasto**	**Menovesi LP**
Investointikustannus	**169 039 €**	183 039 €	191 905 €
Tuotto vuodessa	34 901 €	**37 521 €**	35 605 €
Takaisinmaksuaika (koroton) [a]	**4.8**	4.9	5.4
Takaisinmaksuaika (korollinen) [a]	**5.7**	**5.7**	6.4
NPV	193 223 €	**206 420 €**	177 660 €
Sisäinen korko	**19.2 %**	19.0 %	16.7 %

Kannattavuuksien mittareista takaisinmaksuajat ja sisäinen korko osoittavat, että esilämmitys lämpöpumpulla olisi taloudellisesti kannattavin ratkaisu. Varaston käyttö lämpöpumpun yhteydessä on kuitenkin nettonykyarvoltaan parempi ratkaisu. Poikkeus nettonykyarvon kohdalla selittyy investointien ja tuottojen suuruuksilla. Varaston kanssa investointikustannukset ovat suuremmat mutta tuotto on parempi kuin pelkällä lämpöpumpulla. Suuremmat tuotot kasvattavat nettonykyarvoa, kun korkotaso on matala. Kun korkotasoa nostetaan, nettonykyarvon suuruus pienenee nopeammin, mitä kalliimpi investointi on kyseessä. Suurilla koroilla pelkkä lämpöpumppu on siis kannattavampi ratkaisu kuin lämpöpumppu varaston kanssa. Näiden kahden ratkaisujen suhteelliset erot ovat kuitenkin vain alle prosentin takaisinmaksuajoissa ja sisäisessä korossa.

5.3 Vertailulaskenta ja kytkentöjen keskinäinen vertailu

Vertailulaskentana käytetään aikasarjalaskentaa. Lämpöpumppujen vuositasolla tuottama lämpöenergia, kuluttama sähköenergia ja tuotto on esitetty taulukossa 17. Lämpöpumpun tuotto laskettiin kaavalla (9). Kaukolämmön hinnaksi oletettiin laskennassa 55 €/MWh. Kytkennöille 1 ja 3 käyttöajoilla tarkoitetaan molempien lämpöpumppujen yhteenlaskettuja käyttöaikoja. Moottorikohtaiset tulokset kytkennöille 1 ja 3 on esitetty liitteessä 3.

Taulukko 17. Lämpöpumppujen lämmön tuotanto ja sähkön kulutus vuositasolla.

	Kytkentä 1	**Kytkentä 2**	**Kytkentä 3**	**Kytkentä 4**
Käyttötunnit [h/a]	3303	1637	3289	1621
Hukkalämpöteho keskimäärin [kW]	196	342	196	342
Sähkön kulutus [MWh]	**200**	225	315	362
Lämmön tuotanto [MWh]	861	903	973	**1040**
Tuotto (huoltokustannuksia ei huomioitu)	35 793 €	**36 658 €**	35 353 €	36 297 €

Sekä lämmön tuotannon että sähkön kulutuksen määrissä on eroja kytkentöjen välillä. Esilämmityksen tapauksessa sähkön kulutus on maltillisempaa kuin menoveden tapauksessa. Tämä on suora seuraus esilämmityksen paremmasta COP-arvosta. Tuottojen kohdalla erot ovat kuitenkin pieniä. Lämmön syöttämisessä menoveteen sähkön kulutus on huomattavasti suurempaa kuin paluuveden lämmityksessä. Samalla myös lämpöpumppujen tuottama kaukolämpöteho on suurempi. Suuri sähkönkulutus vaatii kuitenkin

isomman laitteiston, mikä nostaa investointikustannuksia. Mikäli sähkö on halpaa ja lämmöstä saadaan suuri tuotto, priimaus menoveteen voi olla kannattavampaa. Yleensä kuitenkin sähkön ja lämmön hinnat ovat suotuisemmat esilämmitykselle.

Aikasarjamenetelmässä arvioitiin ensin yhtä lämpöpumppua käyttävien systeemien (kytkennät 2 ja 4) investointikustannuksiksi 325 000 €/$MW_{tuotettu\ lämpö}$. Kahden lämpöpumpun systeemien oletettiin olevan suhteellisesti kalliimpia kuin yhden lämpöpumpun systeemit. Oletettavaa on, että kahden lämpöpumpun järjestelmät (esimerkiksi automaatiokomponentit ja putkistot) lisäävät kustannuksia. Moottorikohtaisille lämpöpumppusysteemeille tämä huomioitiin laskemalla investointikustannukset käyttämällä kapasiteettieksponenttimenetelmää (kaava (3)) yhdelle lämpöpumpulle ja kertomalla tämä kahdella. Esimerkiksi esilämmityksen kytkennöissä investointikustannus 520 kW lämpöteholle mitoitetulle kytkennälle 2 on

$$I_{kytkentä\ 2} = 0.520\ MW_{th} \cdot 325\ 000 \frac{€}{MW_{th}} \approx 169\ 000\ €$$

Kapasiteettimenetelmää käyttäen kahden lämpöpumpun vaihtoehdolle (kytkentä 1) investointikustannukseksi saadaan:

$$I_{kytkentä\ 1} = 2 \cdot 169\ 000\ € \cdot \left(\frac{0.260\ \mathrm{MW}_{th}}{0.520\ \mathrm{MW}_{th}}\right)^{0.7} \approx 208\ 000\ €$$

Eri kytkentöjen taloudellista kannattavuutta on vertailtu taulukossa 18 sivulla 50.

Taulukko 18. Eri kytkentöjen taloudellisia mittareita. Pitoajaksi on arvioitu 15 vuotta ja laskentakorkokannaksi 5 % (Vuorinen, 2019, liite 1)

	Kytkentä 1	**Kytkentä 2**	**Kytkentä 3**	**Kytkentä 4**
Investointi	208 000 €	**169 000 €**	236 000 €	192 000 €
Vuosittainen tuotto/tappio (huoltokustannukset mukana)	31 633 €	**33 278 €**	30 633 €	32 457 €
Taloudelliset mittarit				
Takaisinmaksuaika (koroton) [a]	6.6	**5.1**	7.7	5.9
Takaisinmaksuaika (korollinen) [a]	8.2	**6.0**	10.0	7.2
NPV	120 344 €	**176 410 €**	81 959 €	144 889 €
Sisäinen korko	12.7 %	**18.1 %**	9.8 %	14.8 %

Taulukon 18 mukaan kytkentä 2 (kaukolämmön paluuveden esilämmitys) on kaikilla tässä työssä käytetyillä taloudellisilla mittareilla paras investointi. Kytkentä 4 (lämpöpumpun tuottaman lämmön syöttö menoveteen yhdellä lämpöpumpulla) on toiseksi paras vaihtoehto. Kytkentä 1 (esilämmitys moottorikohtaisilla lämpöpumpuilla) on kolmanneksi kannattavin investointi. Kytkentä 3 on laskennan perusteella heikoin vaihtoehto. Vuosittaisten tuottojen erot eri vaihtoehtojen välillä on melko pieniä, joten investointien suuruudet korostuvat kannattavuutta arvioidessa.

Vertailtaessa keskenään kytkentöjä 1 ja 3 sekä kytkentöjä 2 ja 4, hukkalämmön syöttäminen paluuveden esilämmitykseen on tulosten mukaan molemmissa vertailuissa kannattavampaa kuin menoveteen syöttäminen. Yhden lämpöpumpun kytkennät (2 ja 4) ovat myös kannattavampia kuin kahden lämpöpumpun kytkennät (1 ja 3).

Aikasarjalaskennan tuloksista nähdään, että yhden lämpöpumpun kytkennät (2 ja 4) vaikuttavat kannattavammilta kuin kahden lämpöpumpun ratkaisut. Eri kytkentöjen vuosittaisissa tuotoissa ei ole suuria eroja, joten investoinnin suuruuden merkitys korostuu kytkentöjen kannattavuuksien vertailussa. Yhden lämpöpumpun osakuormituksen COP-arvoon tulee kuitenkin suhtautua varautuen, koska käytännön sovelluksissa se vaihtelee lämpöpumpun säätötekniikan mukaan.

Aikasarjalaskennan perusteella saatiin laskettua moottorien ajoprofiilit perustuen kaukolämmön kysyntään ja sähkön tuntihintoihin. Laskennan tuloksien mukaan moottorien hukkalämmöstä hukkaan menee kahden lämpöpumpun kytkennöillä (kytkennät 1 ja 2) selvästi alle 5 %. Näillä kytkennöillä ei ole tarvetta varastoinnille. Myös yhden lämpöpumpun kytkennöillä hyödyntämätöntä hukkalämpöä syntyy suhteellisen vähän. Kytkennällä 2 hukkalämpöä jää hyödyntämättä noin 7.1 % ja kytkennällä 4 noin 5.7 %.

5.3.1 Kytkentöjen kannattavuuksiin vaikuttavat tekijät

Kytkentä 2 oli kaikista kannattavin, joten sen avulla kannattaa tarkastella reunaehtoja, joilla hukkalämmön hyödyntäminen on kannattavaa esimerkkikohteessa. Kytkennän 2 korottoman takaisinmaksuajan riippuvuutta lämpöpumpun huipunkäyttöajasta ja investoinnin suuruudesta on tarkasteltu taulukossa 19.

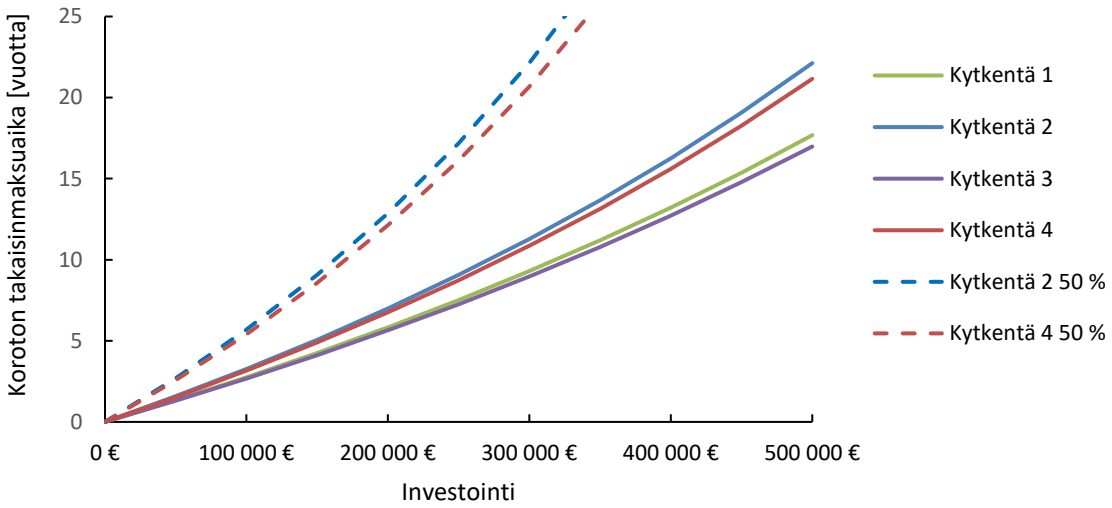
Taulukko 19. Korottoman takaisinmaksuajan riippuvuus vuosittaisista huipunkäyttöajasta ja investoinnin suuruudesta. Arvot kytkennälle 2. Korostettuna alle 15 vuoden takaisinmaksuajat.

		Huipunkäyttöaika vuodessa [h/a]				
		1000	2000	3000	4000	5000
Investoinnin suuruus	100 000 €	**4.7**	**2.3**	**1.5**	**1.1**	**0.9**
	150 000 €	**7.4**	**3.5**	**2.3**	**1.7**	**1.3**
	200 000 €	**10.4**	**4.7**	**3.0**	**2.3**	**1.8**
	250 000 €	**13.7**	**6.0**	**3.9**	**2.8**	**2.3**
	300 000 €	**17.4**	**7.4**	**4.7**	**3.5**	**2.7**
	350 000 €	**21.6**	**8.9**	**5.6**	**4.1**	**3.2**

Takaisinmaksuaika laskee huomattavasti, kun huipunkäyttöaika kasvaa 1000 tunnista 2000 tuntiin. Sama ilmiö toistuu myös muille kytkennöille. Riippuvuus investoinnin suuruudesta on suhteellisen lineaarista, kun sitä tarkastellaan yli 2000 tunnin huipunkäyttöajoilla.

Takaisinmaksuajan vaatimus vaihtelee tapauskohtaisesti. Taulukossa 19 lähes kaikki tarkasteltujen vaihtoehtojen takaisinmaksuajat alittivat oletetun 15 vuoden pitoajan. Oletettu pitoaika on kuitenkin melko pitkä ja takaisinmaksuaika on laskettu korottomana, mikä laskee kannattavuutta. Tulokset osoittavat, että investointilaskennassa kannattaa arvioida useampia mittareita.

Kannattavuuksiin vaikuttavia tekijöitä tutkittiin herkkyysanalyysillä. Kytkentöjä vertailtaessa niiden käyttötunnit asetettiin samoiksi. Käyttötunneiksi kytkentöjen 2 ja 4 lämpöpumpuille oletettiin 1650 tuntia vuodessa. Kytkentöjen 1 ja 3 lämpöpumppujen oletettiin käyvän yhteenlaskettuna 3300 tuntia. Myös sähkön hinta pidettiin vakiona (45 €/MWh) ja lisäksi oletettiin kaiken lämpöpumpun tuottaman lämmön olevan hyödynnettävissä. Jokaisen kytkennän takaisinmaksuajan riippuvuutta investoinnin suuruudesta on esitetty kuvassa 19. Kytkennöillä 2 ja 4 lämpöpumpun kuormitus vaikuttaa niiden COP-arvoon yhtälön (11) mukaisesti. Oletuksena näillä kytkennöillä oli 85 % kuormitus (yhtenäiset viivat) ja kuvaan on piirretty katkoviivoin tilanne, kun lämpöpumppujen kuormitus on 50 %.



Kuva 19. *Investoinnin suuruuden vaikutus kytkentöjen takaisinmaksuaikoihin. Punainen ja keltainen katkoviiva kuvaavat kytkentöjen 2 ja 4 takaisinmaksuaikaa, kun lämpöpumpun keskimääräinen kuorma on 50 %.*

Kuvan 19 mukaan moottorikohtaisten lämpöpumppujen (kytkennät 1 ja 3) takaisinmaksuaika on lyhyempi kuin moottorien yhteisillä lämpöpumpuilla (kytkennät 2 ja 4). Katkoviivat kuvaavat kytkentöjen 2 ja 4 takaisinmaksuaikaa, kun lämpöpumpun kuormitus on keskimäärin 50 %. Tämä tilanne tarkoittaa, että keskimäärin vain toista moottoria ajetaan täydellä kuormalla ja toinen on pois päältä. Tulosten perusteella kuormitus vaikuttaa huomattavasti kytkentöjen 2 ja 4 kannattavuuteen.

Myös sähkön ja lämmön hintojen vaikutusta eri kytkentöjen takaisinmaksuaikoihin tarkasteltiin. Näistä laaditut kuvaajat on esitetty liitteessä 4. Molemmissa tapauksissa selvisi, että menoveden kytkennät 3 ja 4 ovat herkempiä hinnan vaihtelulle kuin esilämmityksen kytkennät 1 ja 2. Mikään kytkentä ei ehdi maksamaan (koroton) investointia takaisin 15 vuoden aikana, mikäli lämmön hinta laskee lähelle 30 €/MWh. Sähkön hinnan

kohdalla esilämmityksen kytkentöjen takaisinmaksuajat nousivat maltillisesti sähkön hinnan kasvaessa. Korottomat takaisinmaksuajat pysyivät alle kymmenessä vuodessa, vaikka sähkön hinta asetettiin 100 €/MWh. Menoveden kytkennöillä takaisinmaksuaika nousi huomattavasti nopeammin sähkön hinnan kasvaessa. Sähkön ja lämmön hinnan vaikutukset ovat seurausta menoveden pienemmästä COP-luvusta sekä suuremmista tuotetun lämmön ja kulutetun sähkön tehosta.

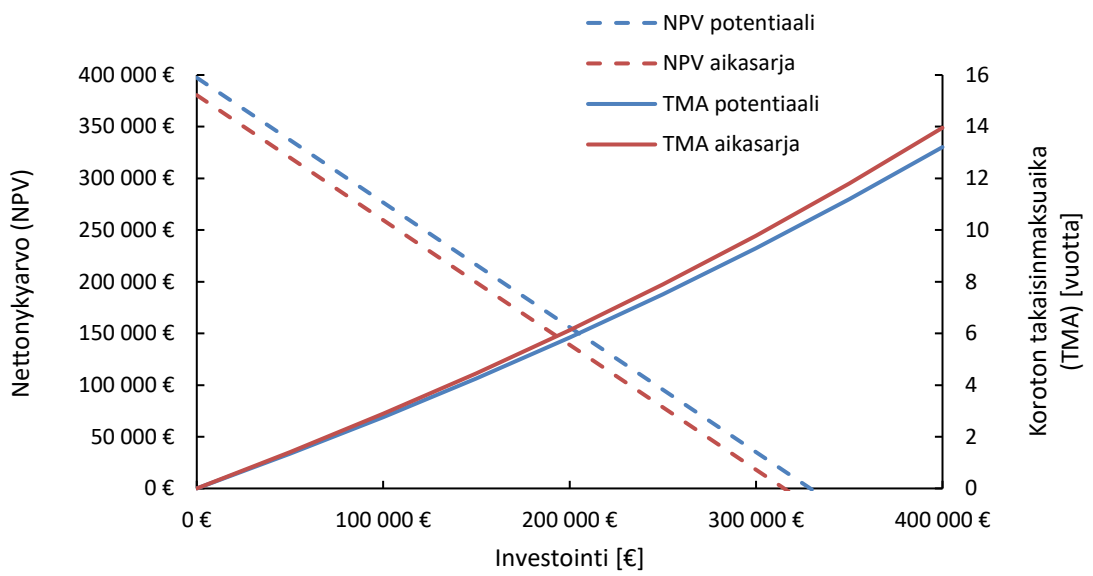
5.4 Menetelmän soveltuvuuden analysointi

Potentiaalin laskennassa luvussa 4.2 potentiaalit laskettiin sekä esilämmitykselle että menoveden lämmitykselle. Tulokset ovat samansuuntaisia kuin aikasarjalaskennan tulokset, mutta arvot eroavat hieman toisistaan. Potentiaalin laskemisen menetelmässä investointikustannuksia ei arvioida yhtä tarkasti kuin aikasarjalaskennassa eri kytkennöille. Taulukossa 20 on vertailtu kannattavuuden mittareita laskentatapojen suhteen.

Taulukko 20. Investointien kannattavuuslukujen vertailua aikasarjalaskennan ja potentiaalilaskennan tulosten välillä. K2 viittaa kytkentään 2 ja K4 vastaavasti kytkentään 4.

	ESILÄMMITYS		**MENOVESI**	
	Aikasarja (K2)	**Potentiaali (LP)**	**Aikasarja (K4)**	**Potentiaali**
Koroton takaisinmaksuaika	5.1	4.8	5.9	5.4
Korollinen takaisinmaksuaika	6.0	5.7	7.2	6.4
NPV	176 410 €	193 263 €	144 889 €	177 660 €
Sisäinen korko	18.1 %	19.2 %	14.8 %	16.7 %

Sekä esilämmitykselle että menoveden lämmitykselle potentiaalimenetelmä antaa paremmat kannattavuudet kuin aikasarjalaskenta. Yksi syy eroaville tuotoille voi olla sähkön hinnan pitäminen vakiona potentiaalin laskennassa. Tuntisähkön keskihinta vuonna 2019 oli noin 44 €/MWh, mikä on hyvin lähellä laskennassa käytettyä 45 €/MWh. Sähkön hintataso on kuitenkin korkeampi talvikuukausina kuin kesäkuukausina (Nordpool, 2019). Moottorit toimivat myös enemmän talvella kuin kesällä. Lämpöpumput kuluttavat omakäyttösähköä ja talven sähkön hinnoilla lämpöpumpun sähkön omakäyttökustannus on suurempi kuin laskettuna koko vuoden keskimääräisellä sähkön hinnalla. Kuvassa 20 sivulla 54 on vertailtu menetelmien tulosten riippuvuutta investoinnista.



Kuva 20. *Aikasarjalaskennan kytkennän 2 ja potentiaalin laskennan tulosten vertailua.*

Kuvan 20 mukaan potentiaalin laskennassa käytetty menetelmä antaa hyvin samanlaiset tulokset eri investoinneilla kuin aikasarjalaskenta. Sekä nettonykyarvo että takaisinmaksuaika käyttäytyvät samalla tavalla molemmilla eri laskentamalleilla. Potentiaalin laskenta antaa hieman paremmat tulokset verrattuna aikasarjalaskentaan. Mikäli lämpöpumpun käyttämän sähkön hinnaksi asetetaan 50 €/MWh alkuperäisen hinnan (45 €/MWh) sijasta, potentiaalilaskennan nettonykyarvon ja takaisinmaksuajan kuvaajat lähenevät aikasarjalaskennan vastaavia kuvaajia. Tämä vahvistaa käsitystä, että potentiaalin laskennassa eroja aikasarjalaskentaan aiheuttaa sähkön hinnan keskimääräisen arvon käyttäminen.

Potentiaalin sekä aikasarjalaskennan vertailua tehtiin myös eri COP-arvoille. Kuvaajat on esitetty liitteessä 5. Tulokset olivat pieniä COP-arvoja lukuun ottamatta hyvin samanlaisia. Pienillä COP-arvoilla vertailu antaa väärän kuvan, koska aikasarjalaskennassa käyttötuntien laskennassa käytetään lähtötietoina COP-arvoa. Potentiaalin laskennassa taas käyttötunnit pidetään vakiona jokaiselle COP-arvolle.

5.4.1 Varaston herkkyysanalyysi

Taulukossa 21 sivulla 55 on esitetty varaston korottamia takaisinmaksuaikoja eri investointikustannuksilla sekä säästetyn energian ja varastointi kapasiteetin suhteilla. Pystysarakkeessa on työssä tarkastellun 2.5 MWh:n varaston investointikustannus ja vaakarivillä vuosittaisen säästetyn energian suhde varaston kapasiteettiin. Lasketuissa tuloksissa investoinniksi oli oletettu 14 000 € ja suhteeksi 20.

Taulukko 21. Varaston korottoman takaisinmaksuaikoja laskennan eri oletusarvoilla. Korostettuna alle 15 vuoden takaisinmaksuajat.

Investoinnin suuruus	Säästetty energia/varaston kapasiteetti			
	5	10	15	20
10 000 €	**14.2**	**7.1**	**4.7**	**3.6**
20 000 €	**28.4**	**14.2**	**9.5**	**7.1**
30 000 €	**42.5**	**21.3**	**14.2**	**10.6**
40 000 €	**56.7**	**28.3**	**18.9**	**14.2**
50 000 €	**70.8**	**35.4**	**23.6**	**17.7**

Taulukon 21 perusteella varaston takaisinmaksuajat riippuvat lineaarisesti investoinnin suuruudesta sekä säästetyn energian ja varastointikapasiteetin suhteesta. Taulukon 21 mukaan varaston takaisinmaksuaika riippuu lineaarisesti molemmista muuttujista. Varaston takaisinmaksuaika alittaa pelkän lämpöpumpun takaisinmaksuajan ainoastaan, kun investointi on 10 000 € ja säästetyn energian suhde varastokapasiteettiin on 15 tai 20. Tulosten perusteella voidaan sanoa, että varaston käyttö tarkastellussa kohteessa ei merkittävästi paranna hukkalämmön hyödyntämisen kannattavuutta.

Kytkennälle 2 menetelmällä tarkasteltiin myös lämpövarastoinnin hyödyntämistä. Tuloksien mukaan varasto kasvattaisi potentiaalia. Menetelmän oletukset on kuitenkin muodostettu käyttäen kirjallisuudessa esitettyjä tietoja isommista kaukolämpöakuista. Investointikustannusten oletettiin nousevan lineaarisesti suhteessa varaston energiakapasiteettiin, mikä voi aiheuttaa virheen näin pienen kokoluokan lämpövarastossa. Lisäksi varaston energiakapasiteetin vaikutusta hyödynnettävissä olevan hukkalämmön hyödyntämiseen mallinnettiin yksinkertaisella oletuksella.

Varaston investointikustannuksia voidaan arvioida myös varaston tilavuuden perusteella. Varaston tilavuus riippuu kaavan (2) mukaan varaston kapasiteetin lisäksi myös varastoon tulevan ja sieltä poistuvan veden lämpötilaerosta. Kytkennän 2 lämpövarastoon sisään tulevan veden lämpötilaksi voidaan olettaa kaukolämpöverkon paluuveden lämpötila eli noin 45 ºC. Poistuvan veden lämpötilaksi voidaan olettaa 70 ºC, jolloin ΔT = 25 ºC. Lämpötilaero on selvästi pienempi kuin normaalilla kaukolämpöakulla, jonka lämpötilaero voi olla 40 – 50 ºC (Koivuniemi, 2014, s. 10, 33). Tarkastellun kohteen varasto voi siis vaatia lähes kaksinkertaisen tilavuuden kuin saman energiakapasiteetin

omaava kaukolämpöakku. Tilavuuden kasvaessa myös varaston investointikustannukset, kuten eristyskustannukset, tyypillisesti kasvavat. Lisäksi investointikustannusten muuttuminen lineaarisesti suhteessa kapasiteettiin voi aiheuttaa virheen investointikustannusten arvioinnissa. Koivuniemen (2014, s. 76) mukaan investointikustannukset tilavuusyksikköä [€/m³] kohden kasvavat, kun varaston kokonaistilavuus pienenee.

Varaston vaikutusta kasvatettuun hyödynnettävissä olevan hukkalämmön määrään on myös haastavaa arvioida universaalisti. Menetelmän oletus 1 MWh:n varastokapasiteetin kasvattavan hyödynnettävissä olevaa hukkalämpöä 20 MWh perustuu myös kaukolämpöakkuun, joka toimii vuoden ympäri. Todennäköisesti tämä oletus ei pidä paikkaansa työn esimerkkikohteessa, koska vuosittaisia käyttötunteja moottoreilla on vähän. Varastointiajat voivat kasvaa, koska käyttö ei ole välttämättä päivittäistä ja samalla myös lämpöenergian häviöt kasvavat.

5.5 Yleinen pohdinta

Työssä luotu menetelmä mahdollistaa helpon ja nopean tavan arvioida hukkalämmön taloudellista potentiaalia. Menetelmä sopii hyvin ensimmäiseksi analysointimenetelmäksi hukkalämmön hyödyntämisen tarkastelussa. Menetelmä kertoo, onko hyödyntäminen kannattavaa eli onko hyödyntämisen tutkimista järkevää jatkaa eteenpäin tarkempaan analysointiin. Lisäksi menetelmä antaa tulokseksi mahdolliset hyödyntämiskeinot, joihin kannattaa keskittyä syvällisemmin mahdollisessa jatkotutkimuksessa. Valmiit oletusarvot nopeuttavat ja yksinkertaistavat kannattavuuden analysointia.

Menetelmä vaatii kuitenkin kehittämistä. Merkittäviä kehityskohteita ovat hyödyntämiskeinojen oletus- ja investointiarvojen tarkastelu. Menetelmästä voitaisiin luoda työkalu, jonka tietokanta sisältäisi tarkempia arvoja esimerkiksi lämpöpumppujen COP-arvoista ja niiden investointikustannuksista. Kapasiteettieksponenttimenetelmän käyttö voisi myös auttaa investointikustannusten arvioinnissa. Erityistä lisätarkastelua vaativat varaston mitoitus- ja investointiarvot. Varaston kohdalla voi kuitenkin olla hyvin hankalaa löytää yleispätevää ja yksinkertaista menetelmää sen mitoittamiselle sekä taloudellisen kannattavuuden arvioimiselle. Menetelmällä ei kuitenkaan kyetä tunnistamaan hukkalämpöjen lähteitä. Näiden tunnistaminen voisi olla mahdollista energiataloudellisilla optimointimenetelmillä, kuten Pinch point -analyysillä. Hukkalämmön lähteiden tunnistamismenetelmä on yksi mahdollinen lisätutkimuskohde, joka tukisi tässä työssä luotua menetelmää.

6. YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli kehittää menetelmä hukkalämmön hyödyntämisratkaisujen kartoitukseen sekä niiden teknistaloudellisen kannattavuuden analysointiin. Menetelmä koostuu kolmesta eri vaiheesta. Ensimmäisessä vaiheessa tarkastellaan hukkalämmön lähdettä ja mahdollisia kulutuskohteita. Menetelmän toisessa vaiheessa, eli teknisessä tarkastelussa, kartoitettiin mahdolliset hyödyntämisratkaisut perustuen hukkalämmön lähteen ja lämmön kulutuskohteen ominaisuuksiin. Kolmannessa, eli taloudellisessa vaiheessa, arvioitiin hukkalämmön ja sen hyödyntämisen taloudellista potentiaalia.

Työn kirjallisuusselvityksessä selvisi, että Suomessa prosessiteollisuus, erityisesti metsäteollisuus, on merkittävin hukkalämmön lähde. Merkittävimmät hukkalämmön hyödyntämiseen vaikuttavat tekijät ovat lähteen ja kulutuskohteen lämpötilatasot sekä niiden tehotasojen aikaprofiilit. Mikäli hukkalämmön lähteen lämpötila on matalampi kuin kulutuskohteella, niin hyödyntämisessä tulee käyttää lämpöpumppua. Teho-aika-profiilien yhteensopivuutta voidaan taas parantaa lämpövarastojen avulla. Näiden lisäksi hukkalämmön hyödyntäminen voi vaatia esimerkiksi happamuutta kestäviä materiaaleja. Isossa kuvassa hukkalämmön hyödyntämistä voivat edistää kaukolämpöverkkojen lämpötilojen laskeminen sekä varastointi- ja lämpöpumpputeknologioiden kehitys.

Menetelmää sovellettiin kahdesta kaasumoottorista koostuvan voimalaitoksen hukkalämmön hyödyntämisen analysoinnissa. Menetelmän soveltuvuuden arviointia varten luotiin tarkempi vertailulaskenta. Tulosten mukaan luotu menetelmä soveltuu hyvin hukkalämmön taloudellisen potentiaalin analysointiin. Moottorivoimalaitoksen hukkalämmön hyödyntämisessä tarkasteltiin tarkoilla laskelmilla neljää erilaista kytkentää. Kannattavin vaihtoehto oli moottoreiden yhteisen lämpöpumpun käyttäminen esilämmityksessä. Tämän kytkennän korottomaksi takaisinmaksuajaksi saatiin 5,1 vuotta ja sisäiseksi korkokannaksi 18,1 %, joten investointi on niiden mukaan kannattava.

Jatkotutkimuksena kohteessa voitaisiin tarkastella moottorihallin jäähdytyksestä saatavan hukkalämmön hyödyntämistä sekä isomman lämpövaraston asentamista koko kaukolämpöverkkoa varten. Lämpövarasto voisi laskea moottorien sekä muiden laitosten käytön riippuvuutta kaukolämmön hetkellisestä kysynnästä ja parantaa näin kannattavuutta. Kehitetyssä menetelmässä pääpaino oli hyödyntämisratkaisujen valinnassa. Menetelmän jatkokehityksessä voitaisiin keskittyä enemmän hukkalämmön lähteiden tunnistamiseen. Työssä luotu menetelmä mahdollistaa yksinkertaisen ja nopean tavan arvioida hukkalämmön taloudellista potentiaalia.

LÄHTEET

Alanen, R., Koljonen, T., Hukari, S., & Saari, P. (2003) Energian varastoinnin nykytila, Espoo: VTT, s. 169, https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/tiedotteet/2003/T2199.pdf

Alva, G., Lin, Y., & Fang, G., (2018) An overview of thermal energy storage systems, Energy, Volume 144, s. 341-378, doi:https://doi-org.libproxy.tuni.fi/10.1016/j.energy.2017.12.037

Arpagaus, C., Bless, F., Uhlmann, M., Schiffmann, J., & Bertsch, S. S. (2018) High temperature heat pumps: Market overview, state of the art, research status, refrigerants, and application potentials, Energy, Volume 152, s. 985-1010, doi:https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.03.166

Bröckl, M., Immonen, I., & Vanhanen, J. (2014) Lämmön pientuotannon ja pienimuotoisen yli-jäämälämmön hyödyntäminen kaukolämpötoiminnassa, Gaia Consulting Oy, Saatavilla (viitattu 14.3.2020) https://energia.fi/files/981/Lammon_pientuotannon_ja_yli-jaamalammon_hyodyntaminen_kaukolampotoiminnassa20141215_.pdf

Brückner, S., Liu, S., Miró, L., Radspieler, M., Cabeza, L. F., & Lävemann, E. (2015) Industrial waste heat recovery technologies: An economic analysis of heat transformation technologies, Applied Energy Volume 151, s. 157-167, doi:https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.147

Cabeza, L. F. (2012) Thermal energy storage, Comprehensive Renewable Energy, Volume 3, s. 211-253, doi:https://doi-org.libproxy.tuni.fi/10.1016/B978-0-08-087872-0.00307-3

Dinčer, I., & Kanoğlu, M. (2010) Heat pumps (2nd ed.), John Wiley & Sons

Energiavirasto. (2019) Sähkön hintatilastot, Saatavilla (viitattu 31.5.2020): https://energiavirasto.fi/sahkon-hintatilastot

Fahlén, P. (2012) Capacity control of heat pumps, REHVA Journal, Volume 49 issue 5, s. 15. http://ri.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A964183&dswid=-2422

Galkin-Aalto, M. (2018). Jättimäinen luolalämpövarasto toteutetaan helsingin mustikkamaalle. Saatavilla (viitattu 27.3.2020): https://www.helen.fvanhanei/uutiset/2018/mustikkamaa_toteutus

Götze, U., Northcott, D., & Schuster, P. (2008) Investment appraisal, Springer

Harmaala, P. (2018). Suomessa kehitetty kuumalämpöpumppu mullistaa teollisuuden energiantuotannon, Saatavilla (viitattu 14.4.2020): http://www.calefa.fi/fi/ajankohtaista/suomessa-kehitetty-kuumalampopumppu-mullistaa-teollisuuden-energiantuotannon/

Helen (2020a) Helen jatkaa investointeja hiilineutraaliuteen: Helsinkiin uusi, maailman suurimpiin kuuluva lämpöpumppu, joka mahdollistaa kivihiilen käytön vähentämisen nopeammin. Saatavilla (viitattu 30.5.2020): https://www.helen.fi/uutiset/2020/uusi-lampopumppu

Helen (2020b) Katri Valan lämpöpumppulaitos, Saatavilla (viitattu 30.5.2020): https://www.helen.fi/helen-oy/energia/energiantuotanto/voimalaitokset/katri-vala

Huijbregts, W. M. M., & Leferink, R. G. I. (2004) Latest advances in the understanding of acid dewpoint corrosion: Corrosion and stress corrosion cracking in combustion gas condensates. Anti-Corrosion Methods and Materials, Vol. 51(3), s. 173-188, doi:10.1108/00035590410533129

IEA-ETSAP, & IRENA. (2013) Thermal Energy Storage Technology Brief, Saatavilla (viitattu 7.4.2020): https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2013/IRENA-ETSAP-Tech-Brief-E17-Thermal-Energy-Storage.pdf

Karhu, J. (2010) Kaukolämpöakun koon optimointi ja taloudellinen kannattavuus: Diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto, s. 92

Koivuniemi, A. (2014) Kaukolämpöakun kannattavuus yhdistetyssä sähkön ja lämmön tuotannossa

Koskelainen, L., Nuorkivi, A., Saarela, R., & Sipilä, K. (2006) Kaukolämmön käsikirja, Energiateollisuus ry, Helsinki

Juvonen, A. (2020) Nesteen 1000 miljoonan hanke etenee – kilpilahden hukkalämpö kattaisi neljäsosan pääkaupunkiseudun kaukolämmön tarpeesta, Kauppalehti, Saatavilla (viitattu 7.3.2020): https://www.kauppalehti.fi/uutiset/nesteen-1000-miljoonan-hanke-etenee-kilpilahden-hukkalampo-kattaisi-neljasosan-paakaupunkiseudun-kaukolammon-tarpeesta/27da87ec-01cd-454c-b6ad-a8a0bb372530

Lähteenaro, P. (2019) Kuumalämpöpumppujen sovelluskohteet ja potentiaali metsäteollisuudessa, diplomityö, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, s. 70

Luoranen, J. (2017) Teollisen kokoluokan lämpöpumppukoneikon tekniikka ja talous, diplomityö, Aalto-yliopisto, s. 85

Lyytikäinen, L. (2015) Uuden asuinalueen kaksisuuntaisen kaukolämpöratkaisun asiakasta, diplomityö, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, s. 120

Maaskola, I., & Kataikko, M. (2014) Ylijäämälämmön taloudellinen hyödyntäminen lämpöpumppu- ja ORC-sovellukset, Motiva Oy, Helsinki, s. 68

Männistö, H., Bergring, C., & Salin, J. (1980) Energiankäytön tehostaminen puumassa- ja paperiteollisuudessa. Kauppa- ja teollisuusministeriö, Helsinki

Miró, L., Gasia, J., & Cabeza, L. F. (2016). Thermal energy storage (TES) for industrial waste heat (IWH) recovery: A review. Applied Energy, 179, s. 284-301, doi:10.1016/j.apenergy.2016.06.147

Motiva. (2019a) Energiatehokkuusdirektiivi, Saatavilla (viitattu 3.3.2020): https://www.motiva.fi/ratkaisut/ohjauskeinot/direktiivit/energiatehokkuusdirektiivi

Motiva. (2019b). Energiatehokkuussopimukset. Saatavilla (viitattu 3.3.2020): https://www.motiva.fi/ratkaisut/ohjauskeinot/energiatehokkuussopimukset

Motiva. (2019c) Ylijäämälämmön potentiaali teollisuudessa, Motiva Oy, Helsinki, s. 38, Saatavilla (viitattu 22.3.2020): https://www.motiva.fi/files/16214/Esiselvitys_-_Ylijaamalammon_potentiaali_teollisuudessa.pdf

Neilimo, K., & Uusi-Rauva, E. (1999) Johdon laskentatoimi (2. painos), Oy Edita Ab, Helsinki, s. 338

Nord Pool. (2019) Historical market data. Saatavilla (viitattu 31.5.2020): https://www.nordpoolgroup.com/historical-market-data/

Persson, U. (2015). Quantifying the excess heat available for district heating in europe, Stratego Project, Saatavilla (viitattu 8.4.2020): https://heatroadmap.eu/wp-content/uploads/2018/09/STRATEGO-WP2-Background-Report-7-Potenital-for-Excess-Heat.pdf

Pesola, A., Bröckl, M., & Vanhanen, J. (2011) Älykäs kaukolämpöjärjestelmä ja sen mahdollisuudet. ().Gaia Consulting Oy, Saatavilla (viitattu 24.3.2020): https://docplayer.fi/2848107-Alykas-kaukolampojarjestelma-ja-sen-mahdollisuudet.html

Raiko, M., & Mäki-Mantila, E. (2005) Lämpöpumput ja niiden vaikutus sähköntuotantoon, Kauppa- ja teollisuusministeriö

Sadeharju, K. (2014) Maakaasukäyttöisten polttomoottorivoimalaitosten pakokaasujen lämmöntalteenotto, diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto, s. 110

Sarbu, I., & Sebarchievici, C. (2018) A comprehensive review of thermal energy storage. Sustainability, Vol. 10 (issue 2), doi:10.3390/su10010191

Schmidt, D., & Kallert, A. (2017) Future low temperature district heating design guidebook. final report: Annex TS1 low temperature district heating for future energy systems, Frankfurt am Main: AGFW-Project Company, Saatavilla (viitattu 3.4.2020): https://www.euroheat.org/wp-content/uploads/2017/12/IEA-Annex-TS1-Final-Report.pdf

Sebbas, E. (1977) Sekundääri- ja jätelämmön hyväksikäyttö, Energian käyttö kemiallisessa metsäteollisuudessa, s. 1-21

Shah, R. K., & Sekulić, D. P. (2003) Fundamentals of heat exchanger design, Hoboken, NJ: Wiley, Saatavilla (viitattu 8.8.2020): http://www.loc.gov/catdir/toc/wiley023/2002010161.html

Suomala, P., Manninen, O., & Lyly-Yrjänäinen, J. (2011) Laskentatoimi johtamisen tukena, Edita, Helsinki

Tilastokeskus. (2020) Kaukolämmön hinta kuluttajatyypeittäin, Saatavilla (viitattu 3.11.2020): http://pxnet2.stat.fi/PXWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin__ene__ehi/statfin_ehi_pxt_007_fi.px/table/tableViewLayout1/

Tilastokeskus, & Energiavirasto (2020) Tilasto: Energian hinnat, Saatavilla (viitattu 3.11.2020): http://www.stat.fi/til/ehi/2020/02/ehi_2020_02_2020-09-10_kuv_005_fi.html

Tiitinen, M. (2019) Kiinteistön hukkalämmön myyminen: Kytkennät, huomioitavat asiat, esitys SuLVIn suunnittelijapäivät, Saatavilla (viitattu 4.3.2020): https://sulvi.fi/wp-content/uploads/2019/02/Suunnittelijap%C3%A4iv%C3%A4-2019-Mirja-Tiitinen.pdf

Tornberg, A. (2015) Leijukattilan savukaasujen loppulämpötilan hallinta, diplomityö, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, s. 125

Valtioneuvosto. (2019) Pääministeri Antti Rinteen hallituksen ohjelma 6.6.2019 : OSALLISTAVA JA OSAAVA SUOMI – sosiaalisesti, taloudellisesti ja ekologisesti kestävä yhteiskunta. Saatavilla (viitattu 12.5.2020) http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/161662

Verohallinto. (2019a) Energiaverotus, Saatavilla (viitattu 12.5.2020): https://www.vero.fi/syventavat-vero-ohjeet/ohje-hakusivu/56206/energiaverotus/

Verohallinto. (2019b) Sähkön ja eräiden polttoaineiden verotaulukot, Saatavilla (viitattu 12.5.2020): https://www.vero.fi/yritykset-ja-yhteisot/tietoa-yritysverotukses-ta/valmisteverotus/sahko_ja_eraat_polttoaineet/sahkon_ja_eraiden_polttoaineiden_verota/

Vuorinen, L. (2019). Kannattavuusmalli datakeskuksen hukkalämmön hyödyntämiseen kaukolämpöverkossa, diplomityö, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, doi:https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/159119/Diplomity%C3%B6_Vuorinen_Laura.pdf?sequence=1&isAllowed=y

YIT, Energiateollisuus ry, & Työ- ja elinkeinoministeriö. (2010) Teollisuuden ylijäämälämmön hyödyntäminen kaukolämmityksessä

Ympäristöministeriö. (2012) Kotimaista polttoainetta käyttävien 0,5…30 MW kattilalaitosten tekniset ratkaisut sekä palamisen hallinta. Saatavilla: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=2ahUKEwj7lsSr1I_pAhWKyKYKHQ9RCBcQFjAAegQIAxAB&url=https%3A%2F%2Fwww.ymparisto.fi%2Fdownload%2Fnoname%2F%257BC1EA01A4-C78E-4152-A601-3AE51323EDEB%257D%2F119826&usg=AOvVaw3aDMwuUPXCjXsLEdT1Q9Kf

Xu, Z. Y., Mao, H. C., Liu, D. S., & Wang, R. Z. (2018) Waste heat recovery of power plant with large scale serial absorption heat pumps, Energy, Volume 165, s. 1097-1105, doi:10.1016/j.energy.2018.10.052

LIITTEET

Liite 1. Esimerkkikohteeseen liittyviä rajoitteita

Liite 2. Potentiaalin laskeminen

Liite 3. Aikasarjalaskennan vuosittaisia tuottoja.

Liite 4. Aikasarjalaskennan herkkyystarkastelu: pitoajan, laskentakorkokannan vaikutus sekä sähkön ja lämmön hintojen vaikutus eri kytkentöjen kannattavuuksiin.

Liite 5. Potentiaalin ja aikasarjan herkkyystarkastelu COP-arvosta riippuen.

Liite 1. Esimerkkikohteeseen liittyviä rajoitteita

Rajoite	Millaisia rajoitteita asettaa hukkalämmön hyödyntämiselle	Kuinka rajoite voidaan kiertää
Tila	Lämpöpumppujärjestelmälle ja prosessimuutoksille oltava tilaa. Ei tarkastella tässä työssä	Laitteistojen tilatarpeet kartoitetaan tarkemmassa suunnittelussa. Laitteiston sijainnin muutokset.
Hukkalämmön lauhdutuslämpötila	Lauhdutuslämpötila 40 ºC. Tärkeä moottorien toiminnan kannalta.	Ei voida kiertää. Rajoittaa saatavilla olevaa hukkalämpötehoa.
Kaukolämpöverkon paluuveden lämpötila	Antaa minimilämpötilan esilämmitykseen käytettävän lämmön lämpötilalle. Mitoitusarvona 45 ºC paluulämpötila. Lämmönvaihtimen pinta-ala voi olla iso, jos lämpötilaero pieni.	Turbon jäähdytyksestä tulevan lämmön lämpötilan priimaus lämpöpumpulla. Ongelma poistuu, jos ylijäämälämpö syötetään menopuolelle.
Kaukolämpöverkon menopuolen lämpötila	Määrittää minimilämpötilan priimatulle lämmölle. Mitoitusarvo 110 ºC, vaadittu minimiarvo tällöin 115 ºC. Lämmönvaihtimen pinta-ala voi olla iso, jos lämpötilaero pieni.	Korkean lämpötilan lämpöpumpulla. Kaukolämpöverkon lämpötilojen vaihtelun analysointi ja lämpöpumpun mitoituksen optimointi.
Moottorin kuumapiirin jäähdytys ja pakokaasukattila	Kuumapiiri ja pakokaasukattila syöttävät lämpöä kaukolämpöverkkoon. Paluuveden esilämmitys voi aiheuttaa haittoja näiden toiminnassa. Kuumapiirin jäähdytystarpeen toteutuminen moottorin toiminnan kannalta tärkeä, HT-piirin lämmönvaihtimelle menevän kaukolämpöveden lämpötila on 65 ºC.	Voidaan kiertää prosessimuutoksilla, mutta voi nostaa kustannuksia.

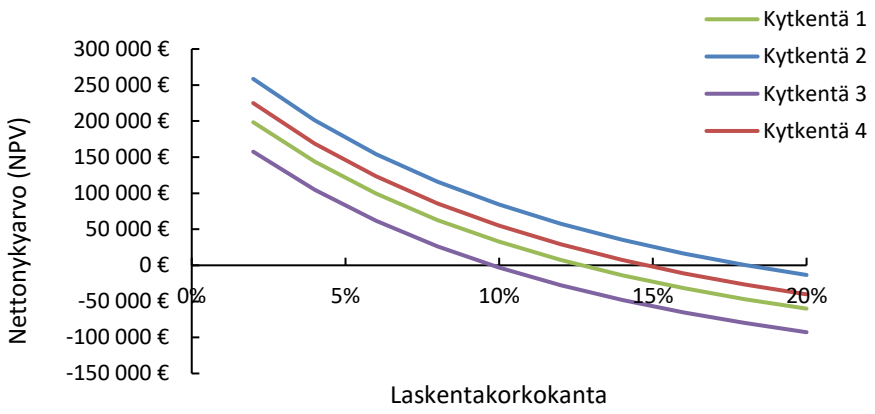
Liite 2. Potentiaalin laskeminen

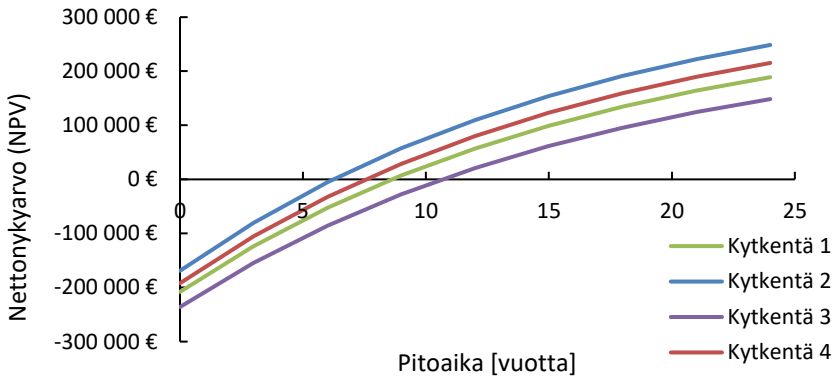
	Esilämmitys (LP)	Esilämmitys (LP + var.)	Menovesi (LP)
COP	4.33	4.33	3.1
Käyttötunnit	1650	1775	1650
Tuotettu energia	858	923	974
Kulutettu sähkö	198	213	314
Tuotot lämmöstä	47 201 €	50 777 €	53 586 €
Kustannukset sähköstä	8 919 €	9 595 €	14 143 €
Tuotto	38 282 €	41 182 €	39 443 €
Investointi	169 039 €	183 039 €	191 905 €
Annuiteetti	-16 286 €	-17 634 €	-18 489 €
Huoltokustannukset	3 381 €	3 661 €	3 838 €
Tuotto huoltokustannusten jälkeen	34 901 €	37 521 €	35 605 €
Potentiaali [€/a]	18 616 €	19 887 €	17 116 €
Hukkalämmön kustannukset	33.31 €/MWh	33.46 €/MWh	37.43 €/MWh

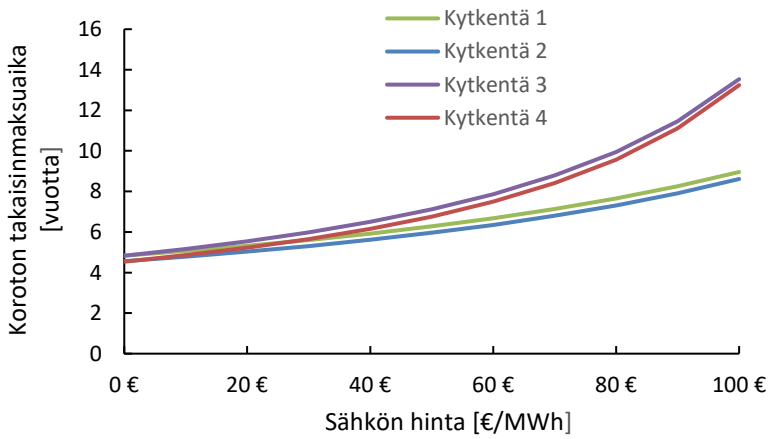
Liite 3. Aikasarjalaskennan vuosittaisia tuottoja.

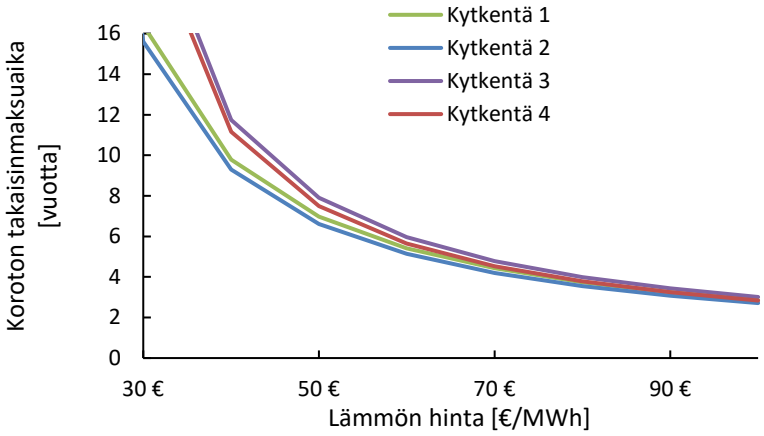
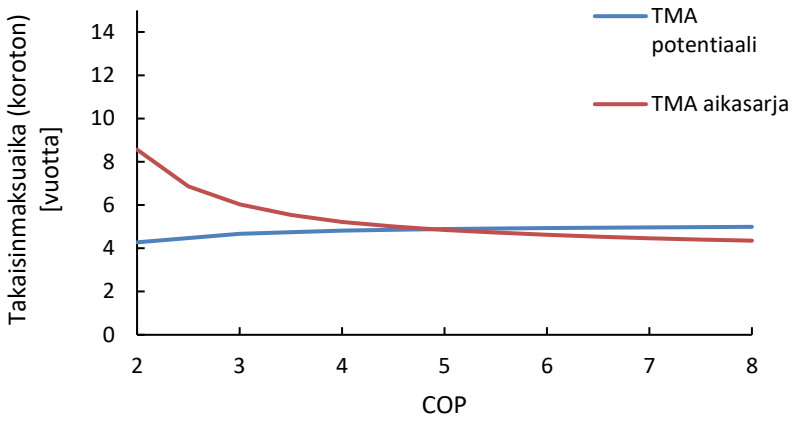
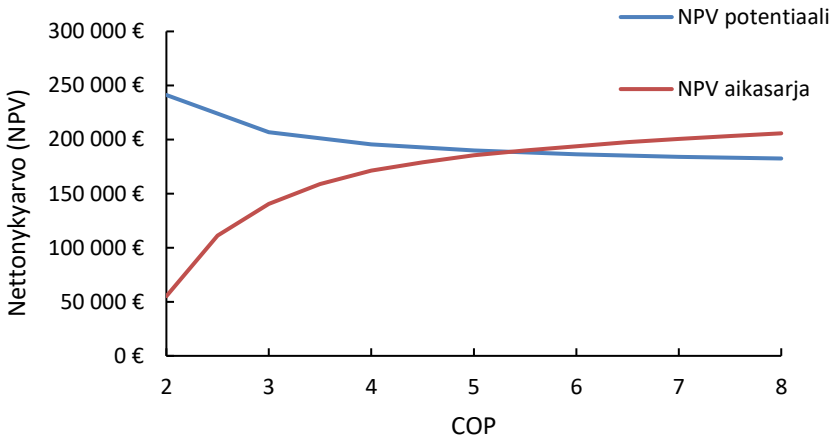
	Kytkentä 1	Kytkentä 2	Kytkentä 3	Kytkentä 4
Moottori 1				
Käyttötunnit [h/a]	1 960		1 953	
Hukkalämpöteho keskimäärin [kW]	195		194	
Sähkön kulutus [MWh]	119		187	
Lämmön tuotanto [MWh]	511		578	
Tuotto	21 160 €		20 865 €	
Moottori 2				
Käyttötunnit [h/a]	1 343		1 336	
Hukkalämpöteho keskimäärin [kW]	197		197	
Sähkön kulutus [MWh]	81		128	
Lämmön tuotanto [MWh]	350		395	
Tuotto	14 633 €		14 488 €	
Yhteensä				
Käyttötunnit [h/a]	3303	1637	3289	1621
Hukkalämpöteho keskimäärin [kW]	196	342	196	342
Sähkön kulutus [MWh]	200	225	315	362
Lämmön tuotanto [MWh]	861	903	973	1040
Tuotto	35 793 €	36 658 €	35 353 €	36 297 €

Liite 4. Aikasarjalaskennan herkkyystarkastelu: pitoajan, laskentakorkokannan vaikutus sekä sähkön ja lämmön hintojen vaikutus eri kytkentöjen kannattavuuksiin.








Kytkentä 1
Kytkentä 2
Kytkentä 3
Kytkentä 4
Koroton takaisinmaksuaika [vuotta]
16
14
12
10
8
6
4
2
0
30 €
50 €
70 €
90 €
Lämmön hinta [€/MWh]

Liite 5. Potentiaalin ja aikasarjan herkkyystarkastelu COP-arvosta riippuen.