



# **LÄMPÖPUMPUN JA LÄMPÖAKUN YHTEISKÄYTTÖ KAUKOLÄMMÖN TAI PROSESSIHÖYRYN TUOTANNOSSA**

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Energiatekniikan kandidaatintyö

2023

Matias Suortti

Tarkastaja: Tutkijatohtori Eero Inkeri

## TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT School of Energy systems

Energiatekniikka

### **Lämpöpumpun ja lämpöakun yhteiskäyttö kaukolämmön ja prosessihöyryn tuotannossa**

Energiatekniikan kandidaatintyö

2023

30 sivua, 4 kuvaa, 10 taulukkoa, 1 liite

Tarkastaja: Tutkijatohtori Eero Inkerö

Avainsanat: Lämpöpumppu, Lämpövarasto

Tässä työssä tutkitaan lämpöpumpun ja lämpövaraston yhteiskäytön mahdollisuuksia teollisuudessa. Työ on tehty yhteistyössä Elstor Oy:n kanssa, joka valmistaa lämpöakkuja teollisuuteen. Elstor OY määritteli työssä tutkittavat tapaukset. Lämpöpumppu on rajattu tässä työssä ilmalämpöpumpuksi, ja lämpövarasto ladataan sähköllä. Laskelmat suoritetaan käyttäen yleismaallisia oletuksia ja alkuarvoja.

Työssä tutkitaan lämpöpumpun ja lämpövaraston yhteiskäytön käyttökustannuksia, ja verrataan niitä pelkän lämpövaraston käyttökustannuksiin. Käyttökustannuksien avulla arvioidaan lämpöpumppuinvestoinnin kannattavuutta jo olemassaolevan lämpövaraston rinnalle. Kannattavuutta arvioidaan takaisinmaksuaikamenetelmän avulla. Tutkittavia kohteita ovat kaukolämmön tuotanto ja matalalämpöisen prosessihöyryn tuotanto.

Työn keskeisimpänä tuloksena voidaan pitää sitä, että lämpöpumpputeknologialla voidaan tehdä lämpöä taloudellisesti myös teollisiin tarkoituksiin. Suurin taloudellinen potentiaali havaittiin kohteissa, joissa lämpöpumpun lämmitysosuus koko lämmitysprosessista on suuri. Tällaisia kohteita olivat kaukolämpö ja matalalämpöinen prosessihöyry. Sähkön hinta aiheutti huomattavasti vaihtelua työssä tehtyjen laskelmien lopputuloksiin.

## SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

### Roomalaiset

$p$	paine	[bar, Pa]
$q_m$	massavirta	[kg/s]
$R$	ainekohtainen kaasuvakio	[J/(kg K)]
$T$	lämpötila	[°C, K]
$s$	ominaisentropia	[kJ/kgK]
$h$	entalpia	[kJ/kg]

### Kreikkalaiset

$\eta$	hyötysuhde	[-]
$\varepsilon$	tehokerroin	[-]

### Alaindeksit

min	minimi
max	maksimi

### Lyhenteet

ASHP	ilmalämpöpumppu (Air Source Heat Pump)
COP	lämpöpumpun tehokerroin (Coefficient Of Performance)
GSHP	maalämpöpumppu (Ground Source Heat Pump)
WSHP	Vesilämpöpumppu (Water Source Heat Pump)

## Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Symboli- ja lyhenneluettelo

1	Johdanto.....	5
2	Lämpöpumppu.....	6
2.1	Johdanto lämpöpumppuihin .....	6
2.2	Lämpöpumpun lämmönlähteet.....	7
2.3	Lämpöpumpun toimintaperiaate .....	8
2.4	Lämpöpumpun tehokerroin.....	10
3	Laskenta.....	12
3.1	Alkuarvot.....	12
3.2	Oletukset ja rajaukset .....	12
3.3	Sähkön hinta.....	13
3.4	Kaukolämpöveden- ja prosessihöyryntuotannon laskelman vaiheet .....	14
3.5	Esimerkkilasku kustannuksista kaukolämmön tuotannossa.....	16
3.6	Investoinnin takaisinmaksuaika .....	17
4	Tulokset .....	20
4.1	Lämpöpumpun ja lämpövaraston yhteiskäyttö kaukolämmön tuotannossa.....	20
4.2	Lämpöpumpun ja lämpövaraston yhteiskäyttö prosessihöyryn tuotannossa .....	21
4.3	Takaisinmaksuaika eri tapauksissa .....	24
5	Johtopäätökset .....	26
	Lähteet .....	28

Liitteet

Liite 1. Veden ja vesihöyryn ominaisentalpioita taulukoituna lämpötilan mukaan vakiopaineessa (1 bar).

# 1 Johdanto

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on tutkia lämpöpumpun ja lämpöakun yhteiskäytön teknillistaloudellisia mahdollisuuksia. Työ on kirjoitettu yhteistyössä Elstor Oy:n kanssa, joka on keskikokoisia, teollisuudessa käytettäviä lämpöakkuja valmistava yritys. 2000-luvulla alkanut energiakriisi, joka syveni entisestään vuoden 2022 helmikuussa Venäjän hyökkäyssodan takia, on ajanut yritykset hakemaan energiatehokkaita ratkaisuja. Työn tavoitteena onkin tutkia lämpöpumpun ja lämpövaraston mahdollisuuksia energiankäytön vähentämisessä sekä sähkön kulutushuippujen tasaamisessa.

Lämpöpumpulla voidaan vähentää huomattavasti energiankulutusta esilämmittämällä kaukolämpö- ja prosessivesi. Lämpöpumppujen käyttöä rajoittaa niiden tuottaman lämmön loppulämpötila, joka jää nykyisellä teknologialla melko alhaiseksi. Ongelman ratkaisemiseksi käytetään lämpöakkuja, joka pystyy nostamaan veden tai höyryn lämmön riittävän korkeaksi.

Lämpöpumppu- ja lämpöakuteknologiasta on tehty paljon tutkimusta. Tämä työ tutkii niiden yhteiskäyttöä, jolla pyritään tuottamaan korkean lämpötilan lämpöä. Järjestelmän kannattavuuteen vaikuttaa merkittävästi sähkön hinta, joka on viime vuosina heilahdellut huomattavasti. Tämän takia tutkimusta on tehty kolmen viime vuoden arvoilla.

Työn rakenne etenee suoraviivaisesti teoriaosuudesta laskentaosuuteen, jonka jälkeen esitetään keskeisimmät tulokset kustannuksien näkökulmasta. Tuloksissa vertaillaan lämpöpumpun ja lämpöakun yhteiskäytön käyttökustannuksia pelkän lämpöakun käyttökustannuksiin. Lisäksi lämpöpumpun korvausinvestoinnin kannattavuutta arvioidaan takaisinmaksuajan avulla.

## 2 Lämpöpumppu

Lämpöpumppujen teoriaosuudessa kerrotaan lyhyesti lämpöpumppujen historiasta, niiden ylesimmistä käyttökohteista sekä niiden toimintaperiaatteesta. Tässä työssä perehdytään tarkemmin kylmähöyryprosessiin perustuvan lämpöpumpun toimintaan.

### 2.1 Johdanto lämpöpumppuihin

Aikaisimmat lämpöpumput kehitettiin ruuan säilömistä varten. Lämpöä oli tarve siirtää pois ruoasta, jotta se säilyisi pidempään. Haihtumista, veden latenttia lämpöä käytettiin hyväksi jo muinaisessa Egyptissä juomien viilentämiseen pitämällä niitä huokoisissa saviastioissa. Ajan myötä ruuan viilentämiseen keksitiin jääkaappi, joka on esimerkki jäähdytyskoneesta. Termodynamiikan toisen pääsäännön mukaan lämpö siirtyy luonnostaan kuumemmasta kohteesta kylmempään. Jotta lämpö saadaan siirtymään kylmästä lämpimään, on prosessiin tuotava työtä. Jääkaapissa kompressori tekee työtä prosessiin. Jääkaapin palautuvaa jäähdytyskoneprosessia voidaan kutsua myös Carnot-jäähdytyskoneeksi tai Carnot-lämpöpumpuksi. (Wikstén, 1996, 135–137)

Jäähdytyskoneen tavoin myös lämpöpumppujen tarkoituksena on siirtää lämpöä kylmemmästä lämmönlähteestä lämpimämpään kohteeseen käyttäen sähköä tai mekaanista energiaa. Lämmön lähteenä voi toimia esimerkiksi ulkoilma, vesi tai maa. Lämpöpumppu siirtää siis lämpöä kohteesta, jossa sitä ei tarvita. Teollisuudessa tällaisia kohteita ovat esimerkiksi jätevedet, jotka voivat olla hyvinkin lämpimiä. (Grassi, 2018, 1)

Lämpöpumppujen käyttöä puoltaa globaali ilmastokriisi sekä Euroopassa 2020 luvulla alkanut energiakriisi, jossa tarvitaan energiatehokkaita ratkaisuja. Energian kallistuessa yritysten tuotantokustannukset ovat nousseet huomattavasti, joka ajaa valmistajat etsimään entistä energiatehokkaampia ratkaisuja. Lämpöpumpulla voidaan tehokkaasti hyödyntää hukkalämpökohteet, jolloin rakennusten sekä teollisten prosessien energiatehokkuus paranee. Lämpöpumppujen lämmönlähteet ovat myös usein uusiutuvia, esimerkiksi ilma ja maalämpö. Jos lämpöpumpun kompressorin energialähteenä käytetään uusiutuvaa sähköä, on koko järjestelmä uusiutuvalla energialla toimiva.

Noin 50% koko euroopan energiatarpeesta käytetään lämmitykseen, josta 75 % toteutetaan fossiilisilla polttoaineilla (Gaur, 2021, 1). Yleisesti lämmitykseen käytetyt lämpöpumput tuottavat lämpöä melko mataliin, noin 50 °C loppulämpötiloihin. Lämpöpumppujen toiminta alue on kuitenkin suurempi, yltäen jopa 165 °C lämpötiloihin. (Arpagaus, 2018). Kiinteistöjen lämmityksen lisäksi kuumalämpöpumpuilla on suuri potentiaali erityisesti teollisuudessa. Erityisesti matalalämpöinen prosessihöyry voidaan tuottaa helposti kuumalämpöpumpuilla. Nellissenin ja Wolfen (2015, 11) mukaan euroopan markkinoilla lämpöpumpuilla on 174 TWh potentiaali aina 150 °C prosessihöyryyn asti.

## 2.2 Lämpöpumpun lämmönlähteet

Ulkoilmaa lämmönlähteenä käyttävien lämpöpumppujen (ASHP eng. Air Source Heat Pump) tyypillisiä piirteitä ovat matalat investointikustannukset, ja ne ovatkin siksi käytetyimpiä lämpöpumppuja kotitalouksien lämmittämisessä. Ilmalämpöpumppujen suosio johtuu myös osaltaan siitä, että niitä voidaan käyttää myös jäähdytykseen lämpimissä olosuhteissa. ASHP:n suorituskyky riippuu kuitenkin paljon ympäristön olosuhteista, ja kylmällä ilmalla ASHP:n tehokkuus voi laskea hyvinkin alhaiseksi (Gaur, 2021, 3).

Vettä lämmönlähteenä käyttävistä lämpöpumpuista käytetään lyhennettä WSHP (Water Source Heat Pump). Lämmönlähteenä voi toimia vesistö tai esimerkiksi jätevedet. Toisin kuin ASHP:n tapauksessa, WSHP:n lämmönlähteen lämpötila pysyy melko vakiona, joka tekee sen käytöstä melko ennustettavan. Vesistöjen lämpötilan vaihtelu on melko pientä, sekä iso vesistö sitoo lämpöä helposti koko talven tarpeisiin. WSHP:n huonona puolena voidaan pitää sen investointikustannuksia, jotka ovat suuremmat kuin ASHP:n. Sen käyttöä rajoittaa myös tarve olla lämmönlähteen eli vesistön läheisyydessä. (Gaur, 2021, 3.)

Kolmantena lämmönlähteenä voidaan käyttää maan lämpöä. Maalämpöä lämmönlähteenä käyttävistä lämpöpumpuista käytetään lyhennettä GSHP (Ground Source Heat Pump). Suomen kielessä vakiintunut termi on maalämpöpumppu. Maalämpöpumpun hyvä puoli on sen ennustettavuus. Maan lämpö vaihtelee hyvin vähän vuodenajan mukaan, minkä takia se sopii erityisesti kylmiin olosuhteisiin. Maalämpöpumpun tehokkuus voi kuitenkin huonontua ajan kuluessa maan viilentyessä. Maalämpöpumpun investointikustannukset ovat kolmesta

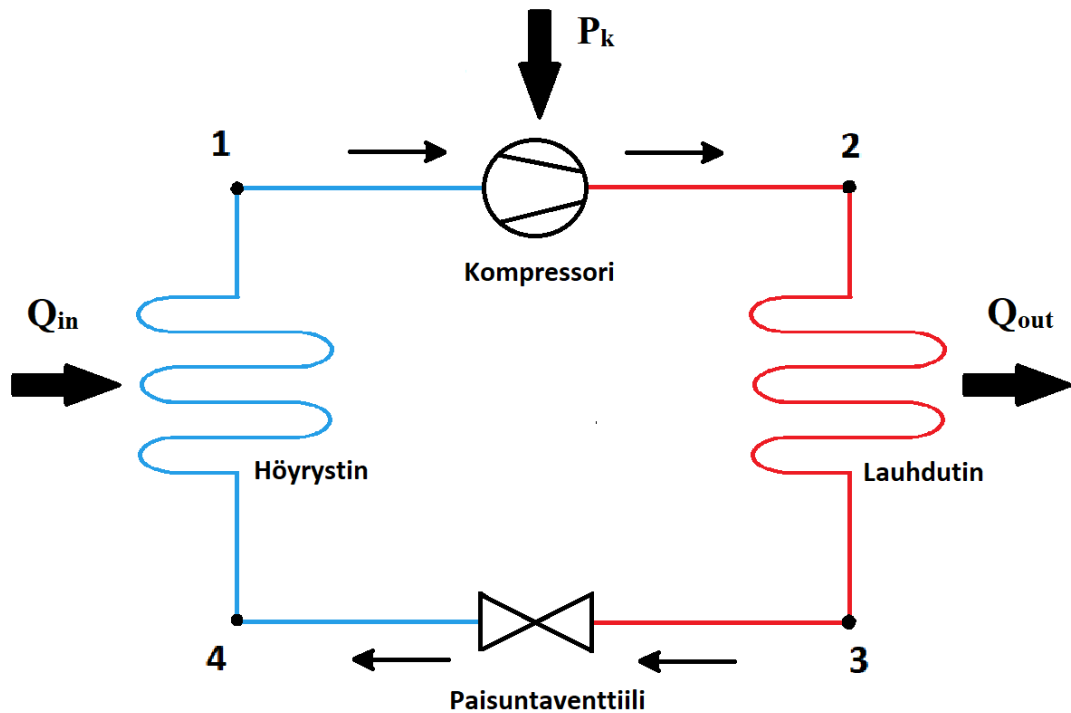
lämpöpumpputyypistä suurimmat, sillä maahan porattavan reiän kustannukset ovat korkeat. Maalämpöpumppuinvestointi vaatii myös tarkkaa tutkimusta paikallisista Geologisista olosuhteista. (Gaur, 2021, 5.)

### 2.3 Lämpöpumpun toimintaperiaate

Lämmönsiirto lämpöpumpuissa tehdään kylmäaineen avulla. Yleisin lämpöpumpun toimintaperiaate perustuu kylmähöyryprosessiin. (Mc Mullan & Morgan, 1981, 6). Kylmähöyryprosessia kutsutaan myös käänteiseksi Clasius- Rankine prosessiksi. Siinä lämpöpumpun kylmäaine siirtää lämpöä varastoimalla sitä latentiksi lämmöksi muuttamalla olomuotoaan nesteen ja kaasun välillä. Höyrystimessä nestemäinen kylmäaine höyrystyy, jolloin lämpö varastoituu kylmäaineen latentiksi lämmöksi. Latentti lämpö vapautuu lauhduttimessa kylmäaineen tiivistyessä nesteeksi. Samalla vapautuu myös lämpö, mitä on varastoitunut työaineeseen kompressorissa.

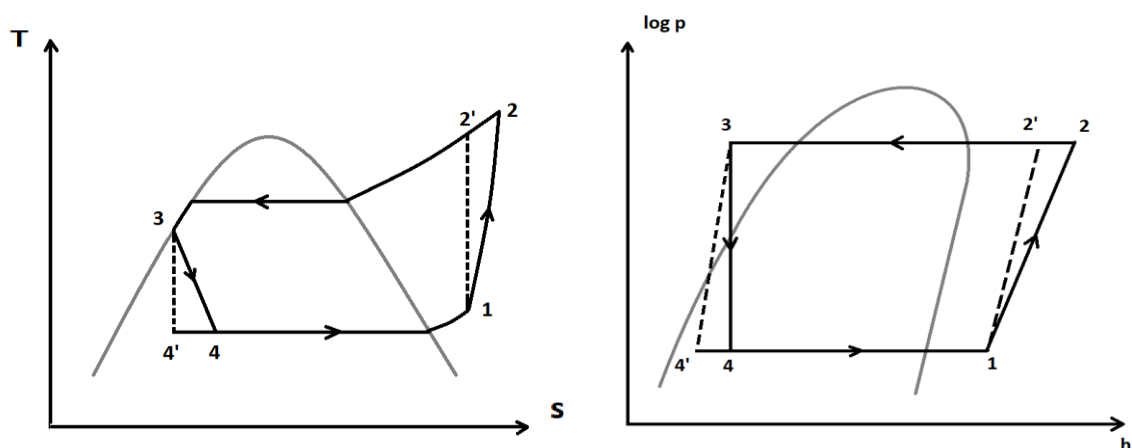
Yleisesti lämpöpumput toimivat sähköllä pyöritetyllä kompressorilla ja ottavat lämpönsä ympäristöstä. Lämpöpumpun pääkomponentit ovat kompressorin, lauhdutin, paisuntaventtiili sekä höyrystin. Nämä osat ovat yhdistettynä toisiinsa putkistolla, jossa kiertää kylmäaine. Kylmähöyryprosessiin perustuvan lämpöpumpun komponenttien sijoittelu voidaan nähdä kuvasta 1.





Kuva 1. Kylmähöyryprosessiin perustuvan lämpöpumpun komponenttien asettelu

Lämpöpumpussa tapahtuu käänteinen Clausius-Rankine Prosessi. Käänteinen Clausius-Rankine prosessi voidaan esittää kuvan 2 mukaisesti  $T,s$ -Tasossa ja  $\log p,h$ -tasossa. Kuvissa harmalla piirretty kaari erottaa nesteen, höyryn- ja nestehöyry- faasin toisistaan. (Wiksten, 1996, 139–141)



Kuva 2. Käänteinen Clasius-Rankine-prosessi esitettynä  $T,s$ - ja  $\log p,h$ -tasossa (Wiksten, 1996, 137).

Kuvan 2 mukaisen käänteisen Claius-Rankine prosessin vaiheet:

- 1-2 Työaineen todellinen puristus. Työaine siirtyy kaasuna kompresso-  
riin, jossa sen painetta nostetaan ja sitä tulistetaan.
- 1-2' Työaineen isentrooppinen puristus
- 2-3 Korkeapaineinen, tulistettu kaasu kulkee lauhduttimen läpi, jolloin  
se luovuttaa lämpöään ympäristöön ja lauhtuu samalla nesteeksi
- 3-4 Korkeapaineinen neste kulkee paisuntaventtiilin läpi, jolloin sen  
paine ja lämpötila tippuu.
- 3-4' Kaasun isentrooppinen paisunta
- 4-1 Matalapaineinen neste kulkee höyrystimen läpi, jolloin se höyrystyy  
ja kerää samalla lämpöä ympäristöstään.

#### 2.4 Lämpöpumpun tehokerroin

Lämpöpumppujen tehokkuutta voidaan vertailla saadun lämpötehon ja käytetyn kompresso-  
ritehon suhteella. Tästä tehokertoimesta käytetään lyhennettä COP (Coefficient of Perfor-  
mance). Tehokertoimsta voidaan käyttää myös nimitystä Carnot-lämpökerroin  $\varepsilon_L$  (Wikstén,  
1996, 137). Mitä korkeampi COP, sen tehokkaampi lämpöpumppu. Perinteisissä lämmitys-  
laitteissa COP on alle yhden, sillä niistä tulee lämpöhäviöitä ympäristöön. Lämpöpumpuissa  
COP on yleisesti noin 3, riippuen lämmönlähteen lämpötilasta sekä tarvittavasta loppuläm-  
pötilasta. (Lun, 2020, s.5)

Ideaalinen, Carnot- prosessiin perustuva lämpöpumpun tehokerroin voidaan laskea yhtälöstä

$$\varepsilon_L = COP = \frac{Q_{out}}{W} = \frac{T_{max}}{T_{max} - T_{min}} \quad (1)$$

Käytännössä tehokerroin ei kuitenkaan koskaan ole yhtä iso kuin ideaalisesti laskettu. Tämä  
johtuu siitä, että että lämpöpumpun jokaisessa komponentissa tapahtuu häviöitä. Todellista

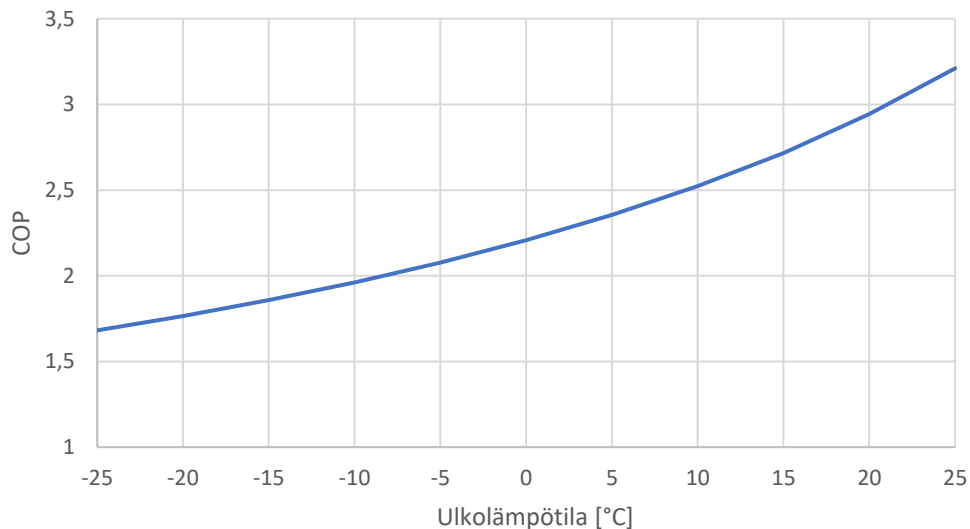
tehokerrointa alentaa myös työaineen lämpötilanmuutos höyrystimessä ja lauhduttimessa (Perälä, 2009, 32). Ideaalisessa laskentatavassa niiden oletetaan olevan vakioita. Yhtälöstä 1 huomataan, että mitä suurempi ero lämmönlähteen ja lämmitettävän kohteen välillä on, sitä huonompi on tehokerroin.

Esimerkiksi alkulämpötilaa  $-5\text{ °C}$  ( $268\text{ K}$ ) ja loppulämpötilaa  $80\text{ °C}$  ( $353\text{ K}$ ) käyttäen saadaan lämpöpumpun ideaaliseksi tehokertoimeksi yhtälön 1 mukaisesti

$$\varepsilon_L = COP = \frac{T_{\max}}{T_{\max} - T_{\min}} = \frac{353\text{ K}}{(353 - 268)\text{ K}} = 4,15$$

Ilmalämpöpumppuja valmistavan Calefan sivuilta samoilla lämpötiloilla saadaan lämpöpumpun COP luvuksi 2,1 (Calefa, 2023). Lämpöpumpun hyötysuhteeksi saadaan siis  $\eta = \frac{2,1}{4,15} = 0,51$ . Tässä työssä lämpöpumpun hyötysuhteena käytetään vakiota  $\eta = 0,50$

COP lukua on havainnollistettu kuvassa 3. Tässä työssä kaukolämpö lämmitetään lämpöpumpulla  $80\text{ °C}$  lämpötilaan ( $T_{\max} = 80\text{ °C}$ ). Kuvasta 3 voidaan havaita, että lämpöpumpun tehokerroin pysyy yli 1,5 myös hyvin kylmissä ulkolämpötiloissa ( $T_{\min} = -25\text{ °C}$ ).



Kuva 3. Lämpöpumpun tehokerroin COP ulkolämpötilan funktiona yhtälön 1 mukaan laskettuna.  $T_{\max} = 80\text{ °C}$ ,  $\eta = 0,50$

## 3 Laskenta

Tämän kappaleen tarkoituksena on esitellä laskennassa käytetyt peruseriaatteet. Laskennassa tulee ilmi myös tehdyt oletukset ja yksinkertaistukset. Laskenta toteutettiin Elstorin alkuarvojen mukaan, josta saatiin muun muassa laskennassa käytettävä kokoluokka selville. Laskennan tarkka kulku esitetään vain yhdelle systeemille, mutta laskelma toteutettiin monelle eri variaatiolle. Näistä on esitetty tulokset tulokset- kappaleessa. Laskelma on toteutettu MS Excel laskentataulukkosovelluksella.

Laskennan tarkoituksena on tutkia lämpöpumppuinvestoinnin kannattavuutta jo olemassa olevien lämpövarastojen rinnalle. Investoinnin kannattavuutta tutkiessa vertaillaan pelkän lämpövaraston sekä lämpöpumpun ja lämpövaraston muodastaman systeemin kustannuksia. Lisäksi takaisinmaksuaikaa käytettäessä otetaan huomioon lämpöpumpun investointikustannus.

### 3.1 Alkuarvot

Elstorin antamat alkuarvot tutkittavalle systeemille olivat seuraavat:

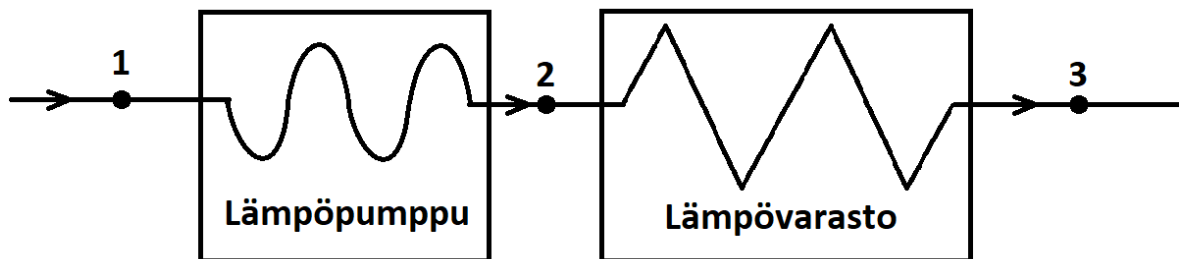
- Lämpötilatasot: kaukolämpö 90 °C, prosessihöyry 120–150 °C
- Paluulämpötila: 50 °C
- Käyttöprofiilit: 24/7 ja arkisin klo 7–15
- Kaukolämmön/prosessihöyryn kulutus: 12 MWh/vrk

### 3.2 Oletukset ja rajaukset

Työssä suoritetaan laskelma systeemille, jossa lämpöpumppu ja lämpövarasto ovat yhteiskäytössä. Systeemiä havainnollistaa kuva 4. Ilmaa lämmönlähteenä käyttävä lämpöpumppu lämmitteää kaukolämpö- ja prosessiveden jokaisessa tapauksessa 50 °C:sta 80 °C:seen.

Lämpöpumpun jälkeen lämpövarasto lämmitteää veden haluttuun loppulämpötilaan. Lämpövarasto ladataan sähkövastuksilla vuorokauden kuuden edullisimman tunnin aikana.

Lämpöpumpun COP:n huonominen korkeilla loppulämpötiloilla ja kylmäaineen ominaisuudet rajoittaa lämpöpumpun loppulämpötilaa, jonka takia loppulämpötila on rajattu 80 °C:seen. Lämpöpumpun COP:ta laskettaessa käytetään ulkolämpötilasta riippumatta hyötysuhdetta  $\eta = 0,50$ . Höyryntuotannossa veden oletetaan pysyvän kokoajan normaalissa ilmanpaineessa (1 bar). Kaukolämpölaskelmassa kaukolämmön menoveden lämpötilan oletetaan pysyvän koko vuoden vakiona 90 °C. Massavirran oletetaan määräytyvän tehon mukaan. Takaisinmaksuaikaa laskettaessa käytetään laskentakorkoa  $i = 5 \%$



Kuva 4. Lämpöpumpun ja lämpövaraston muodostama systeemi

### 3.3 Sähkön hinta

Työssä käytettiin sähköenergian hinnan määrittämiseen ENTSO-E:n (2023) hintadataa. Vuorokauden kuusi halvinta tuntia on saatu järjestämällä tuntikohtaiset sähköhinnat suuruusjärjestykseen, josta on otettu kuuden halvimmman tunnin keskiarvo. Halvimmat tunnint eivät ole sidonnaisia kellonaikaan, mutta ne ajoittuvat lähes aina yön tunneille.

Sähkön hinnan vaihtelun takia laskelmiin otettiin mukaan kolmen viime vuoden hintadata. Niistä otettiin sekä vuosittainen keskiarvo, että kolmesta vuodesta laskettu yhteinen keskiarvo. Hintadatasta lasketut sähkön perushinnat vuosittain eri käyttöprofiileille on taulukoituna taulukossa 1. Kuten taulukosta 1 nähdään, sähkön hinta vaihtelee paljon vuosittain. Käyttökustannuksia laskettaessa on siis syytä ottaa sähköhinnan vaihtelu huomioon.

Taulukko 1. Sähkön perushinnat.

Vuosi	2020 [€/MWh]	2021 [€/MWh]	2022 [€/MWh]	keskiarvo [€/MWh]
Keskiarvo 24/7	28,02	72,34	150,65	83,67
Kuusi halvinta tuntia	13,44	42,13	77,70	44,43
Ka. 7–15	36,17	88,52	183,02	102,57

Lisäksi sähköenergian lopullisia kustannuksia laskettaessa on lisättävä perushintaan seuraavat keskijännitesiiirtoon liittyvät kustannukset (Lappeenrannan energia, 2023):

- Sähkön perusmaksu: 457,76 €/kk
- Sähkön siirron päätötehomaksu: 0,91 €/kW,kk
- Siirtomaksu, päivä: 0,0269 €/kWh
- Siirtomaksu, yö: 0,0120 €/kWh
- veroluokan 2 sähkövero: 0,63 €/MWh

Koska lämpövarasto ladataan öisin, käytetään lämpövaraston lataamiseen käytetyn sähkön siirtomaksuna yöperusteista kustannusta. Kaukolämpöä ja prosessihöyryä tuotettaessa käyttöprofiililla 24/7 käytetään lämpöpumpulle päivän ja yön siirtomaksun keskiarvoa.

### 3.4 Kaukolämpöveden- ja prosessihöyryntuotannon laskelman vaiheet

Koska lämpöpumppu lämmittää kaukolämpövettä katkotta 24/7, käytetään sen käyttökustannuksia laskettaessa keskiarvoista sähkönhintaa. Lämpövarasto ladataan sähkövastuksilla. Lämpövaraston latauksesta johtuvia käyttökustannuksia laskettaessa käytetään vuorokauden kuuden halvimmän tunnin keskiarvoa.

Lämpöpumpun lämmitysteho saadaan ratkaistua yhtälöllä 2

$$\Phi_{\text{pumppu}} = q_m(h_2 - h_1) \quad (2)$$

, jossa  $q_m$  on lämmitettävän veden massavirta ja  $h$  on veden ominaisentalpia.

Veden massavirta saadaan systeemin tehon yhtälöstä 3

$$P_{sys} = q_m(h_3 - h_1) \quad (3)$$

Josta

$$q_m = \frac{P_{sys}}{(h_3 - h_1)} \quad (4)$$

Lämpöpumpun kompressoriteho saadaan jakamalla pumpun lämmitysteho sen COP-luvulla.

$$P_k = \frac{\Phi_{pumppu}}{COP} = \frac{1}{COP} q_m(h_2 - h_1) \quad (5)$$

Lämpöpumpun teorettinen COP saadaan yhtälön 1 avulla. Todellinen lämpökerroin saadaan kertomalla teorettinen COP lämpöpumpun hyötysuhteella  $\mu = 0,50$ .

Laskennassa käytetään COP:na vuoden keskilämpötilan mukaan laskettua COP:ta. Vuoden keskilämpötila Lappeenrannassa vertailukaudella 1991–2020 oli noin 5 °C. (Ilmatieteenlaitos, 2023). Lämpöpumpun COP-luvuksi saadaan lämpötiloilla  $T_{min} = 5$  °C ja  $T_{max} = 80$  yhtälön 1 ja hyötysuhteen  $\eta = 0,50$  mukaan 2,35.

Lopun lämmittämisen hoitaa lämpövarasto, jonka lämmitysteho saadaan yhtälön 6 tavoin

$$\Phi_{varasto} = q_m(h_3 - h_2) \quad (6)$$

Höyryntuotannon laskennassa isoimpana erona kaukolämpöön verrattuna on veden faasimuutokseen liittyvän latenttilämmön huomioiminen. Latenttilämpö tarkoittaa tarvittavaa entalpiamuutosta faasimuutoksen synnyttämiseksi. Kylläisen veden ominaisentalpia lämpötilassa 100 °C on noin 420 kJ/kg, kun taas kylläisellä höyryllä samassa lämpötilassa se on noin 2675 kJ/kg. Veden höyrytämiseen tarvitaan siis noin 2255 kJ/kg, joka on huomattavasti isompi kuin veden ominaislämpökapasiteetti, noin 4,2 kJ/kgK. Höyryä tuotettaessa suurin osa tehosta käytetään siis faasimuutoksen aikaansaamiseksi. Veden ja vesihöyryn entalpioita on esitetty liitteessä 1.

Kustannuksia laskettaessa lämpöpumppu lämmittää prosessivettä katkotta 24/7, joten pumpun käyttökustannuksia laskettaessa käytetään vuorokauden keskiarvoista sähköhintaa. Lämpövarasto ladataan sähkövastuksilla. Lämpövaraston latauksesta johtuvia käyttökustannuksia laskettaessa käytetään vuorokauden kuuden halvimman tunnin keskiarvoa.

### 3.5 Esimerkkilasku kustannuksista kaukolämmön tuotannossa.

Lasketaan kustannukset ensin pelkälle lämpövarastolle, kun tuotetaan kaukolämpöä 12 MWh päiväteholla. Käytetään laskennassa vuosien 2020–2022 sähköhinnan keskiarvoa. Lämpövarasto ladataan kuuden halvimmän tunnin aikana, jolloin sähkön hinta on 44,43 €/MWh. Sähkön perushintaan lisätään sähkön yöperusteinen siirtomaksu 0,0120 €/kWh ja sähkövero, joka on tässä tapauksessa teollisuudessa käytettävä sähköveroluokan 2 suuruinen 0,63 €/MWh. Näin sähkön hinnaksi tulee 0,04443 €/kWh + 0,01200 €/kWh + 0,00063 €/kWh = 0,05705 €/kWh. Varaston latauskustannukseksi saadaan

$$K_{\text{varasto}} = 12000 \frac{\text{kWh}}{\text{vrk}} \cdot 0,05705 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 684,64 \frac{\text{€}}{\text{vrk}}$$

Lisätään vielä sähkön perusmaksu

$$\frac{457,76 \frac{\text{€}}{\text{kk}}}{30 \frac{\text{vrk}}{\text{kk}}} = 15,26 \frac{\text{€}}{\text{vrk}}$$

sekä sähkönsiirron päätötehomaksu

$$\frac{2000 \text{ kw} \cdot 0,91 \frac{\text{€}}{\text{kWkk}}}{30 \frac{\text{vrk}}{\text{kk}}} = 60,67 \frac{\text{€}}{\text{vrk}}$$

Kaukolämmön tuotannon kustannukset pelkkää lämpövarastoa käyttäen ovat siis noin

$$684,64 \frac{\text{€}}{\text{vrk}} + 15,26 \frac{\text{€}}{\text{vrk}} + 60,67 \frac{\text{€}}{\text{vrk}} = 760,56 \frac{\text{€}}{\text{vrk}}$$

Lasketaan seuraavaksi kustannukset kaukolämmön tuotannolle kuvan 4 mukaisessa systeemissä, missä kaukolämpö esilämmitetään lämpöpumpulla ja lämpövarasto lämmittää sen haluttuun loppulämpötilaan. Systeemin läpi kulkeva massavirta saadaan yhtälöstä 4

$$q_m = \frac{500 \text{ kW}}{(376,99 - 209,41) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = 2,98 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$



Lämpöpumpun kompressoriteho saadaan yhtälöstä 5

$$P_k = \frac{1}{2,35} \cdot 2,98 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot (334,99 - 209,41) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 159,4 \text{ kW}$$

Lämpövaraston tehoksi saadaan yhtälön 6 mukaan

$$\Phi_{varasto} = 2,98 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot (376,99 - 334,99) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 125,3 \text{ kW}$$

Lämpöpumppu lämmitteää vettä 24/7 suoraan pörssisähköllä. Tämän vuoksi lämpöpumpun käyttämän sähkön hintaan lisätään sähkön siirtomaksu, joka lasketaan yö- ja päivämaksun keskiarvosta. Sähkön siirtomaksuksi saadaan tällöin 0,01945 €/kWh. Lisäksi perushintaan lisätään sähkövero 0,63 €/MWh. Lämpöpumpun käyttämän sähkön hinnaksi saadaan siis 0,08367 €/kWh + 0,01945 €/kWh + 0,00063 €/kWh = 0,10375 €/kWh.

Lämpöpumpun käyttökustannuksiksi saadaan siis

$$K_{pumppu} = 24 \frac{\text{h}}{\text{vrk}} \cdot 159,4 \text{ kW} \cdot 0,10375 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 397,01 \frac{\text{€}}{\text{vrk}}$$

Lämpövaraston kustannuksiksi saadaan

$$K_{varasto} = 24 \frac{\text{h}}{\text{vrk}} \cdot 125,3 \text{ kW} \cdot 0,05705 \frac{\text{€}}{\text{vrk}} = 171,59 \frac{\text{€}}{\text{vrk}}$$

Lisätään kustannuksiin vielä sähkön perusmaksu ja päätötehomaksu, jolloin kokonaiskustannuksiksi systeemille saadaan 603,90 €/vrk.

Säästöä lämpöpumpun ja lämpövaraston yhteiskäytössä pelkkään lämpövarastoon verrattuna syntyy siis 760,56 €/vrk - 603,90 €/vrk = 156,67 €/vrk. Säästöt on laskettu jokaiselle tapaukselle samaa laskentatapaa noudattaen. Muiden laskentojen tulokset on esitetty tulokset- kappaleessa.

### 3.6 Investoinnin takaisinmaksuaika

Investoinnin takaisinmaksuaika kuvaa ajanjaksoa, jonka kuluessa investointiin käytetty raha maksaa itsensä takaisin. Yhteenlaskettu investoinnista kertyvä kassavirta ylittää siis investoinnin hankintahinnan. Takaisinmaksuaika korostaa lähitulevaisuuden tuottoja. Lyhyen takaisinmaksuajan omaavan investoinnin takaisinmaksuajan luotettavuutta voidaan pitää

korkeana, sillä talouden ja yritystoiminnan näkymiä voidaan ennustaa luotettavammin lyhyellä aikavälillä. Keskeisimpänä ongelmana takaisinmaksuajan käytössä on se, ettei se huomio takaisinmaksuajan jälkeisiä kassavirtoja. Takaisinmaksuaika ei siis kerro investoinnin kannattavuutta. Tätä kannattavuuden arvioimisen puutetta voidaan korjata laskentakorkokannan käytön avulla. (Ikäheimo 2019, 184)

Laskentakorkokannan avulla voidaan siirtää investoinnista tulevia kassavirtoja ajasta toiseen. Jotta tulevaisuuden kassavirtoja voidaan vertailla nykyhetkeen, on niitä diskontattava laskentakorolla. Diskonttaaminen vähentää tulevaisuuden kassavirran arvoa. Diskonttaaminen perustuu siihen, että rahalle on aina vaihtoehtoinen sijoituskohde. Tulevaisuuden raha on myös arvottompaa, sillä omaa kulutusta joudutaan siirtämään tulevaisuuteen. Toisaalta sijoittaja haluaa myös korvauksen tulevaisuuden kassavirtojen epävarmuudesta eli riskistä. (Ikäheimo 2019, 182)

Takaisinmaksuaika  $n$  ilman laskentakorkoa lasketaan yhtälöstä 7.

$$n = \frac{\text{investoinnin kustannus}}{\text{nettokassavirrat}} \quad (7)$$

Nettokassavirrat voidaan diskontata nykyhetkeen jaksollisten maksujen diskonttaustekijän  $H$  avulla. Jaksollisten maksujen diskonttaustekijää voidaan käyttää, kun arvioidaan investoinnin nettokassavirrat monelle vuodelle samansuuruisiksi. Diskonttaustekijä lasketaan yhtälöstä 8 (Pellinen, 2019 175)

$$H = \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \quad (8)$$

, jossa  $i$  on laskentakorkokanta.

Kertomalla vuotuinen säästö jaksollisten maksujen diskonttaustekijällä ja asettamalla se yhtälöön 7 nettokassavirran kohdalle, saadaan investoinnin takaisinmaksuajaksi yhtälön 9 mukaan

$$n = \frac{\ln\left(\frac{1}{i} - \frac{I}{q}\right) - \ln(i)}{\ln(1+i)} \quad (9)$$

, jossa  $q$  on vuotuinen nettokassavirta ja  $I$  on investoinnin hankintahinta.

Tässä työssä lasketut takaisinmaksuajat koskevat korvausinvestointeja. Korvausinvestointi tarkoittaa investointia, joka tehdään jo olemassa olevalle laitokselle. Nettokassavirta työn laskennassa tarkoittaa saavutettua säästöä, kun investointi on suoritettu. Laskettua takaisinmaksuaikaa ei siis voi käyttää uuden laitoksen investoinnin arvioimiseen, sillä se ei ota huomioon lämpövaraston hankintakustannuksia. Työssä laskettuja vuotuisia käyttökustannuksia voidaan kuitenkin vertailla myös uutta investointia suunnitellessa.

## 4 Tulokset

Tässä osiossa esitetään laskennassa saatuja tuloksia. Tulokset ovat esitetty kuvin ja taulukoin, ja ne on laskettu MS Excel-tilukkolaskentaohjelmaa käyttäen. Lopuksi käyttökustannuslaskelmien perusteella on tehty yksinkertainen investointilaskelma.

### 4.1 Lämpöpumpun ja lämpövaraston yhteiskäyttö kaukolämmön tuotannossa

Lämpöpumpun ja lämpövaraston yhteiskäytön kustannukset laskettiin kolmelle viimevuodelle. Vuotuiset käyttökustannukset ja saavutettu säästö verrattuna pelkän lämpövaraston käyttöön on taulukoitu taulukkoon 2. Kaukolämmön tehoksi saatiin 12 MWh päiväkulutuksella 0,5MW. Lämpöpumpun kompressoriteho oli 160 kW ja lämpövaraston lämmitysteho 125 kW.

Taulukko 2. Päivittäisiä kustannuksia sekä päivittäisiä ja vuotuisia säästöjä taulukoituna kaukolämmön tuotannossa.

Vuosi	2020	2021	2022	Keskiarvo
<b>Kustannukset [€/pvä]</b>				
Lämpöpumppu	184	354	653	397
Lämpövarasto	78	165	272	172
<b>Kok.kustannukset [€/pvä]</b>				
yht.	298	554	960	604
<b>Säästö [€]</b>				
päivässä	91	179	200	157
vuodessa	33211	65481	72855	57182

Taulukosta 2 voidaan nähdä, että sähkön hinta vaikuttaa paljon käyttökustannuksiin ja sitä kautta vuotuisen säästön määrään. Vuoden 2022 säästö vuoteen 2020 verrattuna oli yli kaksinkertainen. Korvausinvestointia tehdessä on siis mietittävä tarkkaan, kuinka paljon sähkön hinta tulee vaihtelevaan tulevaisuudessa ja mihin suuntaan sen hinta kehittyy. Vuoden 2022 sähkön hinnoilla korvausinvestointi voisi olla hyvinkin kannattava, mutta 2020 sähkön hinnoilla sen kannattavuus romahtaisi.

#### 4.2 Lämpöpumpun ja lämpövaraston yhteiskäyttö prosessihöyryn tuotannossa

Prosessihöyryn tuotannossa käyttökustannukset laskettiin kahdelle käyttöprofiilille sekä kahdelle lämpötilatasolle. Käyttöprofiilit olivat 24/7 ja arkisin klo 7–15. Lämpötilatasot olivat 120 °C sekä 150 °C. Lämpöpumpun oletiin esilämmittävän vesi molemmissa tapauksissa 80 °C lämpötilaan.

Lämpöpumpun ja lämpövaraston tehoja prosessihöyryn tuotannossa on esitetty taulukossa 3. Päiväkohtaisen tehon ollessa vakio 12 MWh, massavirta laskee huomattavasti kaukolämmön tuotantoon verrattuna. Tämä johtuu siitä, että veden höyrystäminen vie paljon energiaa, jolloin massavirta pienenee. Pienen massavirran takia lämpöpumpun teho mitoittui hyvin pieneksi, jolloin myös säästöt ovat pienet. Toisaalta pienen lämpöpumpun investointikustannukset ovat myös matalat.

Taulukko 3. Lämpöpumpun ja lämpövaraston toiminta-arvoja prosessihöyryn tuotannossa

Käyttöprofiili	24/7		Arkisin klo 7–15	
	120	150	120	150
Loppulämpötila [°C]				
massavirta [kg/s]	0,20	0,19	0,60	0,58
Lämpöpumpun kompressoriteho [kW]	10,7	10,4	32,0	31,2
Lämpövaraston teho [kW]	475,0	475,5	1424,9	1426,6

Käyttöprofiilille 24/7 saatiin taulukoiden 4 ja 5 mukaiset säästöt. Taulukoista nähdään, että saavutettu säästö on molemmilla loppulämpötiloilla noin 10 €/pvä. Tämä eroaa huomattavasti kaukolämmön tuotannossa saavutetusta säästöstä (157 €/pvä). Ero johtuu siitä, että lämpöpumppu hoitaa huomattavasti isomman osan veden lämmittämisestä kaukolämmön tuotannossa. Tällöin myös lämpöpumpulta vaaditaan suurempaa tehoa.

Taulukko 4. Päivittäisiä kustannuksia sekä päivittäisiä ja vuotuisia säästöjä taulukoituna 120 °C prosessihöyryn tuotannossa 24/7 käyttöprofiililla.

Vuosi	2020	2021	2022	Keskiarvo
<b>Kustannukset [€/pvä]</b>				
Lämpöpumppu	12	24	44	27
Lämpövarasto	297	624	1030	650
<b>Kok.kustannukset [€/pvä]</b>				
yht.	383	721	1147	750
<b>Säästö [€]</b>				
päivässä	6	12	13	10
vuodessa	2220	4377	4870	3822

Taulukko 5. Päivittäisiä kustannuksia sekä päivittäisiä ja vuotuisia säästöjä taulukoituna 150 °C prosessihöyryn tuotannossa 24/7 käyttöprofiililla.

Vuosi	2020	2021	2022	Keskiarvo
<b>Kustannukset [€/pvä]</b>				
Lämpöpumppu	12	23	43	26
Lämpövarasto	298	625	1031	651
<b>Kok.kustannukset [€/pvä]</b>				
yht.	383	721	1147	750
<b>Säästö [€]</b>				
päivässä	6	12	13	10
vuodessa	2168	4274	4756	3733

Käyttöprofiilille arkisin klo 7–15 saatiin taulukoiden 6 ja 7 mukaiset säästöt. Kolmen viimevuoden keskiarvoiseksi säästökseen saatiin molemmilla loppulämpötiloilla noin 5 €/pvä. Säästöjen pienuuteen vaikuttaa muun muassa se, että lämpöpumppu on käynnissä silloin, kun sähkön hinta on korkeimmillaan. Taulukoista 4 ja 5 voidaan nähdä, että käyttöprofiililla 24/7 saavutettiin kaksi kertaa isommat päiväkohtaiset säästöt arkisin 7–15 käyttöprofiiliin verrattuna. Vuotuisen säästön määrä on lähes kolminkertainen 24/7 käyttöprofiililla verrattuna arkisiin 7–15 käyttöprofiiliin, sillä 24/7 käyttöprofiililla käyttöpäiviä kertyy huomattavasti enemmän.

Taulukko 6. Päivittäisiä kustannuksia sekä päivittäisiä ja vuotuisia säästöjä taulukoituna 120 °C prosessihöyryn tuotannossa arkisin 7–15 käyttöprofiililla.

Vuosi	2020	2021	2022	Keskiarvo
<b>Kustannukset [€/pvä]</b>				
Lämpöpumppu	14	33	45	31
Lämpövarasto	297	624	1030	650
<b>Kok.kustannukset [€/pvä]</b>				
yht.	376	723	1140	746
<b>Säästö [€]</b>				
päivässä	4	2	11	5
vuodessa	924	421	2805	1383

Taulukko 7. Päivittäisiä kustannuksia sekä päivittäisiä ja vuotuisia säästöjä taulukoituna 150 °C prosessihöyryn tuotannossa arkisin 7–15 käyttöprofiililla.

Vuosi	2020	2021	2022	Keskiarvo
<b>Kustannukset [€/pvä]</b>				
Lämpöpumppu	14	32	44	30
Lämpövarasto	298	625	1031	651
<b>Kok.kustannukset [€/pvä]</b>				
yht.	377	723	1141	747
<b>Säästö [€]</b>				
päivässä	3	2	10	5
vuodessa	903	411	2739	1351

Lämpöpumpun loppulämpötila vaikuttaa paljon saavutettuihin säästöihin. Mitä pienempi loppulämpötila, sen suuremmaksi COP saadaan yhtälön 1 mukaan, jolloin lämpöpumpulla saavutetaan tehokkaammin säästöjä. Toisaalta pienemmällä loppulämpötilalla lämpövaraston lämmitysosuus kasvaa, ja sähkön hinnan mukaan iso varaston lämmitysosuus voi tuoda lisää kustannuksia. Vuosittainen säästö riippuu siis lämpöpumpun tehokertoimesta sekä sähkön vuorokautisen kuuden halvimmän tunnin sekä sähkön vuorokautisen keskiarvon erosta. Mitä pienempi tämä ero on, sen kannattavammaksi lämpöpumpun käyttö tulee. Lämpövaraston käytön kannattavuus taas nojaa suureen vuorokautiseen sähkönhinnan vaihteluun.

### 4.3 Takaisinmaksuaika eri tapauksissa

Lämpöpumpun investointikustannukset vaihtelevat paljon esimerkiksi asennuskustannusten vuoksi. Yli 100 kW lämpöpumppujen investointikustannus voi vaihdella 300 €/kW ja 1000 €/kW välillä. Keskimäärin teollisuudessa lämpöpumpun investointikustannuksena voidaan pitää 400 €/kW. Matalimmat investointikustannukset, vain 200 €/kW, ovat olleet Kiinassa. (Marina A, s. 8, 2021)

Esitetyt takaisinmaksuajat on laskettu yhtälön 9 mukaan käyttäen laskentakorkokantana 5 %. Takaisinmaksuajat kaukolämmöntuotannolle on esitetty taulukossa 8. Kaukolämmön takaisinmaksuaikaa laskettaessa vuotuiset säästöt on laskettu käyttäen lämpöpumpun loppulämpötilana 80 °C. Kaukolämmön tuotannossa lämpöpumpun tehoksi saatiin noin 375 kW. Käyttäen investointikustannuksena 400 €/kW, saadaan lämpöpumpun investointikustannukseksi noin 150000 €. Korvausinvestoinnin takaisinmaksuaika olisi siis taulukosta 8 interpoloimalla noin 3 vuotta.

Taulukko 8. Takaisinmaksuaikoja taulukoituna kaukolämmön tuotannossa lämpöpumpun hankintahinnan mukaan. Vuotuisena säästönä käytetty kolmen viime vuoden keskiarvoa.

Hankintahinta [€]	Takaisinmaksuaika [vuotta]
100000	1,9
200000	3,9
300000	6,2
350000	7,5

Takaisinmaksuajat höyryntuotannolle on esitetty taulukoissa 9 ja 10. Lämpöpumpun tehoksi höyryntuotannossa käyttöprofiililla 24/7 ja 120 °C lämpötilatasolla saatiin noin 25,0 kW ja 150 °C lämpötilatasolla noin 24,5 kW. Investointikustannukseksi 25 kW lämpöpumpulle 400 €/kW investointikustannuksella tulisi siis noin 9800 €. Korvausinvestoinnin takaisinmaksuaika olisi siis taulukon 9 mukaan noin 3 vuotta. Toisaalta erityisesti pienemmissä lämpöpumpuissa investointikustannukset voivat kasvaa isoiksi, ja esimerkiksi 20000 € investointikustannuksella takaisinmaksuajaksi tulisi noin 6 vuotta.



Taulukko 9. Takaisinmaksuaikoja taulukoituna prosessihöyryn tuotannossa käyttöprofiililla 24/7 lämpöpumpun hankintahinnan mukaan. Vuotuisena säästönä käytetty kolmen viimevuoden keskiarvoa.

Hankintahinta	120 [°C]	150 [°C]
10000	2,9	2,9
15000	4,5	4,6
20000	6,2	6,4
25000	8,1	8,4

Lämpöpumpun tehoksi höyryntuotannossa käyttöprofiililla arkisin klo 7–15 ja 120 °C lämpötilatasolla saatiin noin 75,1 kW ja 150 °C lämpötilatasolla noin 73,4 kW. Käyttäen investoinnin kustannuksena noin 400 €/kW, saatiin investoinnin hankintahinnaksi 75kW lämpöpumpulle noin 30000 €. Takaisinmaksuajat prosessihöyryn tuotannolle käyttöprofiililla arkisin klo 7–15 on esitetty taulukossa 10.

Taulukko 10. Takaisinmaksuaikoja taulukoituna prosessihöyryn tuotannossa käyttöprofiililla arkisin klo 7–15 lämpöpumpun hankintahinnan mukaan. Vuotuisena säästönä käytetty kolmen viimevuoden keskiarvoa.

Hankintahinta	120 [°C]	150 [°C]
10000	9,2	9,5
15000	16,0	16,6
20000	26,3	27,6
25000	48,0	53,2

Kuten taulukosta 10 nähdään, että takaisinmaksuaika käyttöprofiililla arkisin klo 7–15 nousee huomattavasti verrattuna 24/7 käyttöprofiiliin. Tämä johtuu erittäin pienistä saavutetuista säästöistä. Lämpöpumpun teho nousee myös verrattain suureksi, jolloin investoinnin takaisinmaksuajaksi tulisi noin 50 vuotta. Korvausinvestointi ei siis olisi kannattava.

## 5 Johtopäätökset

Työssä suoritettiin käyttökustannuslaskelma kaukolämmön ja prosessihöyryn tuotannossa lämpöpumpun ja lämpövaraston muodostamalle systeemille. Näitä kustannuksia vertailtiin pelkän lämpövaraston käyttökustannuksiin. Saadusta säästöstä laskettiin takaisinmaksuaika korvausinvestoinnille, jossa jo olemassa olevan lämpövaraston rinnalle asennetaan lämpöpumppu.

Laskenta osoitti lämpöpumpun ja lämpövaraston yhteiskäytön potentiaalin teollisuudessa. Yhteiskäytön potentiaali on erityisen vahvaa sellaisissa kohteissa, missä lämpöpumpun osuus lämmityksestä on suuri. Tällöin lämpöpumpun käytöstä saadut säästöt ovat suurimmillaan. Lämpövaraston tehtäväksi jää tällaisessa sstapauksessa korvata ulkoilmaa lämmönlähteenä käyttävien lämpöpumppujen heikkous, matala loppulämpötila. Tällaisia kohteita laskelmassa olivat kaukolämpö ja höyryntuotanto 120 °C loppulämpötilalla käyttöprofiililla arkisin 24/7. Laskelmasta nähtiin myös lämpövaraston vahvuus erityisesti höyryntuotannossa käyttöprofiililla arkisin klo 7–15. Tällä käyttöprofiililla lämpöpumpun käyttö olisi turhaa, koska se ei pysty kilpailemaan lämpövaraston vahvuusalueella. Lämpövarastoa käytetäänkin kohteissa, joissa lämmöntarve on suurimmillaan kalliin sähkön aikaan.

Laskenta suoritettiin melko yksinkertaisesti käyttäen vuotuisia keskiarvoja esimerkiksi lämpötilasta ja sähköhinnasta. Lämpötilan päiväkohtainen vaihtelu vaikuttaa kuitenkin todellisiin käyttökustannuksiin paljon, sillä lämpöpumpun tehokerroin vaihtelee ulkolämpötilan mukaan. Myös sähkön hinta vaihtelee paljon päiväkohtaisesti, jolloin saavutettu säästö saattaa vaihdella merkittävästi. Yksinkertainen laskentatapa ei myöskään ota sitä huomioon, että lämmitystarve on suurempi talvella kuin kesällä. Tällöin myös lämpöpumpun tehokerroin on huono, jolloin sen käyttökustannukset nousevat. Tämä vaikuttaa erityisesti kaukolämmön tuotannon kustannuksiin.

Työstä voidaan vetää johtopäätös, että lämpöpumppu on lämpövarastoa kannattavampi silloin, kun lämpöpumpun COP on korkeampi kuin keskimääräisen sähköhinnan ja lämpövaraston lataamiseen käytetyn sähköhinnan suhde. Käytännössä tällaista tilannetta on hyvin vaikea ennustaa ulkolämpötilan sekä sähköhinnan vaihdellessa huomattavasti. Näin ollen

historiaan pohjautuva ennustus nähtiin melko hyväksi tavaksi arvioida korvausinvestoinnin kannattavuutta.

Korvausinvestointia arvioitiin takaisinmaksuaikamenetelmällä. Korvausinvestoinnin takaisinmaksuaikaa ei kuitenkaan voida käyttää uusien laitosten investointien arvioimiseen, sillä se ei ota lämpövaraston hankintakustannuksia huomioon. Vuotuisten säästöjen määrää käyttökustannuksissa voidaan kuitenkin käyttää hyväksi myös uusien investointien arvioinnissa. Käyttökustannukset laskettiin vain sähkön hinnan perusteella. Niissä ei siis otettu huomioon esimerkiksi huoltokustannuksia.

Laskenta voitaisiin suorittaa tarkemmin esimerkiksi tuntikohtaisella laskentavalla, jos sähkönhintadata ja lämpötiladata on saatavilla. Tällöin voidaan minimoida lämpötilan aiheuttama epävarmuus lämpöpumpun suorituskykyyn. Tuntikohtainen laskentatapa ottaisi tarkemmin huomioon myös päiväkohtaisen sähkönhinnan vaihtelun. Työssä päädyttiin kuitenkin käyttämään yksinkertaista laskelmaa, koska sähkön hintaa ja lämpötilaa on hyvin vaikea ennustaa vuosien päähän. Lisäksi oletukset ja lähtöarvot haluttiin pitää mahdollisimman yksinkertaisina ja selkeinä.

## Lähteet

- Arpagaus Cordin, Bless F, Uhlmann M, Schiffmann Jü, Bertsch SS. 2018. High temperature heat pumps: Market overview, state of the art, research status, refrigerants, and application potentials. Energy(Oxford). Volume 152.
- Calefa. HotLevel [Verkkoaineisto]. [Viitattu 10.1.2023]. Saatavilla: <https://www.calefa.fi/en/hotlevel/>
- ENTSO-E. transparency platform [Verkkoaineisto]. [Viitattu 10.1.2023]. Saatavilla: <https://transparency.entsoe.eu/>
- Gaur AS, Fitiwi DZ, Curtis J. 2021. Heat pumps and our low-carbon future: A comprehensive review. Energy Research & Social Science. Volume 71.
- Grassi Walter. 2018. Heat Pumps Fundamentals and Applications. Cham: Springer International Publishing.
- Ikäheimo S, Malmi T , Walden R. 2019. Yrityksen Laskentatoimi. Helsinki: Alma Talent Oy.
- Kähkönen S, Tynjälä T. 2018. Termodynamiikan taulukot.
- Lappeenrannan energia. Sähkön verkkopalveluhinnasto [Verkkoaineisto]. [Viitattu 6.3.2023]. Saatavilla: <https://www.lappeenrannanenergia.fi/hinnastot-ja-ehdot/sahkon-verkkopalveluhinnasto>
- Lun YHV, Tung SLD. 2020. Heat Pumps for Sustainable Heating and Cooling. Cham: Springer International Publishing.
- McMullan JT, Morgan R. 1981. Heat Pumps. Bristol: Adam Hilger.
- Nellisen P, Wolf S. 2015. Heat Pumps in non-domestic applications in Europe: potential for an energy revolution. 8. EHPA European heat Pump Forum, Brussels, Belgium.
- Pellinen J. 2019. Kustannuslaskenta Ja Kannattavuusajattelu. Helsinki: Alma Talent.
- Perälä R. 2009. Lämpöpumput : Suomalainen Käsikirja Aikamme Lämmitysjärjestelmästä. Helsinki: Alfamer.

Wikstén R. 1996. Lämpövoimaproessit. Helsinki: Otatieto.

Liite 1. Veden ja vesihöyryn ominaisentalpioita taulukoituna lämpötilan mukaan vakiopaineessa (1bar) (Kähkönen & Tynjälä, 2018, 18).

Lämpötila [°C]	ominaisentalpia [kJ/kg]
50	209,41
80	334,99
90	376,99
120	2716,61
150	2776,59