

LAPPEENRANNAN-LAHDEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
School of Energy Systems  
Energiatekniikka  
BH10A0202 Energiatekniikan kandidaatintyö

**KAUKOLÄMPÖKATTILAN KORVAAMINEN  
LÄMPÖPUMPULLA  
REPLACING THE DISTRICT HEATING BOILER  
WITH A HEAT PUMP**

Työn tarkastaja: Antti Uusitalo  
Työn ohjaaja: Antti Uusitalo  
Lappeenranta 27.4.2021  
Juuso Yli-Mikola

## **TIIVISTELMÄ**

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto

School of Energy Systems

Energiatekniikka

Juuso Yli-Mikola

### **Kaukolämpökattilan korvaaminen lämpöpumpulla**

Kandidaatintyö 2021

Tarkastaja: Tutkijaopettaja Antti Uusitalo

Ohjaaja: Tutkijaopettaja Antti Uusitalo

34 sivua, 11 kuvaa, 7 taulukkoa ja 1 liite

Hakusanat: lämpöpumput, kaukolämpökattila, kaukolämpö, kannattavuus

Lämpöpumput tarjoavat polttoon perustumattoman ratkaisun kaukolämmön tuotantoon ja niiden avulla kaukolämmön tuotantorakennetta voidaan muuttaa ympäristöystävällisemmäksi. Tässä työssä tutustutaan lämpöpumpun käyttöön osana kaukolämpöjärjestelmää, sekä arvioidaan lämpöpumpuinvestoinnin kannattavuutta. Investoinnin kannattavuuden arviointi tehdään pienelle kaukolämpöjärjestelmälle huomioiden sille ominaiset piirteet.

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on selvittää, onko haketta polttavan kaukolämpökattilan korvaaminen lämpöpumpulla kannattavaa. Investoinnin kannattavuutta arvioidaan erilaisilla investointilaskentamenetelmillä, kuten nykyarvomenetelmän avulla. Lisäksi tuotetun lämpöenergian ominaiskustannuksia vertaillaan lämpöpumpun ja lämpökattilan välillä, jonka perusteella arvioidaan lämpöpumpun käytön kannattavuutta.

Investointilaskelmien perusteella lämpöpumpuinvestointi on kannattava. Lämpöpumpulla tuotetun lämpöenergian ominaiskustannus on hieman suurempi kuin kattilalla tuotetun lämpöenergian. Ero ei ole kuitenkaan merkittävä, joten lämpöpumppua voidaan pitää kilpailukykyisenä lämmöntuotantovaihtoehtona kattilaan verrattuna. Investoinnin taloudellisesta kannattavuudesta ja saavutettavista hyödyistä huolimatta investoinnin toteutumisen esteeksi voivat kuitenkin muodostua muut haasteet, kuten lämmönlähteen riittävyys.

## SISÄLLYSLUETTELO

### TIIVISTELMÄ

## SISÄLLYSLUETTELO

### SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

1	JOHDANTO .....	6
2	KAUKOLÄMPÖ .....	8
2.1	Toimintaperiaate .....	8
2.2	Tuotantorakenne .....	9
2.3	Markkinaosuus .....	11
3	LÄMPÖPUMPUT .....	12
3.1	Toimintaperiaate .....	12
3.2	Ideaalinen ja todellinen lämpöpumppprosessi .....	13
3.3	Suorituskyky .....	15
3.4	Lämmönlähteet kaukolämmön tuotannossa .....	16
4	LÄMPÖPUMPPU OSANA KAUKOLÄMPÖJÄRJESTELMÄÄ .....	18
4.1	Hyödyt ja haasteet .....	18
4.2	Investoinnin kannattavuuteen vaikuttavat tekijät .....	20
4.3	Lämpöpumpun rooli kaukolämmön tuotannossa .....	21
5	INVESTOINNIN KANNATTAVUUDEN ARVIOINTI .....	24
5.1	Käytetyt investointilaskentamenetelmät .....	24
5.2	Kiinteät ja muuttuvat kustannukset .....	25
5.3	Investointilaskennan alkuarvot ja tulokset .....	25
5.4	Tuotetun lämpöenergian ominaiskustannuksien vertailu .....	27
5.5	Herkkyysanalyysi .....	29
6	JOHTOPÄÄTÖKSET .....	32
7	YHTEENVETO .....	34
	LÄHTEET .....	35

### LIITTEET

Liite 1. Laskelmat

## SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

### Roomalaiset

$a$	vuosi	-
$a_{n/i}$	nykyarvotekijä	-
$c_{n/i}$	annuiteettitekijä	-
$h$	hinta	€/MWh
$I$	investointi	€
$i$	korkokanta	%
$K$	kustannus	€/a
$k$	ominaiskustannus	€/MWh
$n$	investoinnin pitoaika	a
$Q$	lämpöenergia	kW
$S$	vuotuiset nettotulot	€/a
$T$	lämpötila	°C, K
$W$	työ	kW

### Kreikkalaiset

$\eta$	hyötysuhde	%
--------	------------	---

### Alaindeksit

C	kylmä (cold)
el	sähkö
H	kuuma (hot)
hk	huolto- ja kunnossapito
i	ideaalinen
in	sisään
K	kattila
out	ulos
pa	polttoaine

## **Lyhenteet**

AN	annuiteetti
CHP	yhdistetty lämmön- ja sähköntuotanto (Combined Heat and Power)
COP	tehokerroin (Coefficient of Performance)
KL	kaukolämpö
KPA	kiinteä polttoaine
LK	lämpökattila
LP	lämpöpumppu
NA	nykyarvo
POK	kevyt polttoöljy

# 1 JOHDANTO

Energiateollisuudessa eletään mielenkiintoisia aikoja. Puhutaan energiamurroksesta, jonka seurauksena energian tuotantorakennetta pyritään muuttamaan erilaisin keinoin ympäristöystävällisemmäksi. Useat energiayhtiöt ovat asettaneet hiilineutraalisuuteen liittyviä tavoitteita, jotka perustuvat Suomen valtion tavoitteeseen olla hiilineutraali vuonna 2035 (Valtioneuvosto 2019). Tiukentuneiden päästövähennystavoitteiden vuoksi kaukolämmön tuottajat etsivät erilaisia ratkaisuja korvaamaan fossiilisia energialähteitä ja polttoon perustuvaa tekniikkaa (Passi et al. 2016, 5).

Vuonna 2020 kaukolämmön tuotannon hiilidioksidipäästöt Suomessa olivat 4,4 miljoonaa tonnia (Energiateollisuus ry 2021a, 9). Lämpöpumput ovat yksi vaihtoehto tuottaa lämpöenergiaa muiden vaihtoehtojen rinnalla ja niiden avulla on mahdollista korvata polttoon perustuvia ratkaisuja, jolloin kaukolämmön tuotannon päästöt ja erityisesti paikalliset päästöt vähenevät. Suomessa lämpöpumppuja hyödynnetään kaukolämmön tuotannossa toistaiseksi melko vähän, etenkin pienissä kaukolämpöjärjestelmissä.

Tämän työn tavoitteena on selvittää, onko haketta polttavan kaukolämpökattilan korvaaminen lämpöpumpulla kannattavaa. Tarkastelun tehdään pääasiassa taloudellisesta näkökulmasta. Lämmöntuottajalla on kaksi lämpökeskusta, joista vanhempi on otettu käyttöön 90-luvun loppupuolella. Kyseinen lämpökeskus on tulossa käyttöikänsä päähän ja lämpöpumppulaitos nähdään kiinnostavana vaihtoehtona vanhan KPA-kattilan korvaajaksi. Lämpöpumppulaitoksen investointikustannus on mittava, joka tekee investoinnin kannattavuudesta haastavan. Lisäksi hake on uusiutuva ja toistaiseksi edullinen polttoaine, jonka vuoksi se on saavuttanut vankan aseman etenkin pienien kaukolämpöjärjestelmien energialähteenä.

Työssä tutustutaan kaukolämpöjärjestelmään, mekaaniseen kompressorikäyttöiseen lämpöpumppuun, lämpöpumpun käyttöön osana kaukolämpöjärjestelmää, sekä arvioidaan lämpöpumppuinvestoinnin kannattavuutta. Lämpöpumpun käytön hyötyjä, haasteita ja investoinnin kannattavuuteen vaikuttavia tekijöitä selvitetään perehtymällä toteutuneisiin lämpöpumppuhankkeisiin ja niistä tehtyihin tutkimuksiin. Investoinnin kannattavuutta arvioidaan annuiteettimenetelmän, nykyarvomenetelmän ja takaisinmaksuajan menetelmän avulla. Lämpöpumpulla ja lämpökattilalla tuotetun lämpöenergian ominaiskustannuksia vertaillaan, jonka perusteella arvioidaan lämpöpumpun käytön kannattavuutta.

Kaukolämmön tuotannossa käytetyt lämpöpumput ovat tavallisesti mekaanisia kompressorikäyttöisiä lämpöpumppuja, jonka vuoksi tässä työssä keskitytään kyseiseen lämpöpumpputyyppiin. Eri kaupunkien kaukolämpöjärjestelmät eroavat toisistaan esimerkiksi kokonsa ja lämmön tuotantorakenteen puolesta, jonka vuoksi myös lämpöpumpun rooli järjestelmässä vaihtelee. Kaukolämpöjärjestelmät voidaan jakaa kokonsa puolesta suuriin, keskisiin ja pieniin. (Passi et al. 2016, 5–6.) Tässä työssä kannattavuustarkastelu tehdään pienelle kaukolämpöjärjestelmälle, jossa lämpöä tuotetaan kahdella lämpökeskuksella, sekä huippulämpökeskuksilla.

Lämpöpumppujen käyttöä kaukolämpöjärjestelmässä on tutkittu aktiivisesti esimerkiksi Tanskassa 2010-luvun aikana. Suomessa lämpöpumppujen käyttöä kaukolämmön tuotannossa on tutkittu myös jonkin verran ja esimerkiksi Energiateollisuus ry on teettänyt selvityksen lämpöpumppujen hyödyntämismahdollisuuksista kaukolämpöjärjestelmässä (Passi et al. 2016). Lämpöpumppujen roolia on myös tutkittu suomalaisissa pienissä, keskisuurissa ja suurissa kaukolämpöjärjestelmissä (Kontu et al. 2018). Aikaisemmat tutkimukset ovat keskittyneet esimerkiksi toteutuneisiin hankkeisiin, lämpöpumppujen käytön hyötyihin, haasteisiin, rooliin ja potentiaaliin kaukolämpöjärjestelmässä. Yksittäisen tuotantoyksikön korvaamista lämpöpumpulla on kuitenkin tutkittu vähemmän.

## 2 KAUKOLÄMPÖ

Kaukolämmöllä tarkoitetaan keskitettyä lämmön tuotantoa ja sen jakelua asiakkaille kaukolämpöverkon avulla. Asiakkailta tarkoitetaan asuintaloja, kuten pientaloja ja kerrostaloja, liikerakennuksia, julkisia rakennuksia, sekä teollisuutta. Lämpöä tuotetaan keskitetysti yhdessä tai useammassa kohteessa ja siirretään tuottajalta asiakkaalle tavallisesti kaukolämpöverkossa kiertävän veden avulla. Kaukolämpövesi luovuttaa lämpöä asiakkaan rakennuksen tilojen ja käyttöveden lämmitykseen. (Koskelainen et al. 2006, 25.) Yksinkertaisuudessaan kaukolämpöjärjestelmän kokonaisuus muodostuu lämpöä tuottavista laitoksista, kaukolämpöverkosta, jonka avulla lämpö siirretään tuottajalta asiakkaille, sekä lämmön vastaanottoon ja jakeluun tarvittavista asiakaslaitteista (Koskelainen et al. 2006, 43).

### 2.1 Toimintaperiaate

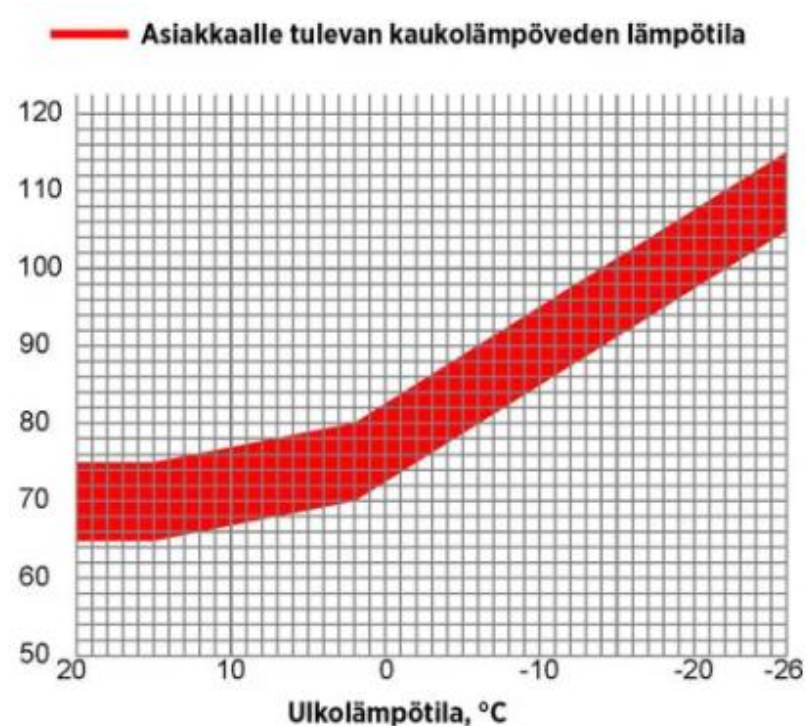
Asiakkaat on kytketty Suomessa kaukolämpöjärjestelmään epäsuorasti, eli asiakkailta on oma lämmityskierto, jonka vettä lämmitetään erillisissä lämmönsiirtimissä kaukolämpöveden avulla. Lämmön siirtämiseen käytetään meno- ja paluuputkea, eli puhutaan kaksiputkijärjestelmästä. Putket ovat samankokoisia, mutta verkoston eri osissa koko vaihtelee. Kuuma vesi virtaa menopuolella lämpölaitokselta asiakkaalle ja luovutettuaan lämmön, jäähtynyt vesi palaa paluuputkea pitkin uudelleen lämmitettäväksi. Kun lämmön siirtämiseen käytetään vettä, kyseessä on vesikaukolämpöjärjestelmä. (Koskelainen et al. 2006, 43–44.)

Vesi saadaan kiertämään verkostossa lämpölaitoksien pumppujen avulla. Pumput pitävät huolen myös siitä, että verkoston keskipaine pysyy riittävän korkealla tasolla. Varsinkin menopuolen paine on oltava riittävän korkea, ettei kuuma vesi pääse höyrystymään missään verkon osassa. (Koskelainen et al. 2006, 43–44.) Kaukolämpöjohdot mitoitetaan Suomessa kestämään 16 baarin paine ja 120 °C lämpötila. Paine vaihtelee verkon eri osissa ja on talvisin suurempi kuin kesäisin. Paineeseen vaikuttaa esimerkiksi veden lämpötila, etäisyys lämpölaitoksesta, sekä maaston muoto. (Koskelainen et al. 2006, 137, 338.) Jos verkoston paine jostain syystä romahtaa, koko kaukolämpöjärjestelmä on vaarassa kaatua.

Kaukolämpötehon tarve riippuu ulkolämpötilasta, jonka vuoksi suuri tehontarpeen vaihtelu on kaukolämmölle ominaista. Suurimmillaan tehontarve on talvisin kovilla pakkasilla ja alhaisimmillaan kesäisin. Kaukolämpöverkkoon lähtevän veden lämpötila riippuu



tehontarpeen tapaan ulkolämpötilasta. Talvella kovilla pakkasilla suuren tehontarpeen aikaan menoveden lämpötila on 115 °C ja kesällä lämpötila on alhaisempi, noin 70 °C. (Huh-tinen et al. 2013, 12, 14.) Paluveden lämpötilan määrittää asiakaslaitteiden ominaisuudet ja se vaihtelee 40–60 °C välillä (Koskelainen et al. 2006, 335, 492). Kaukolämpöverkot voidaan mitoittaa myös alemmille lämpötilatasoille, jos siirtomatkat ovat lyhyet, koska lyhyillä siirtomatkalla lämpöhäviöt ovat pienemmät. Kuvassa 1 on esitetty asiakkaalle tulevan kaukolämpöveden lämpötilan riippuvuus ulkolämpötilasta (Helen Oy).



**Kuva 1.** Asiakkaalle tulevan kaukolämpöveden lämpötilan riippuvuus ulkolämpötilasta (<https://www.helen.fi/lammitys-ja-jaahdytys/kaukolampo/nykyisille-asiakkaille/kaukolampolaitteet>).

## 2.2 Tuotantorakenne

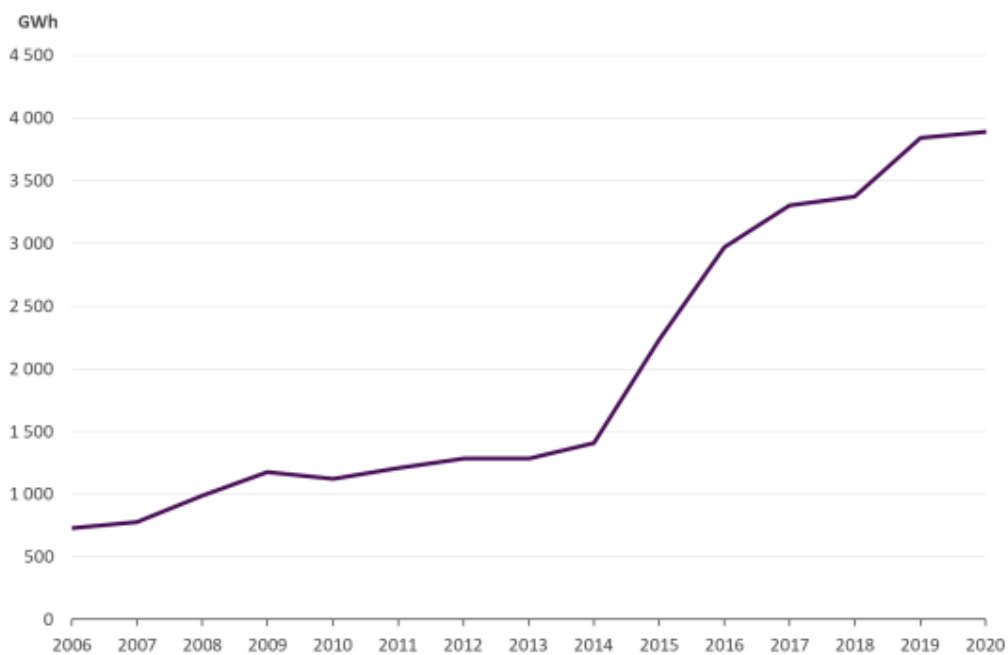
Kaukolämmön hankinta Suomessa vuonna 2019 oli yhteensä 36,6 TWh. Lämpöenergiasta 89,5 % tuotettiin polttoaineilla ja loput 10,5 % hukkalämpöjen talteenotolla, sekä lämpöpumpuilla. Suomessa suurin osa kaukolämmöstä tuotetaan CHP-laitoksissa, joilla tarkoitetaan lämmön ja sähkön yhteistuotantolaitoksia. CHP-laitoksia on tavallisesti suurissa kaupungeissa ja pienemmissä kaupungeissa kaukolämpö tuotetaan erillistuotantona. Yhteistuotannon kokonaishyötysuhde on korkea verrattuna sähkön ja lämmön erillistuotantoon. Vuonna 2019 yhteistuotannon osuus kokonaistuotannosta oli noin 67 % ja erillistuotannon 33 %. (Energiateollisuus ry 2020a, 3.)

Fossiilisten polttoaineiden käyttö kaukolämmön tuotannossa on vähentynyt ja vuonna 2019 Suomessa tuotettiin uusiutuvilla polttoaineilla ensimmäistä kertaa enemmän kaukolämpöä kuin fossiilisilla (Suomen virallinen tilasto 2020). Taulukossa 1 on esitetty kaukolämmön hankinnan energialähteet vuosina 2018 ja 2019 (Energiateollisuus ry 2020a, 4).

**Taulukko 1.** Kaukolämmön hankinnan energialähteet vuosina 2018 ja 2019 (Energiateollisuus ry 2020a, 4).

Polttoaine	2018	2019
Kivihiili	19,3 %	17,4 %
Turve	15,4 %	15,1 %
Maakaasu	12,5 %	10,6 %
Metsäpolttoaine	18,8 %	19,1 %
Teollisuuden puutähte	10,2 %	11,4 %
Muu biomassa	7,4 %	8,5 %
Hukkalämmöt	9,1 %	10,4 %
Öljy	2,2 %	1,9 %
Muut	5,1 %	5,6 %

Lämpöpumppujen tuotanto sisältyy taulukon 1 hukkalämpöihin. Hukkalämpöä otettiin talteen lämmönsiirtimillä 2,6 TWh ja lämpöpumpuilla tuotettiin 1,2 TWh kaukolämpöä (Energiateollisuus ry 2020b, 17). Lämpöpumpuilla tuotetun kaukolämmön osuus kokonaistuotannosta vuonna 2019 oli noin 3,3 %. Lämpöpumppujen tuotanto ja hukkalämmön talteenotto (kuva 2) on 3,5-kertaistunut 2010-luvun aikana (Energiateollisuus ry 2021a, 6).

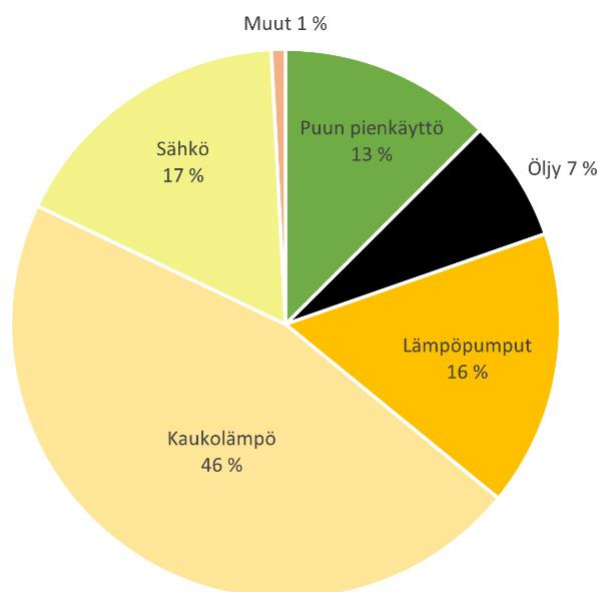


**Kuva 2.** Kaukolämmön tuotanto lämmön talteenotolla ja lämpöpumpuilla (Energiateollisuus ry 2021a, 6).

Kivihiilen käytöstä energiantuotannossa tullaan luopumaan viimeistään toukokuussa 2029. Turpeen käyttö pyritään puolittamaan vuoteen 2030 mennessä ja tämänhetkisten ennusteiden mukaan lopettamaan 2030-luvun aikana. (Valtioneuvosto 2019.) Maakaasu ja öljy tulevat luultavasti säilyttävät asemansa huippukuormalaitosten polttoaineena. Taulukosta 1 nähdään, että fossiilisten polttoaineiden ja turpeen yhteenlaskettu osuus vuonna 2019 on ollut 45 %. Lämpöä tarvitaan tulevaisuudessakin, joten fossiilisten polttoaineiden ja turpeen osuus pitää korvata jotenkin. Lämpöpumppujen hyödyntämispotentiaaliksi kaukolämmön tuotannossa Suomessa on vuonna 2018 tehdyssä tutkimuksessa arvioitu 3000–7600 GWh (Kontu et al. 2018, 868). Tämä vastaa noin 8–21 % osuutta vuoden 2019 kaukolämmön hankinnasta.

### 2.3 Markkinaosuus

Kaukolämpö on yksi lämmitysvaihtoehto, jonka vuoksi se kilpailee muiden lämmitysmuotojen kanssa (Koskelainen et al. 2006, 25). Kaukolämpö on Suomessa suosittu lämmitysmuoto ja sen markkinaosuus vuonna 2018 asuin- ja palvelurakennusten lämmityksessä oli 46 % (kuva 3). Seuraavaksi suurimpia osuuksia edustivat sähkölämmitys ja lämpöpumput. (Suomen virallinen tilasto 2019.) Kaukolämpö tulee todennäköisesti säilyttämään suosionsa tulevaisuudessakin, sillä asiakkaiden lukumäärä ja sopimusteho ovat kasvaneet vuosittain (Energiateollisuus ry 2020a, 5). Kaukolämmön suosiota asiakkaan näkökulmasta selittävät esimerkiksi sen luotettavuus ja helppokäyttöisyys (Energiateollisuus ry 2021b).



**Kuva 3.** Asuin- ja palvelurakennusten lämmitykseen käytettyjen energianlähteiden jakauma Suomessa vuonna 2018 (Suomen virallinen tilasto 2019).

### 3 LÄMPÖPUMPUT

Lämpöpumpun tehtävä on lämmön tuottaminen ja lämmön riittävän korkea lämpötilataso on lämmön hyödyntämisen edellytys. Lämpöpumpuilla on monia sovelluskohteita ja tarvittava lämpötilataso vaihtelee sovelluskohteesta riippuen. Kaukolämmön menoveden lämpötilataso vaihtelee olosuhteista riippuen 70–120 °C välillä. (Aittomäki et al. 2012, 336.) Tavallisesti lämpöpumppujen tuottama lämpötilataso kaukolämpöverkossa vaihtelee 70–80 °C välillä, mutta matalampia ja korkeampiakin lämpötilatasoja käytetään (David et al. 2017, 8).

Kaukolämmön tuotannossa käytetyt lämpöpumput ovat tavallisesti mekaanisia kompressorikäyttöisiä lämpöpumppuja. Kompressorikäyttöisen lämpöpumpun toiminta perustuu käänteiseen höyryprosessiin, eli käänteiseen Clausius-Rankine-prosessiin, jossa kiertoaineen painetta ja lämpötilaa muutetaan suljetun prosessikierron eri vaiheissa (Aittomäki et al. 2012, 66, 339). Tässä työssä keskitytään kyseiseen lämpöpumpputyypin.

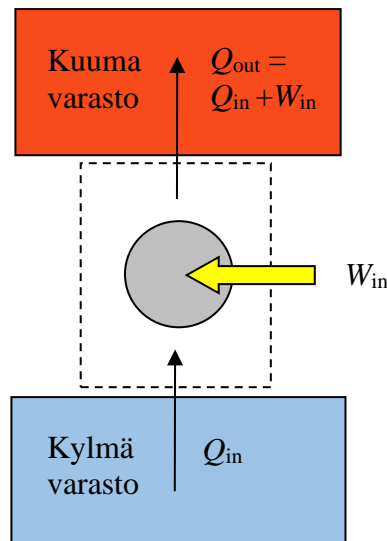
#### 3.1 Toimintaperiaate

Termodynamiikan toinen pääsääntö asettaa rajoitukset lämpöpumpun toiminnalle ja suorituskyvylle. Clausiuksen väittämän mukaan minkään systeemin toiminnan ainoana seurauksena ei voi olla lämmön siirtyminen kylmästä kappaleesta kuumempaan kappaleeseen. Kelvin-Planckin väittämän mukaan yhdellä lämpövarastolla toimivaa termistä kiertoprosessia, joka tuottaisi nettoenergiaa ympäristöön, on mahdotonta toteuttaa. (Moran ja Shapiro 2010, 177–178, 188.)

Lämpöpumpulla siirretään lämpöenergiaa kylmän ja kuuman lämpövaraston välillä (kuva 4). Systeemiin tuodaan lämpöenergiaa  $Q_{in}$  kylmästä lämpövarastosta ja systeemistä poistetaan lämpöenergiaa  $Q_{out}$  kuumaan lämpövarastoon. Tämä kiertoprosessi vaatii toimiakseen toisen pääsäännön nojalla, että systeemiin tuodaan työtä  $W_{in}$ , joka on kompressorikäyttöisen lämpöpumpun tapauksessa sähköä. Systeemiin tuotu työ voidaan esittää muodossa

$$W_{in} = Q_{out} - Q_{in} \quad (1)$$

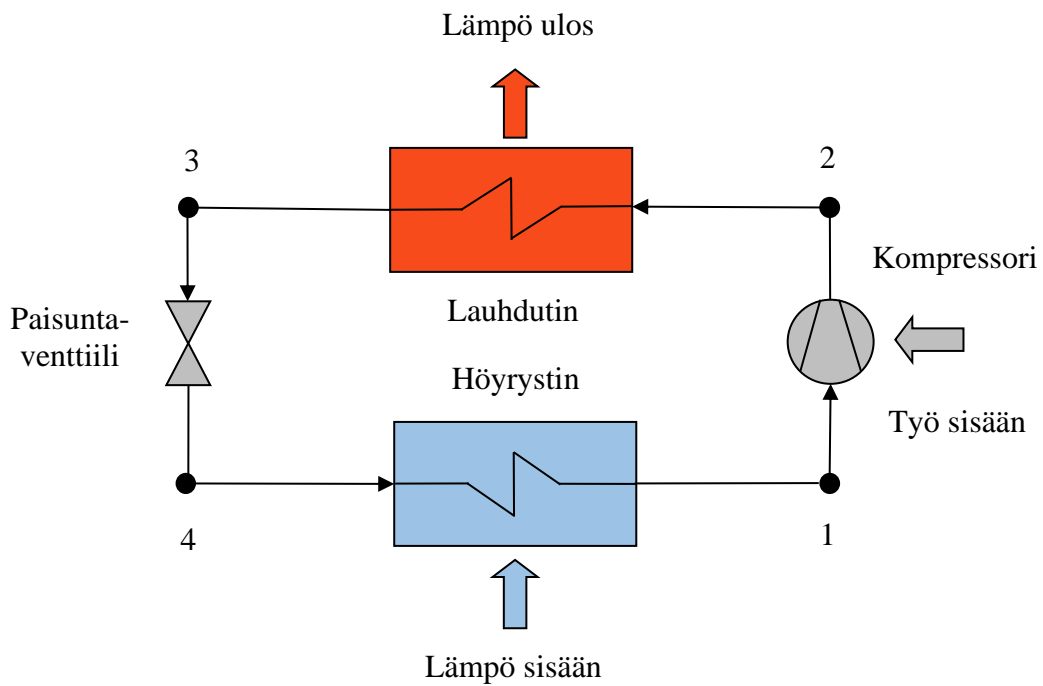
jossa  $Q_{out}$  on systeemistä kuumaan varastoon poistettu lämpö ja  $Q_{in}$  on kylmästä varastosta systeemiin tuotu lämpö. (Moran ja Shapiro 2010, 60–61.)



**Kuva 4.** Lämpöpumpun prosessi kahden lämpövaraston välillä (Moran ja Shapiro 2010, 59).

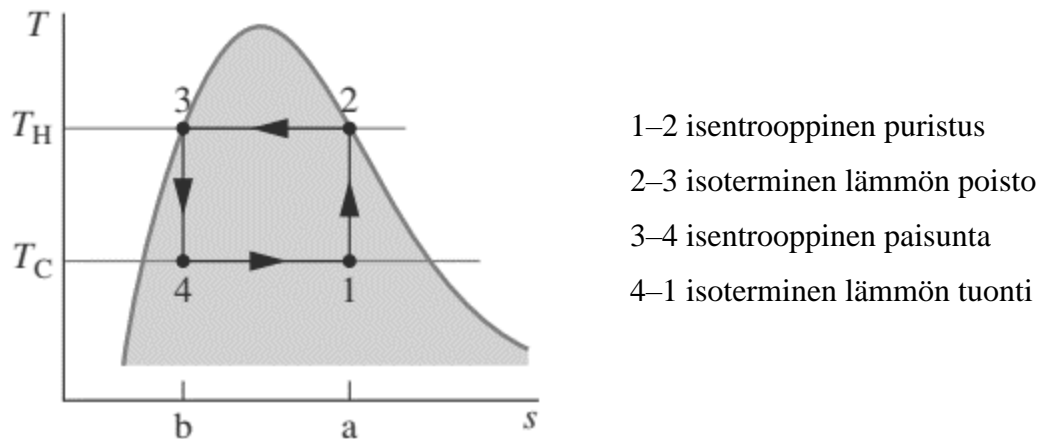
### 3.2 Ideaalinen ja todellinen lämpöpumpun prosessi

Yksinkertaisessa lämpöpumpun prosessissa kiertoaine virtaa neljän pääkomponentin, kompressorin (1–2), lauhduttimen (2–3), paisunta-venttiilin (3–4) ja höyrystimen (4–1) läpi (Moran ja Shapiro 2010, 457). Kuvassa 5 on esitetty lämpöpumpun pääkomponentit.



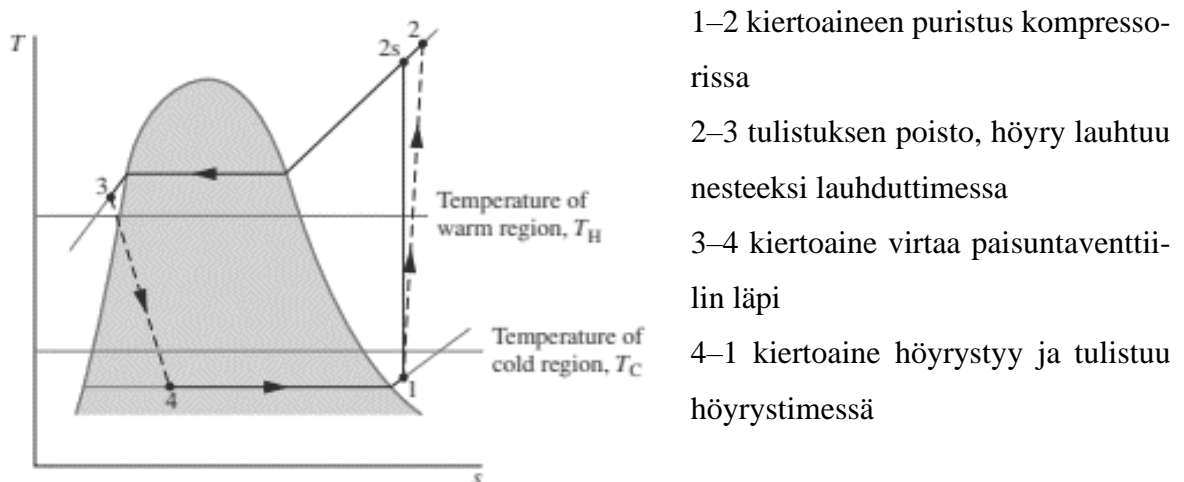
**Kuva 5.** Yksinkertaisen lämpöpumpun prosessin pääkomponentit (Moran ja Shapiro 2010, 457).

Carnot-prosessi kuvaa palautuvaa kahden lämpövaraston välillä toimivaa lämpövoimakonetta. Palautuvalla prosessilla tarkoitetaan ideaalista, eli häviötöntä prosessia. Käänteinen Carnot-prosessi kuvaa ideaalista lämpöpumppuprosessia, jossa lämmön tuonti ja poisto tapahtuvat vakio­lämpötilassa, sekä puristus ja paisunta ovat lämpöeristettyjä ja isentrooppisia. (Aittomäki et al. 2012, 4–5, 25.) Prosessin kulku  $T, s$  -tasossa on esitetty kuvassa 6.



**Kuva 6.** Carnot-lämpöpumppuprosessi  $T, s$  -tasossa (Moran ja Shapiro 2010, 455).

Todellinen lämpöpumppuprosessi (kuva 7) eroaa merkittävästi ideaalisesta lämpöpumppuprosessista. Todellinen prosessi ei ole palautuva ja siinä syntyy häviöitä. Kiertoaineen puristus kompressorissa ei ole isentrooppinen ja tapahtuu tulistetun höyryn alueella. Kosteaa höyryn alueella puristusta vältetään, koska nestepisarat voivat vahingoittaa kompressoria. Todellisessa prosessissa lämmön tuonti ja poisto eivät tapahdu vakio­lämpötilassa. Lisäksi kiertoaineen paisunnasta venttiilissä syntyy häviöitä. (Moran ja Shapiro 2010, 456–458.)



**Kuva 7.** Todellinen lämpöpumppuprosessi  $T, s$  -tasossa (Moran ja Shapiro 2010, 461).

### 3.3 Suorituskyky

Lämpöpumpun suorituskykyä kuvataan tehokertoimella, eli COP-luvulla. COP määritellään systeemistä poistetun lämmön ja systeemiin tehdyn työn suhteena, eli kuinka paljon saadaan lämpöä suhteessa kulutettuun sähkөөn. Yhtälö voidaan kirjoittaa toisessa muodossa, kun otetaan huomioon aiemmin esitetty yhtälö 1. (Moran ja Shapiro 2010, 61.)

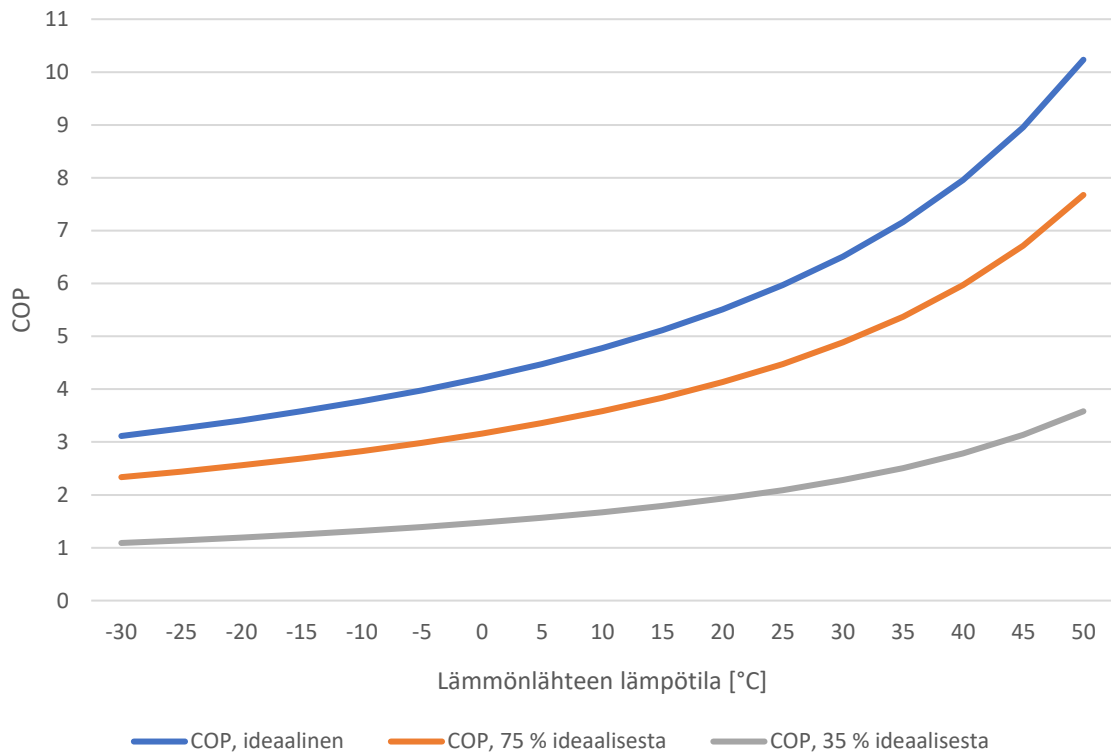
$$COP = \frac{Q_{out}}{W_{in}} = \frac{Q_{out}}{Q_{out} - Q_{in}} \quad (2)$$

Edellä esitetty tehokerroin kuvaa todellisen lämpöpumpppuolosessin suorituskykyä. Käänteisen Carnot-prosessin suorituskyky kuvaa lämpöpumpun tehokertoimen teoreettista ylärajaa. Todellisen lämpöpumpppuolosessin tehokerroin on aina pienempi kuin ideaalisen prosessin. (Aittomäki et al. 2012, 6.) Mekaanisten lämpöpumpppujen tehokerroin on tavallisesti noin 35–75 % ideaalisen prosessin tehokertoimesta (Maaskola ja Kataikko 2014, 17; Aittomäki et al. 2012, 337). Ideaalisen lämpöpumpppuolosessin suorituskyky riippuu ainoastaan prosessin lämpötiloista ja se voidaan esittää muodossa

$$COP_i = \frac{T_H}{T_H - T_C} \quad (3)$$

jossa  $T_H$  on prosessista poistetun lämmön lämpötila [K] ja  $T_C$  on prosessiin tuodun lämmön lämpötila [K] (Moran ja Shapiro 2010, 193).

COP:n suuruus riippuu lämmönlähteen, sekä tuotetun lämmön lämpötilatasoista. Lämmönlähteen matala lämpötilataso, sekä sovelluskohteen korkea lämpötilataso huonontavat tehokertoimta, koska lämpöpumpulta vaadittava lämpötilan nosto kasvaa. Tästä syystä kaukolämmön tuotannossa lämmönlähteen lämpötilatason tulisi olla mahdollisimman korkea. Kuvassa 8 on havainnollistettu COP:n riippuvuutta lämmönlähteen lämpötilasta, kun lämpöpumpun tuottaman lämmön lämpötilataso on 85 °C. Käyrät kuvaavat ideaalisen prosessin tehokertoimta, sekä 35 % ja 75 % tasoa ideaalisesta. Laskennassa ei ole otettu huomioon höyrystimen ja lauhduttimen asteisuuksia, jotka vaikuttavat tehokertoimeen laskevasti. Laskelmat löytyvät liitteestä 1.



**Kuva 8.** COP:n riippuvuus lämmönlähteen lämpötilasta, kun lämpöpumpun tuottaman lämpötilataso on 85 °C.

Lämpöpumpputeknologian kehittymisen myötä esimerkiksi kotimainen lämpöpumppuvalmistaja Calefa on tuonut markkinoille viime vuosina kuumalämpöpumppuja, joilla voidaan tuottaa jopa 130 °C lämpötilataso. Lisäksi kaukolämpöverkkoon sopivia lämpötilatasoja voidaan tuottaa hyvällä tehokertoimella matalasta lämmönlähteen lämpötilatasosta huolimatta. (Calefa Oy 2021, 46.) Kuumalämpöpumppujen tuottaman korkean lämpötilatason ansiosta lämpöpumpuilla tuotettua lämpöä on mahdollista syöttää huippupakkasillakin suoraan kaukolämpöverkon menopuolelle ilman priimausta, jos lämmönlähteen lämpötilataso on riittävän korkea. Priimauksella tarkoitetaan kaukolämpöveden lämpötilan nostamista vaadittavalle tasolle esimerkiksi erillisen kattilan avulla.

### 3.4 Lämmönlähteet kaukolämmön tuotannossa

Lämpöpumput voivat hyödyntää lämpötilatasoltaan monenlaisia lämmönlähteitä. Ympäristöstä löytyviä lämmönlähteitä ovat ulkoilma, maaperä, kallioperä, pohjavesi, aurinkolämpö, sekä erilaiset vesistöt, kuten joet, järvet ja meri. Lisäksi lämmönlähteeksi käy jätelämpö, kuten teollisuusprosessien tai jäteveden hukkalämpö. (Aittomäki et al. 2012, 350–355.)



Kaukolämpöjärjestelmä vaatii suuren tehonsa vuoksi myös suuritehoisen lämmönlähteen, jonka vuoksi sopivia ovat esimerkiksi jätevesi, teollisuuden hukkalämpö tai merivesi (Aittomäki et al. 2012, 346). Muun muassa Helsingissä, Turussa ja Espoossa hyödynnetään jätevettä lämmönlähteenä. Datakeskuksien hukkalämpöä hyödynnetään Helsingissä, Espoossa, sekä Mäntsälässä ja voimalaitoksen savukaasujen lämpöä Akaalla, sekä Riihimäellä. Lämmönlähteeksi soveltuu myös kaukojäähdytyksen paluuvesi, jota hyödynnetään Helsingissä. Merivettä hyödynnetään Suomessa toistaiseksi vähän, koska matalien rannikkojen vuoksi meriveden lämpötila ei ole talvisin riittävä. (Passi et al. 2016, 14–15.) Taulukossa 2 on esitetty Euroopassa kaukolämpöä tuottavien lämpöpumppujen lämmönlähteiden tyypillisiä lämpötilatasoja (David et al. 2017, 6).

**Taulukko 2.** Kaukolämmön tuotannossa käytettävien lämpöpumppujen lämmönlähteiden tyypillinen lämpötilataso (David et al. 2017, 6).

Lämmönlähde	Lämpötilataso [°C]
Jätevesi	10–20
Ympäristön vesi	2–15
Teollisuuden hukkalämpö	12–46
Geoterminen lämpö	9–55
Savukaasut	34–60
Kaukojäähdytys	0–9
Aurinkolämpövarasto	10–35

Lähivuosina Suomessa lämpöpumppujen lämmönlähteenä kaukolämmön tuotannossa tul- laan hyödyntämään todennäköisesti enemmän myös ulkoilmaa ja merivettä. Puumalaan val- mistui syksyllä 2019 lämpöpumppulaitos, jonka tuottamasta energiasta 75 % saadaan ulkoil- masta ja loput 25 % aurinkokeräimistä (Suur-Savon Sähkö 2019). Suomessa ei tällä hetkellä ole pelkästään merivettä käyttävää lämpöpumppulaitosta, mutta esimerkiksi Ruotsissa ja Norjassa on (Passi et al. 2016, 15). Helsingissä on kuitenkin tutkittu meriveden hyödyntä- mistä aktiivisesti ja Vuosaaren voimalaitoksen yhteyteen on rakenteilla kesäaikaan merive- den lämpöä hyödyntävä lämpöpumppu (Helen Oy 2019). Myös Turun Seudun Energiantuo- tanto Oy on tutkinut meriveden hyödyntämistä ja ilmoittanut investoivansa lämpöpumppu- laitukseen, jonka lämmönlähteenä hyödynnetään voimalaitosprosessin hukkalämpöä ja ke- sääaikaan merivettä (TSE Oy 2021). Lisäksi Fortum suunnittelee Espooseen kaukolämpö- verkkoon liitettävää ilma-vesilämpöpumppulaitosta (Fortum Oyj 2020).

## 4 LÄMPÖPUMPPU OSANA KAUKOLÄMPÖJÄRJESTELMÄÄ

Tässä luvussa perehdytään lämpöpumpun käytön hyötyihin ja haasteisiin kaukolämpöjärjestelmässä, investoinnin kannattavuuteen vaikuttaviin tekijöihin, sekä lämpöpumpun rooliin pienessä kaukolämpöjärjestelmässä. Edellä mainitut asiat vaikuttavan lämpöpumppuinvestoinnin toteutumiseen ja kannattavuuteen.

### 4.1 Hyödyt ja haasteet

Lämpöpumppujen käytöllä kaukolämpöjärjestelmässä on monia hyötyjä. Saavutettavat hyödyt riippuvat esimerkiksi kaukolämpöjärjestelmän koosta, ominaisuuksista, sekä lämpöpumpun roolista kaukolämpöjärjestelmässä. Lämpöpumput lisäävät kaukolämpöjärjestelmän joustavuutta erityisesti CHP-tuotannon yhteydessä. Lämpöpumppujen käynnistys on nopeaa ja käynnistyskustannukset ovat alhaiset. (Kontu et al. 2018, 867.) Lisäksi lämpöpumppulaitoksia voidaan usein ajaa melko joustavasti, koska niiden rakenne on tavallisesti modulaarinen, eli ne koostuvat useista lämpöpumpuista. Muiden laitosten käynnistämistä on mahdollista lykätä syksyllä ja alasajoa aikaistaa keväällä. Lämpöakkuun yhdistettynä lämpöpumpuilla on myös mahdollista hyödyntää sähkön hintaheilahtelua tai osallistua säätösähkömarkkinoille lämpöpumpun roolin niin salliessa. Lämpöenergiaa on mahdollista tuottaa lämpöakkuun sähkön ollessa edullista, mikäli hetkellistä kaukolämmön kulutusta ei ole riittävästi. (Passi et al. 2016, 23, 28.)

Lämpöpumput tarjoavat lämmöntuottajalle vaihtoehtoisen lämmöntuotantotavan. Tämä laajentaa lämmön tuotantorakennetta ja lisää uusiutuvan kaukolämmön osuutta. Kaukolämpöjärjestelmän joustavuuden lisääntyminen ja tuotantorakenteen laajentuminen auttavat lämmöntuottajaa suojautumaan markkinariskeiltä, kuten sähkön ja polttoaineiden hintojen heilahtelulta. (Kontu et al. 2018, 867.) Lisäksi lämpöpumput voivat hyödyntää lämpötilatasoltaan monenlaisia lämmönlähteitä, joka mahdollistaa sellaisten lämmönlähteiden hyödyntämisen, jotka muussa tapauksessa valuisivat todennäköisesti hukkaan. Tämänkaltaisia lämmönlähteitä ovat esimerkiksi jätevedet, teollisuusprosessien ja datakeskuksien hukkalämpö, sekä voimalaitosten savukaasujen lämpö. (Passi et al. 2016, 24.)

Lämpöpumppulaitokset vähentävät tavallisesti polttoon perustuvien lämmöntuotantotapojen käyttöä, jolloin lämmöntuotannon päästöt laskevat ja riippuvuus polttoaineista vähenee.

Esimerkiksi hiilidioksidipäästöjen lasku voidaan selvittää suoraviivaisesti. (Passi et al. 2016, 24.) Lämpöpumpulla tuotetun kaukolämmön päästöt riippuvat periaatteessa siitä, miten lämpöpumpun kuluttama sähkö on tuotettu. Lämpöpumput eivät kuitenkaan aiheuta paikallisia päästöjä, toisin kuin polttoon perustuvat laitokset. Pienemmät päästöt ja puhtaasti tuotettu energia vaikuttavat positiivisesti lämmöntuottajan maineeseen. (Kontu et al. 2018, 868.)

Hyötyjen ohella lämpöpumppujen käyttöön kaukolämpöjärjestelmässä liittyy myös haasteita ja riskejä. Kevyesti mitoitettu sähköverkko voi olla este lämpöpumpun käytölle, sillä käynnistyessään lämpöpumppu ottaa verkosta moninkertaisen tehon verrattuna normaaliin käyttötilanteeseen. Sähköverkon tulisi olla riittävän vahva lämpöpumpun kytkentäpisteessä, koska verkon vahvistaminen aiheuttaa ylimääräisiä kustannuksia. (Passi et al. 2016, 25.)

Lämmönlähteiden hyödyntämiseen liittyy niille ominaisia vaatimuksia ja haasteita. Riittävän lämmönlähteen olemassaolo tai sen käytettävyyden ajoittuminen kaukolämmön tarpeen suhteen voivat aiheuttaa haasteita. Toisaalta Calefan AmbiHeat lämpöpumppulaitokset voivat käyttää ulkoilmaa lämmönlähteenä, jota on aina saatavilla (Calefa Oy 2021, 8). Ulkoilma ei kuitenkaan ole talvipakkasilla paras lämmönlähde, koska sen lämpötila on alhainen ja kaukolämmön jakeluveden lämpötilataso on korkea. Lämpöpumpulta vaadittaisiin huippupakkasilla noin 140–150 °C lämpötilan nosto, jos lämpö haluttaisiin tuottaa suoraan kaukolämpöverkon menopuolelle ilman priimausta.

Vesivaihtoehtojen käyttö asettaa vaatimuksia veden suodatukselle, sekä höyrytimen rakenteelle ja materiaalille. Pohjaveden lämpötila on suhteellisen tasainen vuodenajasta riippumatta, mutta sen määrä on harvoin riittävä kaukolämmön tuottamiseen. Suomessa vesistöjen lämpötila on talvisin matala, jonka vuoksi jäähdytysvaraa ei ole paljon. Tämä asettaa haasteita joki-, järvi- ja meriveden hyödyntämiselle. Jäteveden määrä, lämpötila ja laatu voivat vaihdella suuresti vuorokauden eri aikoina, mutta jäähdytysvaraa on enemmän verrattuna ympäristön vesiin. (Aittomäki et al. 2012, 346, 353–354.) Komponenttien likaantuminen ja korrosio aiheuttavat tavallisesti ongelmia vesivaihtoehtojen käytössä (Passi et al. 2016, 13).

Teollisuusprosessien hukkalämmön käyttö lämmönlähteenä asettaa myös omat haasteensa. Hukkalämpöä on saatavilla silloin, kun teollisuusprosessi on käynnissä ja ajoitus voi olla kaukolämmön tarpeen kannalta huono. Joidenkin teollisuusalojen tulevaisuus saattaa olla

epävarma, joka luo epävarmuutta lämmönlähteen pysyvyydelle. (Passi et al. 2016, 13.) Kaasumaisia hukkalämpövirtoja käytettäessä lämmönsiirto höyrystimen kaasupuolella on heikkoa, joten lämmönsiirtopinta-alan tulee olla suuri. Samoin kuin vesivaihtoehtojen käytössä, myös kaasumaisilla vaihtoehtoilla lämmönsiirtimen likaantuminen ja korrosio aiheuttavat usein ongelmia. (Aittomäki et al. 2012, 355.)

Talvella haasteena on kaukolämmön jakeluveden korkea lämpötilataso. Lämmönlähteestä riippuen sen lämpötilataso voi olla matala, jolloin höyrystimen ja lauhduttimen välinen lämpötilaero on suuri ja tämän seurauksena lämpöpumpun COP on pieni. Lämpöpumput kykenevät tavallisesti tuottamaan ilman erikoisjärjestelyjä 85–90 °C vettä, joka riittää kaukolämmön tuotannossa loppukeväällä, kesällä ja alkusyksyllä. Talvella menoveden lämpötila on korkeampi, etenkin huippupakkasten aikaan, jolloin lämpöpumpun tuottamaa vettä on riittävä esimerkiksi lämpökattilalla. (Passi et al. 2016, 25.)

## **4.2 Investoinnin kannattavuuteen vaikuttavat tekijät**

Lämpöpumppuinvestoinnin kannattavuuteen vaikuttaa erityisesti korkea kokonaisinvestointikustannus. Lämpöpumppulaitteiston osuus kokonaisinvestointikustannuksesta on karkeasti puolet ja toisen puolikkaan muodostavat lämmönlähde, rakentaminen, sähköverkkoinvestoinnit, sekä konsultointi (Pieper et al. 2018, 365). Investoinnista tulee kannattavampi, mikäli alkuinvestointi saadaan minimoitua. Alkuinvestointia pienentää lämmönlähteen sijainti lähellä lämpökuormia, jolloin siirtoputkien rakentamiskustannukset ovat pienet, sekä vahva sähköverkko, jolloin vältetään sähköverkon vahvistamiseen liittyviltä kustannuksilta. Lisäksi edullinen tila, kuten voimalaitoksen tontti, lämpöpumppulaitoksen järjevä mitoitus, sekä mahdolliset investointituet pienentävät alkuinvestointia. (Passi et al. 2016, 29.)

Lämmönlähteellä on oleellinen vaikutus investoinnin kannattavuuteen. Hyvän sijainnin lisäksi lämmönlähteelle tärkeitä ominaisuuksia ovat pysyvyys, kaukolämmön tuotantoon soveltuva lämpötila ja mahdollisimman tasainen saatavuus. Lämmönlähteestä saatavan lämmön tulee myös olla edullista tai ilmaista. (Passi et al. 2016, 30–31.) Lisäksi lämpöpumpun roolin on oltava keskeinen ja luonteva kaukolämpöjärjestelmässä, jotta ajotunteja kertyy riittävästi. Muussa tapauksessa mittavaa alkuinvestointia ei välttämättä saada takaisin tai takaisinmaksuaika on kohtuuttoman pitkä, jonka seurauksena investointi ei ole kannattava. (Kontu et al. 2018, 867.)

Lämpöpumput kuluttavat merkittävän määrän sähköä, joten investoinnin kannattavuuteen vaikuttaa myös sähkön hinta. Lämpöpumppuinvestoinnit eivät kuitenkaan ole kovin herkkiä sähkön hintakehitykselle. Hintakehitystä on toisaalta vaikea ennustaa ja merkittävä hinnan nousu saattaa tehdä investoinnista kannattamattoman. (Kontu et al. 2018, 867.) Lämpöpumppujen kuluttamasta sähköstä maksetaan tällä hetkellä veroluokan I mukaista sähköveroä. On kuitenkin esitetty, että kaukolämpöä tuottavat lämpöpumput siirretään veroluokkaan II, jonka lisäksi veroluokan II sähköveroä alennetaan kohti EU:n sallimaa minimitasoa. (Valtioneuvosto 2019.) Tämä muutos tekee lämpöpumppujen käytöstä kannattavampaa, mikäli sähkön hinnan muut komponentit pysyvät entisellä tasollaan.

### **4.3 Lämpöpumpun rooli kaukolämmön tuotannossa**

Kaukolämpöjärjestelmät eroavat toisistaan monin tavoin, kuten kokonsa, lämmön tuotantorakenteen ja lämpötilatason suhteen, jonka vuoksi myös lämpöpumpun rooli kaukolämpöjärjestelmissä vaihtelee (Kontu et al. 2018, 867). Pienissä kaukolämpöjärjestelmissä lämpöpumpuilla korvataan tavallisesti lämpökeskuksilla tuotettua lämpöä. Lämpöpumpuilla pyritään myös minimoimaan huippukuormalaitosten käyttöä, koska niiden käyttämät polttoaineet, kuten kevyt polttoöljy, ovat huomattavan kalliita. (Passi et al. 2016, 26.) Pienissä kaukolämpöjärjestelmissä lämpöpumpun ajotapa tuotannossa on jatkuva/pohjakuorma (Kontu et al. 2018, 868).

Kontu et al. ovat toteuttaneet simuloinnin lämpöpumppujen käytöstä Suomessa pienissä, keskisuurissa ja suurissa kaukolämpöjärjestelmissä. Simulointi tehtiin sekä korkealla, että matalalla sähkön hinnalla. Pienessä kaukolämpöjärjestelmässä korkealla sähkön hinnalla lämpöpumpun mitoituksen ollessa 30 % huippukuormasta, se tuottaisi kaukolämmön tarpeesta 64,6 %, lämpökeskus 34,7 % ja huippulämpökeskus 0,7 %. Vastaavasti matalalla sähkön hinnalla mitoituksen pysyessä samana lämpöpumppu tuottaisi lämmöntarpeesta 73,1 %, lämpökeskus 26,2 % ja huippulämpökeskus 0,7 %. Huippulämpökeskuksien käyttötarve loppuu lämpöpumpun mitoituksen ollessa 50–60 % huippukuormasta riippuen siitä, onko sähkön hinta korkea vai matala. (Kontu et al. 2018, 865–866.)

Kontu et al. teettämän simuloinnin ja haastattelujen tuloksena olisi kannattavaa, että pienessä kaukolämpöjärjestelmässä lämpöpumppu tuottaisi 20–70 % lämmöntarpeesta. Tällöin lämpöpumpun mitoitus vastaisi noin 10–30 % huippukuormasta. Jotta kyseinen osuus

lämmöntarpeesta voidaan tuottaa lämpöpumpulla, tarvitaan merkittävä lämmönlähde. (Kontu et al. 2018, 867–868.) VALOR Partners Oy on teettänyt aikaisemmin samankaltaisen simuloinnin ja päätenyt vastaavanlaisiin tuloksiin (Passi et al. 2016, 35). Hyvä esimerkki pienessä kaukolämpöjärjestelmässä toteutetusta lämpöpumppuratkaisusta on Mäntsälässä, jossa lämpöpumpuilla tuotetaan merkittävä osa vuosittaisesta kaukolämmön tarpeesta (Nivos Oy 2016).

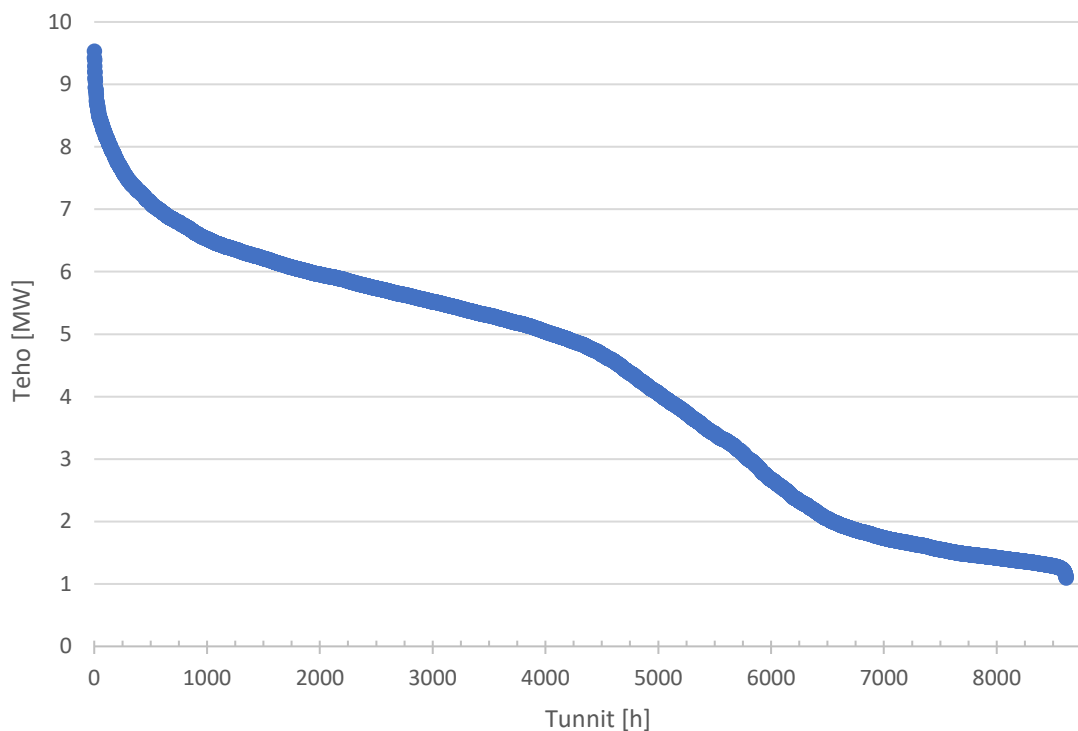
Tässä työssä tarkasteltavalla lämpöpumpulla on tarkoitus korvata vanhempi kaukolämpökattila, jonka teho on  $4,5 + 0,8$  MW (KPA-kattila + savukaasupesuri). Uuden lämpökeskuksen valmistumisen myötä vanhan KPA-kattilan käyttöaika on viime vuosina ollut toukokuun alusta syyskuun loppuun, jolloin se on tuottanut vaadittavan lämpökuorman kokonaisuudessaan. Lisäksi vanha KPA-kattila käynnistetään lämmityskaudella, kun uudemman lämpökeskuksen kapasiteetti ei yksin riitä. Vuosittain käyttöaika on ollut noin 4000–4400 tuntia. Vanhan KPA-kattilan rooli on merkittävä, sillä se tuottaa edelleen suuren osan kaukolämmöstä, jonka lisäksi sen avulla voidaan rajata POK-kattiloiden käyttö häiriötilanteisiin ja kulutushuippuihin. Edellä esitetyt tiedot perustuvat lämmöntuottajalta saatuun materiaaliin.

Lämpöpumpun rooli kaukolämmön tuotannossa olisi todennäköisesti merkittävämpi kuin vanhan KPA-kattilan. Lämpöpumpulla pyrittäisiin tuottamaan tarvittava lämpökuorma kokonaisuudessaan touko-syyskuussa ja mahdollisimman paljon tämän ajan ulkopuolella, jotta ajotunteja kertyisi riittävästi. Lämpöpumpulla olisi tärkeää kyetä saavuttamaan vastaavanlaiset hyödyt kuin vanhalla KPA-kattilalla, eli lämpöpumpulla olisi kyettävä talvella tukemaan uudempaa lämpökeskusta ja rajamaan POK-kattiloiden käyttöä.

Vastaavanlaisten hyötyjen saavuttaminen lämpöpumpulla voi olla kuitenkin haasteellista. Lämmönlähteestä riippuen lämpöpumpun teho talvella ja etenkin huippupakkasilla voi olla riittämätön tukemaan uudempaa lämpökeskusta. Lisäksi lämpöpumpun käyttö talvella voisi olla epäedullista, koska sähkön hinta on tavallisesti korkea ja lämpöpumpun COP voi olla matala olosuhteista riippuen. Tästä syystä lämpöpumpulla tuotettu lämpöenergia olisi luultavasti kalliimpaa kuin kattilalla tuotettu. Sähkön hinnan ollessa korkealla, lämpöä kannattaisi tuottaa talvikuukausina nykyiseen tapaan uudella lämpökeskuksella ja tarvittaessa myös vanhemmalla. Lämpöpumpulla voisi ajaa talvella sähkön hinnan niin salliessa.

Kuvassa 9 on esitetty lämpökeskusten yhteenlasketun tehon pysyvyyskäyrä, joka on muodostettu lämmöntuottajalta saadun mittausdatan avulla. Lämpöpumpun nimellislämpöteho voidaan arvioida vanhan KPA-kattilan tehon perusteella 5 MW, joka on noin 50 % huippukuormasta (kuva 9). Tällöin välttyttäisiin todennäköisesti POK-kattiloiden käytöltä, jota tavoitellaan myös vanhan KPA-kattilan käytöllä talvisin uudemman lämpökeskuksen tukena. Todellisuudessa lämpöpumpun mitoitus vaikuttaa esimerkiksi lämmönlähteen teho, mutta pysyvyyskäyrää voidaan käyttää apuna karkeaan arvioon.

Lämmöntuottajan kaukolämmön tarve on vuosittain noin 40 000 MWh. Arvioidaan lämpöpumpun kykenevän tuottamaan tästä puolet, eli 20 000 MWh. Kontu et al. simuloinnin perusteella pienessä kaukolämpöjärjestelmässä lämpöpumpun mitoituksen ollessa 50 % huippukuormasta, olisi lämpöpumpulla mahdollista tuottaa jopa noin 80–90 % lämmöntarpeesta. Tämä vaatisi kuitenkin merkittävän lämmönlähteen, jonka vuoksi arvioidaan tuotetun määrän olevan puolet vuosittaisesta lämmöntarpeesta. Toisaalta tällöin lämpöpumpun mitoitukseen riittäisi noin 20 % huippukuormasta, jolloin alkuinvestointi olisi huomattavasti pienempi. Pienemmällä mitoituksella lämpöenergiaa pitäisi kuitenkin todennäköisesti tuottaa talvella myös vanhalla KPA-kattilalla tai huippulämpölaitoksilla. (Kontu et al. 2018, 866.)



**Kuva 9.** Lämpökeskusten yhteenlasketun tehon pysyvyyskäyrä.

## 5 INVESTOINNIN KANNATTAVUUDEN ARVIOINTI

Tässä luvussa arvioidaan lämpöpumppuinvestoinnin taloudellista kannattavuutta osana kaukolämpöjärjestelmää. Arviointi tehdään tämän työn tapaukselle, jonka vuoksi tulokset eivät välttämättä ole päteviä toisessa kaukolämpöjärjestelmässä. Tarkastelu tulee tehdä tapauskohtaisesti huomioiden kyseiselle kaukolämpöjärjestelmälle ominaiset piirteet.

Riittävän lämmönlähteen olemassaolosta ei tämän työn puitteissa tehty selvitystä, vaan oletetaan, että riittävä lämmönlähde on olemassa ympäri vuoden. Todellisuudessa lämmönlähde määrää pitkälti lämpöpumpulla tuotettavan lämpöenergian määrän. Lämmönlähteen ja tuotetun lämmön lämpötilatasoihin ei myöskään oteta kantaa, vaan keskimääräinen COP arvioidaan toteutuneiden hankkeiden perusteella. Sähköverkon vahvuudesta ei tehty selvitystä, vaan sen oletetaan kestävän. Tarkemmassa kannattavuusanalyysissä edellä mainitut asiat tulisi selvittää tarkasti.

### 5.1 Käytetyt investointilaskentamenetelmät

Investoinnin kannattavuutta voidaan arvioida usealla menetelmällä, joita ovat annuiteettimenetelmä, nykyarvomenetelmä, sisäisen korkokannan menetelmä, takaisinmaksuajan menetelmä, sekä pääoman tuottoastemenetelmä. Luotettavan tuloksen saamiseksi investointia tulee arvioida vähintään kahdella menetelmällä. (Yritystulkki.)

Tässä työssä kannattavuutta arvioidaan annuiteettimenetelmän, nykyarvomenetelmän, sekä takaisinmaksuajan menetelmän avulla. Annuiteettimenetelmässä investointi jaetaan yhtä suuriksi vuosikustannuksiksi, eli annuiteeteiksi, pitoaikaa vastaaville vuosille. Investointi on kannattava, jos vuotuiset nettotulot ovat suuremmat kuin annuiteetti. Nykyarvomenetelmässä tulot ja kustannukset diskontataan nykyhetkeen valitun korkokannan avulla. Investointi on kannattava silloin, kun diskontatut nettotulot ovat suuremmat kuin investointi, eli hankkeen nykyarvo on positiivinen. Takaisinmaksuajan menetelmä ilmoittaa vuosina ajan, jossa investoinnin yhteenlasketut nettotulot ylittävät investointikustannuksen, eli investointi maksaa itsensä takaisin. Mitä lyhyempi investoinnin takaisinmaksuaika on, sitä parempi investointi on. (Yritystulkki.)



## 5.2 Kiinteät ja muuttuvat kustannukset

Energiantuotantolaitosten kustannukset voidaan jakaa kiinteisiin ja muuttuviin kustannuksiin. Jotta energian tuottaminen olisi kannattavaa, pitää energian myynnistä saatavien tulojen olla suuremmat kuin kustannuksien. Kiinteät kustannukset eivät ole riippuvaisia tuotetun energian määrästä. Kiinteisiin kustannuksiin voidaan lukea laitoksen investointikustannus, käyttöhenkilökunta, kiinteät huolto- ja kunnossapitokustannukset, polttoainevaraston korko, sekä vakuutukset. Muuttuviin kustannuksiin voidaan lukea erilaiset energiantuotannon määrästä riippuvat kustannukset, joita ovat polttoaineen kustannus, osa huolto- ja kunnossapitokustannuksista, omakäyttösähkö, CO<sub>2</sub>-päästöoikeus, sekä veden käsittely. (Huhtinen et al. 2013, 319–320.)

Tässä työssä huomioidaan kokonaisinvestointikustannus, kiinteät huolto- ja kunnossapitokustannukset, lämpöpumpun kompressorin vaihdon kustannus, lämpöpumpun kuluttaman sähkön kustannus, sekä kattilan polttoainekustannus. Muita kustannuksia ei huomioida, koska niiden tarkka selvitys on hankalaa tai ne ovat pieniä verrattuna tarkasteltaviin kustannuksiin.

## 5.3 Investointilaskennan alkuarvot ja tulokset

Lämpöpumpulaitoksen investointikustannukset vaihtelevat tapauskohtaisesti. Investointikustannuksen suuruus riippuu esimerkiksi lämmönlähteestä ja järjestelmän lämpötehosta. Suomessa toteutuneiden teollisen kokoluokan hankkeiden investointikustannuksista ei ole juurikaan saatavilla julkista tietoa. Sen sijaan esimerkiksi Tanskassa toteutuneiden hankkeiden kokonaisinvestointikustannuksia ja niiden jakautumista on tutkittu. Lämmönlähteestä ja lämpötehosta riippuen investoinnin suuruus liikkuu 440–1 910 €/kW välillä. Lämpöpumpun osuus kokonaisinvestoinnista on 38–54 % lämmönlähteestä riippuen. Lämpötehon kasvaessa suurten järjestelmien ominaisinvestointikustannus on tavallisesti matalampi kuin pienten järjestelmien. (Pieper et al. 2018, 365.)

VALOR Partners Oy:n selvityksessä investointikustannukseksi on oletettu 300 €/kW, kun lämpöpumpun tuottama lämpöenergia on alle 15 % vuotuisesta kaukolämmöntarpeesta ja 600 €/kW tämän osuuden ylittyessä. Tämä oletus perustuu siihen, että 15 % osuuteen asti lämpö on mahdollista kerätä esimerkiksi jätevedestä. Tämän osuuden ylittyessä

lämmönkeruu tapahtuu esimerkiksi maaperästä tai ympäristön vesistä, jolloin keruuputkisto ja höyrystimen materiaalit tekevät järjestelmästä kalliimman. (Passi et al. 2016, 33–34.)

Investointikustannuksen tarkka arviointi on hankalaa ja vaatisi laajemman selvityksen esimerkiksi lämmönlähteestä. Arvioidaan esitettyjen arvojen perusteella ominaisinvestointikustannuksen suuruudeksi 1 000 €/kW, josta lämpöpumppulaitteiston osuus on puolet. Lämpöpumpun teho on 5 000 kW aikaisemmin tehdyn arvion mukaan. Käytetään keskimääräisenä tehokertoimena arvoa 3, joka on arvioitu toteutuneiden hankkeiden perusteella (David et al. 2017, 8). Huolto- ja kunnossapitokustannukset ovat vuosittain 0,5 % lämpöpumpun investointihinnasta. Lämpöpumpun kompressorin tekninen käyttöaika vaihtelee 15–20 vuoden välillä ja sen vaihto kustantaa 10 % lämpöpumpun investointihinnasta. (Porkka, haastattelu 8.3.2021.)

Lämpöpumpulla tuotetaan lämpöenergiaa 20 000 MWh vuodessa aikaisemmin tehdyn arvion perusteella. Kaukolämmön myyntihintana käytetään 66 €/MWh, joka on lämmöntuottajalta saatujen tietojen perusteella määritetty vuosien 2015–2019 keskimääräinen veroton hinta. Ostosähkön keskimääräisenä hintana lämmöntuottajalle käytetään 90 €/MWh (Suomen virallinen tilasto 2021, 8). Investoinnin pitoaika on 20 vuotta ja korkokanta 5 %, joka on yleinen energiantuotantoon liittyvissä laskelmissa (Huhtinen et al. 2013, 319). Alkuarvot on esitetty selkeyden vuoksi alla olevassa taulukossa.

**Taulukko 3.** Investoinnin kannattavuuden laskennassa käytetyt alkuarvot.

Selite		
Kokonaisinvestointi:	5 000 000	€
Lämpöpumpun nimellisteho:	5 000	kW
Ominaisinvestointi:	1 000	€/kW
Lämpöpumpun COP:	3,0	
Huolto- ja kunnossapito:	12 500	€/a
Kompressorin uusinta:	250 000	€
Lämpöpumpun tuotanto:	20 000	MWh/a
Kaukolämmön myyntihinta:	66,0	€/MWh
Sähkön ostohinta:	90,0	€/MWh
Pitoaika:	20,0	a
Korkokanta:	0,05	

Luotettavan tuloksen saamiseksi investoinnin kannattavuus laskettiin kolmella menetelmällä, joita olivat annuiteettimenetelmä, nykyarvomenetelmä ja takaisinmaksuajan menetelmä. Jokaisella menetelmällä laskettuna investointi osoittautui kannattavaksi. Nettotuloiksi saatiin 695 000 €/a ja annuiteetiksi 401 213 €/a. Investointi on kannattava, koska nettotulot ovat suuremmat kuin annuiteetti. Investoinnin nykyarvoksi saatiin 3 661 236 €, joten investointi on kannattava, koska nykyarvo on selvästi positiivinen. Investoinnin korolliseksi takaisinmaksuajaksi saatiin 9,1 vuotta, joka on pitoaikaan nähden kohtuullinen. Laskelmissa ei otettu huomioon mahdollisia investointitukia, jotka olisivat pienentäneet alkuinvestointia ja parantaneet investoinnin kannattavuutta. Laskelmat löytyvät liitteestä 1.

#### 5.4 Tuotetun lämpöenergian ominaiskustannuksien vertailu

Tuotetun lämpöenergian ominaiskustannuksia vuoden aikana lämpöpumpun ja kattilan välillä voidaan vertailla tuotetun lämpöenergian määrän, lämpöpumpun kuluttaman sähkön kustannuksen, kattilan polttoainekustannuksen, sekä kiinteiden huolto- ja kunnossapitokustannuksien avulla. Tuotetun lämpöenergian määrä ja myyntihinta on esitetty taulukossa 3. Hakkeen hintana käytetään 25 €/MWh, joka on hieman todellista hintaa korkeampi. Hakkeen hinta on kuitenkin ollut viime aikoina nousussa. (Suomen virallinen tilasto 2021, 6–7.) Kattilan hyötysuhteena käytetään 90 % ja huolto- ja kunnossapitokustannuksina 50 000 €/a, joka perustuu lämmöntuottajan arvioon. Alkuarvot ja tulokset on esitetty taulukossa 4.

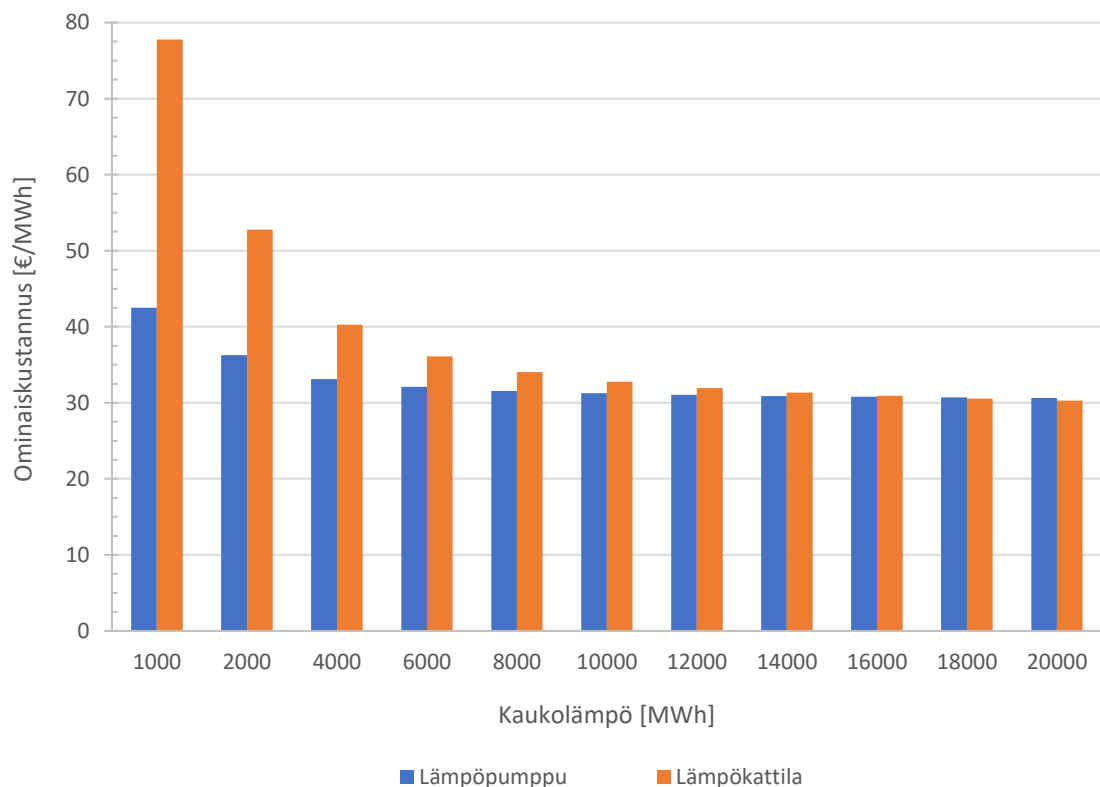
**Taulukko 4.** Tuotetun lämpöenergian ominaiskustannuksien vertailu.

Lämpöpumppu		Lämpökattila	
COP:	3,0	Kattilahyötysuhde:	0,9
Sähkön ostohinta:	90,0	Hakkeen hinta:	25,0 €/MWh
Huolto- ja kunnossapito:	12 500	Huolto- ja kunnossapito:	50 000 €/a
Sähkön kulutus:	6 667	Polttoaineen kulutus:	22 222 MWh/a
Sähkön kustannus:	600 000	Polttoainekustannus:	555 556 €/a
Nettotulot:	707 500	Nettotulot:	714 444 €/a
Ominaiskustannus:	30,6	Ominaiskustannus:	30,3 €/MWh

Havaitaan, että 20 000 MWh:n lämpöenergian ominaiskustannus lämpöpumpulla tuotettuna on 30,6 €/MWh ja lämpökattilalla 30,3 €/MWh. Taloudellisesta näkökulmasta katsottuna kyseisen lämpöenergiamäärän tuottaminen lämpöpumpulla ei ole niin kannattavaa kuin kattilalla, koska se tulee hieman kalliimmaksi. Lämmöntuottajat pyrkivät optimoimaan tuotantoon ja tuottamaan lämmön mahdollisimman edullisesti. Lämpöpumpulla tuotettu

lämpöenergia ei toisaalta ole merkittävästi kalliimpaa ja on kilpailukykyistä kattilalla tuotettuun lämpöön verrattuna. Hakkeen hinta on ollut viime aikoina nousussa ja nousun jatkuessa lämpöpumpun käyttö muuttuu kannattavammaksi, mikäli sähkön hinta pysyy entisellä tasolla. Lisäksi kaukolämmön tuotannossa käytettävien lämpöpumppujen kuluttaman sähkön verotukseen on kaavailtu muutoksia, joka lisää lämpöpumppujen käytön kannattavuutta, mikäli sähkön hinnan muut komponentit pysyvät entisellä tasolla. Tulokset ovat melko herkkiä erityisesti sähkön ja hakkeen hinnoille, joiden kehitystä on vaikea ennustaa.

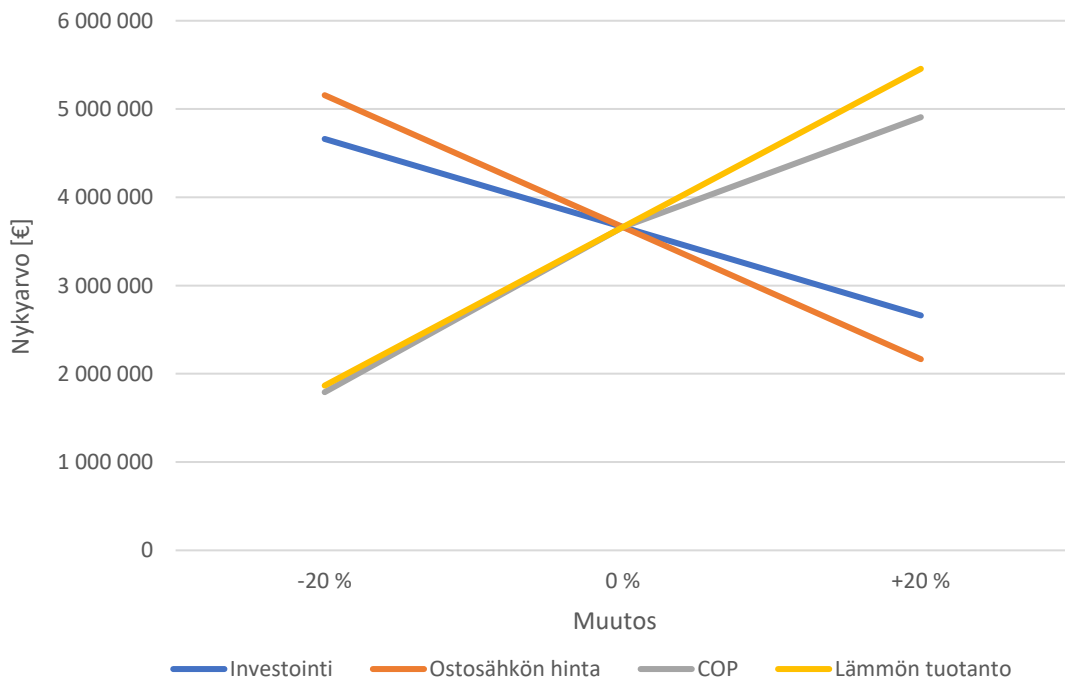
Kuvassa 10 on esitetty, kuinka tuotetun kaukolämmön ominaiskustannukset muuttuvat kaukolämmön tuotantomäärän funktiona. Lämpöpumpulla tuotettu lämpö on aluksi edullisempaa, mutta tuotantomäärän kasvaessa kustannukset tasoittuvat ja lopulta kattilalla tuotettu lämpö muuttuu edullisemmaksi. Lämpökattilalla tuotettu lämpö on pienillä tuotantomäärillä kalliimpaa, koska kiinteät huolto- ja kunnossapitokustannukset ovat suuret verrattuna lämpöpumpun vastaaviin. Tarkastelu on tehty yhden vuoden ajalle, joten lämpöpumpun kompressorin vaihtokustannusta ei ole huomioitu.



**Kuva 10.** Lämpöpumpulla ja kattilalla tuotetun lämmön ominaiskustannukset lämmön tuotantomäärän funktiona.

## 5.5 Herkkyysanalyysi

Investoinninlaskennan lähtöarvot sisältävät aina epävarmuutta, koska ne perustuvat suurelta osin arvioihin. Esimerkiksi sähkön hintakehitystä on hankala ennustaa, joten sähkön hinnalle arvioidaan tavallisesti tunnetun hintakehityksen perusteella jokin keskimääräinen arvo. Lähtöarvoja muuttamalla saadaan selville mitkä tekijät ovat herkimpiä muutoksille ja vaikuttavat eniten investoinnin kannattavuuteen. Tämänkaltaisten tekijöiden arvioinnin tarkkuuteen tulisi kiinnittää erityistä huomiota. Tarkastellaan, kuinka investoinnin kannattavuus muuttuu, kun investoinnin suuruus, ostosähkön hinta, COP ja lämmön tuotantomäärä muuttuvat jokainen vuorollaan  $\pm 20\%$  muiden arvojen pysyessä vakiona. Kuvassa 11 on esitetty muutoksien vaikutus investoinnin nykyarvoon.



**Kuva 11.** Investoinnin, ostosähkön hinnan, COP:n ja lämmön tuotantomäärän herkkyys muutoksille.

Havaitaan, että investoinnin kannattavuus on herkin COP:n ja lämmön tuotantomäärän muutoksille. COP riippuu yhtälön 2 mukaisesti tuotetun lämmön ja kulutetun sähkön suhteesta, sekä toisaalta yhtälön 3 mukaisesti tuotetun lämmön ja lämmönlähteen lämpötilataseista. Lämmön tuotantomäärään vaikuttavat lämmönlähteen teho, lämpöpumpun mitoitus ja lämpöpumpun rooli kaukolämpöjärjestelmässä. Kyseisiin tekijöihin tulee kiinnittää erityistä huomiota mahdollisimman luotettavien tuloksien saamiseksi ja investoinnin kannattavuuden parantamiseksi.

Investoinnin kannattavuuden herkkyyttä voidaan tutkia myös selvittämällä jokaiselle tarkasteltavalle muuttujalle kriittinen arvo, jolla hanke muuttuu kannattamattomaksi. Kriittiset arvot voidaan ratkaista esimerkiksi nykyarvomenetelmän avulla etsimällä tarkasteltavan muuttujan arvo, jolla investoinnin nykyarvosta tulee nolla. Taulukossa 5 on esitetty kriittiset arvot investoinnille, ostosähkön hinnalle, COP:lle ja lämmön tuotantomäärälle.

**Taulukko 5.** Investoinnin, ostosähkön hinnan, COP:n ja lämmön tuotantomäärän alkuarvot, sekä kriittiset arvot, joilla investoinnin nykyarvo on nolla.

	Alkuarvo	NA = 0
Investointi [€]:	5 000 000	8 661 236
Ostosähkön hinta [€/MWh]:	90,0	134,1
COP:	3,0	2,0
Lämmön tuotanto [MWh/a]:	20 000	11 839

Investoinnin suuruus saa olla korkeintaan 8 661 236 €, jonka jälkeen investointi muuttuu kannattamattomaksi. Ominaisinvestointina tämä olisi 1 732 €/kW. Ostosähkön hinta saa olla korkeintaan 134,1 €/MWh, COP:n on oltava vähintään 2,0 ja lämmön tuotantomäärän on oltava vähintään 11 839 MWh/a. Mikäli ostosähkön hinta ylittää kyseisen arvon, COP tai lämmön tuotantomäärä alittavat kyseiset arvot, investointi muuttuu kannattamattomaksi.

Tuotetun lämpöenergian ominaiskustannuksien tulokset ovat myös herkkiä muutoksille. Tarkastellaan ostosähkön hinnan, COP:n ja hakkeen hinnan muutoksien vaikutusta tuotetun lämmön ominaiskustannuksiin. Ostosähkön hinnan ja COP:n muutokset vaikuttavat lämpöpumpulla tuotetun lämmön ominaiskustannukseen ja hakkeen hinnan muutos kattilalla tuotetun lämmön ominaiskustannukseen. Taulukoissa 6 ja 7 on esitetty kuinka ominaiskustannukset muuttuvat, kun ostosähkön hintaa, COP:ta ja hakkeen hintaa muutetaan jokaista vuorollaan  $\pm 20$  % muiden arvojen pysyessä vakiona.

**Taulukko 6.** Lämpöpumpulla tuotetun lämmön ominaiskustannuksen muutokset, kun ostosähkön hinta ja COP muuttuvat  $\pm 20$  %.

	Ostosähkön hinta [€/MWh]			COP		
	- 20 %	0 %	+ 20 %	- 20 %	0 %	+ 20 %
	72,0	90,0	108,0	2,4	3,0	3,6
Ominaiskustannus [€/MWh]	24,6	30,6	36,6	38,1	30,6	25,6

**Taulukko 7.** Lämpökattilalla tuotetun lämmön ominaiskustannuksen muutokset, kun hakkeen hinta muuttuu  $\pm 20$  %.

	Hakkeen hinta [€/MWh]		
	- 20 %	0 %	+ 20 %
	20,0	25,0	30,0
Ominaiskustannus [€/MWh]	24,7	30,3	35,8

Havaitaan, että sähkön hinnan laskiessa 20 % lämpöpumpulla tuotetun lämmön ominaiskustannukset ovat alhaisimmat. Vastaavasti COP:n laskiessa 20 % lämpöpumpulla tuotetun lämmön ominaiskustannukset ovat korkeimmat. Lämpöpumpulla tuotetun lämmön kilpailukykyä kattilaan verrattuna parantavat eniten sähkön hinnan lasku ja hakkeen hinnan nousu. Vastaavasti lämpöpumpulla tuotetun lämmön kilpailukykyä heikentävät eniten sähkön hinnan nousu ja COP:n lasku.

## 6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Lämpöpumppuinvestoinnin kannattavuuteen vaikuttavat monet tekijät ja kannattavuuden tarkastelu on tehtävä tapauskohtaisesti huomioiden kaukolämpöjärjestelmälle ominaiset piirteet. Kaukolämpöjärjestelmät eivät ole samanlaisia, jonka vuoksi lämpöpumppuratkaisut eivät myöskään ole samanlaisia, vaan esimerkiksi lämpötilatasot ja COP vaihtelevat tapauskohtaisesti. Lisäksi lämpöpumpun käytöllä tavoiteltavat hyödyt saattavat olla erilaisia eri tapauksissa. Tästä syystä yhdessä kaukolämpöjärjestelmässä toimiva lämpöpumppuratkaisu ei välttämättä ole toimiva tai kannattava toisessa kaukolämpöjärjestelmässä.

Investointilaskelmien tulokset osoittavat, että tämän työn tapauksessa lämpöpumppuinvestointi on kannattava. Herkkyysanalyysissä tarkasteltujen tekijöiden muutokset eivät tee investoinnista kannattamatonta, vaan nykyarvo säilyy positiivisena (kuva 11). Vaikka lämpöpumpulla tuotetun lämpöenergian ominaiskustannukset ovat hieman korkeammat kuin kattilalla tuotetun, voidaan lämpöpumppulaitosta pitää kilpailukykyisenä lämmöntuotantovaihtoehtona kattilaan verrattuna. Taloudellisesta näkökulmasta katsottuna kaukolämpökattilan korvaamisen edellytykset lämpöpumpulla täyttyvät.

Investointilaskelmat mittaavat investoinnin taloudellista kannattavuutta, mutta investoinnin kannattavuutta voidaan tarkastella myös muista näkökulmista. Lämpöpumppuinvestointi vähentäisi lämmöntuotannon päästöjä ja riippuvuutta polttoaineista, sekä laajentaisi lämmön tuotantorakennetta. Lämmöntuotannon joustavuuden voidaan myös katsoa lisääntyvän lämpöpumppujen joustavan ajomahdollisuuden ja nopean käynnistymisen ansiosta. Vanhaa KPA-kattilaa joudutaan käytännössä ajamaan talvella jo ennen uuden lämpökeskuksen kapasiteetin täyttymistä minimikuormavaatimuksista ja käynnistymisen hitaudesta johtuen.

Laskennassa ei huomioitu kaikkia mahdollisia kustannuksia, jonka seurauksena investointi ei todellisuudessa ole niin kannattava kuin tulokset antavat ymmärtää. Lisäksi laskennan alkuarvot sisältävät jonkin verran epävarmuutta, koska ne perustuvat arvioihin. Tämän työn puitteissa ei myöskään selvitetty lämmönlähteen tehoa tai riittävyyttä, eikä sähköverkon vahvuutta, jotka tulee selvittää tarkasti lämpöpumppuinvestointia suunniteltaessa. Lämmönlähde ja sähköverkon vahvuus vaikuttavat esimerkiksi lämpöpumpun mitoitukseen. Tästä syystä tuloksiin tulee suhtautua kriittisesti ja varsinaisen investointipäätöksen tueksi vaadittaisiin laajempi selvitys.



Kokonaisinvestointikustannus arvioitiin karkeasti kirjallisuudesta löydettyjen arvojen ja toteutuneiden hankkeiden perusteella. Eri lähteistä löydetty investointikustannuksen arvot ovat suuntaa antavia ja auttavat hahmottamaan investoinnin suuruusluokkaa. Arvot eivät välttämättä ole keskenään vertailtavissa, koska lähteestä riippuen voidaan puhua joko lämpöpumpun investointikustannuksesta tai hankkeen kokonaisinvestointikustannuksesta. Investointilaskelmissa päästäisiin tarkempaan ja luotettavampaan tulokseen, mikäli investoinnin eri komponenttien suuruudet selvitetäisiin tarkasti. Tämä osoittautui kuitenkin työn laajuuden puitteissa liian työlääksi ja hankalaksi vaihtoehdoksi. Myös keskimääräinen COP arvioitiin toteutuneiden hankkeiden perusteella. Arvioinnissa oltiin varovaisia ja toteutuneissa hankkeissa on saavutettu tässä työssä käytettyä COP:ta suurempiakin arvoja.

Mahdolliset muutokset kaukolämpöä tuottavien lämpöpumppujen kuluttaman sähkön verotukseen ja hankkeen hinnan nousun jatkuessa, lämpöpumppuinvestointi ja lämpöpumppujen käyttö muuttuvat entistä kannattavammiksi. Lisäksi lämpöpumpputeknologian kehittyessä, tulevaisuudessa pystytään hyödyntämään entistä tehokkaammin erilaisia lämmönlähteitä, kuten ulkoilmaa. Tämä edistää lämpöpumppuinvestointien toteutumista esimerkiksi alueilla, joissa ainoa potentiaalinen lämmönlähde on ulkoilma.

Investoinnin taloudellisesta kannattavuudesta ja saavutettavista hyödyistä huolimatta voi investoinnin toteutumisen esteeksi muodostua esimerkiksi tekniset haasteet. Lämpöpumpun käytöllä voi olla haastavaa saavuttaa talvella samoja hyötyjä kuin kattilalla. Lämmönlähteestä riippuen, lämpöpumpulla saattaa olla haastavaa tukea uutta lämpökeskusta talvella ja tuottaa riittävästi lämpöä kulutushuippujen aikaan. Tällöin olisi mahdollisesti käytettävä enemmän POK-kattiloita kuin vanhan KPA-kattilan tapauksessa, joka olisi lämmöntuottajalle epäedullista kevyen polttoöljyn korkean hinnan vuoksi.

Jatkotutkimukset voisivat keskittyä potentiaalisten lämmönlähteiden kartoittamiseen ja sähköverkon vahvuuden tutkimiseen lämpöpumpun kytkentäpisteessä, jolloin esimerkiksi kustannuksista saataisiin tarkempi arvio. Erityisesti geotermisen lämmönlähteen hyödyntäminen nähdään yrityksessä kiinnostavana vaihtoehtona. Geotermisen lämmönlähteen tapauksessa investoinnin kannattavuus on vahvasti riippuvainen mittavista porauskustannuksista.

## 7 YHTEENVETO

Tiukentuneet päästövähennystavoitteet ohjaavat kaukolämmön tuottajia etsimään ympäristöystävällisempiä lämmöntuotantotapoja. Tämän työn tavoitteena oli selvittää, onko haketta polttavan kaukolämpökattilan korvaaminen lämpöpumpulla kannattavaa. Vanha KPA-kattila on tulossa käyttöikänsä päähän ja sen korvaaminen lämpöpumppulaitoksella nähdään kiinnostavana vaihtoehtona. Kannattavuuden tarkastelu tehtiin pienelle kaukolämpöjärjestelmälle, jossa lämpöä tuotetaan kahdella lämpökeskuksella, sekä huippulämpökeskuksilla.

Lämpöpumppujen käytöllä kaukolämpöjärjestelmässä on mahdollista saavuttaa useita hyötyjä. Saavutettavat hyödyt riippuvat esimerkiksi kaukolämpöjärjestelmän koosta, ominaisuuksista ja lämpöpumpun roolista kaukolämpöjärjestelmässä. Pienissä kaukolämpöjärjestelmissä lämpöpumpulla korvataan tavallisesti lämpökeskuksien tuotantoa, jolloin tuotannon päästöt ja etenkin paikalliset päästöt laskevat. Lämpöpumput lisäävät myös tuotannon joustavuutta ja laajentavat tuotantorakennetta, joka auttaa lämmöntuottajaa suojautumaan polttoaineiden hintojen heilahtelulta.

Lämpöpumppujen käyttöön liittyy myös jonkin verran haasteita, joista investoinnin kannattavuus on riippuvainen. Mikäli esimerkiksi sähköverkko ei ole lämpöpumpun kytkentäpisteessä riittävän vahva, lämmönlähteen teho on pieni tai riittämätön, voi investointi olla kannattamaton tai mahdoton toteuttaa. Lisäksi, jos lämpöpumpun rooli kaukolämpöjärjestelmässä ei ole merkittävä ja ajotunnit jäävät vähäisiksi, investointi saattaa olla kannattamaton. Lämpöpumpulla voi myös olla talvella haastavaa saavuttaa vastaavia hyötyjä kuin vanhalla KPA-kattilalla saavutetaan.

Investoinnin kannattavuuslaskelmien tulokset osoittavat, että tämän työn tapauksessa kaukolämpökattilan korvaaminen lämpöpumpulla on mahdollista taloudellisesta näkökulmasta. Lämpöpumpulla tuotetun lämmön ominaiskustannus osoittautui hieman suuremmaksi kuin lämpökattilalla tuotetun lämmön ominaiskustannus. Ero on kuitenkin pieni ja lämpöpumpua voidaan pitää kilpailukykyisenä lämmöntuotantotapana haketta polttavaan lämpökattilaan verrattuna. Investoinnin taloudellisesta kannattavuudesta ja saavutettavista hyödyistä huolimatta investoinnin toteutumisen esteeksi voivat muodostua esimerkiksi tekniset haasteet, kuten riittävän lämmönlähteen puuttuminen.

## LÄHTEET

Aittomäki, Antero (toim.) et al. 2012. Kylmäteknikka. 4. painos. Helsinki: Suomen kylmäyhdistys ry. 413 s. ISBN 978-951-96449-7-4.

Calefa Oy. 2021. AmbiHeat -esite. AmbiHeat by Calefa. 360 kW–10 MW lämpöpumppulaitokset. [verkkajulkaisu]. [viitattu 2021-03-04]. 52 s. Saatavissa: <http://www.calefa.fi/fi/>

David, Andrei, Brian, Vad Mathiesen, Helge, Averfalk, Sven, Werner ja Henrik, Lund. 2017. Heat Roadmap Europe: Large-Scale Electric Heat Pumps in District Heating Systems. Energies 2017. 18 s. [viitattu 2021-03-05]. Saatavissa: <https://www.mdpi.com/1996-1073/10/4/578>

Energiateollisuus ry. 2020a. Kaukolämpötilasto 2019. [verkkajulkaisu]. [päivitetty 2020-11-12] [viitattu 2020-12-01]. Saatavissa: <https://energia.fi/uutishuone/materiaalipankki/kaukolampotilasto.html#material-view>

Polku: <https://energia.fi/>; Tilastot, Kaukolämpötilastot; Kaukolämmitys ja -jäähdytys; Kaukolämpötilasto;

Energiateollisuus ry. 2020b. Kaukolämpö 2019 [verkkajulkaisu]. [päivitetty 2020-11-05]. [viitattu 2020-12-21]. Saatavissa: [https://energia.fi/uutishuone/materiaalipankki/energia-vuosi\\_2019\\_-\\_kaukolampo.html#material-view](https://energia.fi/uutishuone/materiaalipankki/energia-vuosi_2019_-_kaukolampo.html#material-view).

Polku: <https://energia.fi/>; Uutishuone; Materiaalipankki; Kaukolämpö ja -jäähdytys; Esitykset; Energiavuosi 2019 – Kaukolämpö.

Energiateollisuus ry. 2021a. Energiavuosi 2020 – Kaukolämpö. [verkkajulkaisu]. [päivitetty 2021-02-18]. [viitattu 2021-03-14]. Saatavissa: [https://energia.fi/uutishuone/materiaalipankki/energiavuosi\\_2020\\_-\\_kaukolampo.html#material-view](https://energia.fi/uutishuone/materiaalipankki/energiavuosi_2020_-_kaukolampo.html#material-view)

Polku: <https://energia.fi/>; Uutishuone; Materiaalipankki; Esitykset;

Energiateollisuus ry. 2021b. Miksi kaukolämpö? [verkkajulkaisu]. [viitattu: 2021-01-18]. Saatavissa: <https://kaukolampo.fi/miksi-kaukolampo/>. Polku: <https://kaukolampo.fi/>; Kaukolämpö.

Fortum Oyj. 2020. Fortum suunnittelee Suomen suurinta kaukolämpöverkkoon liitettävää ilma-vesilämpöpumppulaitosta – hankkeelle TEM:in tukea. [verkkajulkaisu]. [viitattu 2021-03-30]. Saatavissa: <https://www.fortum.fi/media/2020/12/fortum-suunnittelee-suomen-suurinta-kaukolampoverkkoon-liitettavaa-ilma-vesilampopumppulaitosta-hankkeelle-temin-tukea>

Polku: <https://www.fortum.fi/>; Kaukolämpö; Espoo Clean Heat – hiilineutraali kaukolämpö Espooseen 2020-luvulla; Vermon ilma-vesilämpöpumppulaitos

Helen Oy. 2019. Merivesilämpöpumput kiinnostava mahdollisuus myös Helsingissä.

[verkkajulkaisu]. [julkaistu 2019-03-14]. [viitattu 2021-01-19]. Saatavissa:

<https://www.helen.fi/helen-oy/vastuullisuus/ajankohtaista/blogi/2019/merivesilampopumput>

Polku: <https://www.helen.fi/>; Uutta voimaa -blogi; 2019;

Helen Oy. 2019. Vuosaaren uusi, ainutlaatuinen meriveden lämpöä hyödyntävä lämpöpumppu. [verkkajulkaisu]. [julkaistu 2019-04-04]. [viitattu 2021-01-19]. Saatavissa:

<https://www.helen.fi/uutiset/2019/merivesilampopumppu>

Polku: <https://www.helen.fi/>; Ajankohtaista; Kaukolämpö; 2019;

Huhtinen, Markku, Korhonen, Risto, Pimiä, Tuomo ja Urpalainen, Samu. 2013. Voimalaistekniikka. 4. painos. Opetushallitus. 344 s. ISBN 978-952-13-5426-7.

Kontu K., Rinne S. ja Junnila S. 2018. Introducing modern heat pumps to existing district heating systems - Global lessons from viable decarbonizing of district heating in Finland. Energy 166 (2019). 862–870 s. [viitattu 2021-03-14]. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S036054421832067X>

Koskelainen, Lassi, Saarela, Rauli ja Sipilä, Kari. 2006. Kaukolämmön käsikirja. Energia- ja teollisuus ry. Helsinki: Libris Oy. 566 s. ISBN 952-5615-08-1.

Moran, Michael J. ja Shapiro, Howard N. 2010. Fundamentals of Engineering Thermodynamics. 6th edition. Hoboken NJ: John Wiley & Sons. 725 s. ISBN-978-0-470-54019-0.

Nivos Oy. 2016. Yandexin datakeskuksen kanssa yhteistyössä luotu ekosysteemi lämmit-  
tää Mäntsälässä. [verkkajulkaisu.] [päivitetty 2019-07-30]. [viitattu 2021-04-02]. Saata-  
vissa: <https://www.nivos.fi/yrityksille/asiakastarina/yandexin-datakeskuksen-kanssa-yhteistyossa-luotu-ekosysteemi-lammittaa>

Polku: <https://www.nivos.fi/>; Yrityksille; Lämmitysratkaisut; Energiaratkaisut;

Passi, Pekka, Ruohonen, Seppo, Kontu, Kaisa ja Rinne, Samuli. 2016. Suuret lämpöpum-  
put kaukolämpöjärjestelmässä. VALOR Partners Oy. Energiateollisuus ry. 50 s. [verkkoo-  
julkaisu]. [viitattu 2020-01-08]. Saatavissa: [https://energia.fi/uutishuone/materiaali-pankki/suuret\\_lampopumput\\_kaukolampojarjestelmassa\\_tutkimushanke.html#material-view](https://energia.fi/uutishuone/materiaali-pankki/suuret_lampopumput_kaukolampojarjestelmassa_tutkimushanke.html#material-view)

Pieper, Henrik et al. 2018. Allocation of investment cost for large-scale heat pumps supp-  
lying district heating. Energy Procedia 147 (2018) 358–367 s. [viitattu 2021-02-05]. Saata-  
vissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610218302613>

Porkka, Antti. 2021. Calefa Oy. Puhelinkeskustelu 8.3.2021.

Suomen virallinen tilasto. 2019. Rakennusten lämmitys. Asuin- ja palvelurakennusten läm-  
mityksen hyötyenergia. Helsinki: Tilastokeskus. [verkkajulkaisu]. [viitattu 2020-12-01].  
Saatavissa: [https://pxhopea2.stat.fi/sahkoiset\\_julkaisut/energia2019/html/suom0006.htm](https://pxhopea2.stat.fi/sahkoiset_julkaisut/energia2019/html/suom0006.htm)  
Polku: <https://www.stat.fi/>; Tilastot; Energia; Energia 2019 -taulukkopalvelussa; Energia  
2019 -taulukkopalvelu; Rakennusten lämmitys, Asuin- ja palvelurakennusten lämmityksen  
hyötyenergia.

Suomen virallinen tilasto. 2020. Sähkön ja lämmön tuotanto. Helsinki: Tilastokeskus.  
[verkkajulkaisu]. [päivitetty 2020-03-11]. [viitattu 2020-12-21]. ISSN=1798-5072.

Saatavissa: [http://www.stat.fi/til/salatuo/2019/salatuo\\_2019\\_2020-11-03\\_tie\\_001\\_fi.html](http://www.stat.fi/til/salatuo/2019/salatuo_2019_2020-11-03_tie_001_fi.html)

Suomen virallinen tilasto. 2021. Energian hinnat. 4. Vuosineljännes 2020. Helsinki: Tilas-  
tokeskus. [verkkajulkaisu]. [päivitetty 2021-03-11]. [viitattu 2021-03-14]. ISSN=1799-  
7984. Saatavissa: [https://www.tilastokeskus.fi/til/ehi/2020/04/ehi\\_2020\\_04\\_2021-03-11\\_tie\\_001\\_fi.html](https://www.tilastokeskus.fi/til/ehi/2020/04/ehi_2020_04_2021-03-11_tie_001_fi.html)

Suur-Savon Sähkö. 2019. Vuosikertomus 2019. [verkkajulkaisu]. [viitattu 2021-01-19].  
Saatavissa: <https://vuosikertomus.ssoy.fi/2019/liiketoiminta/energian-tuotanto>  
Polku: <https://www.ssoy.fi/>; Sidosryhmille; Vuosikertomukset ja osavuosikatsaukset;  
Vuosikertomus 2019; Liiketoiminta; Energian tuotanto

Turun Seudun Energiantuotanto Oy. 2021. TSE parantaa Naantalin voimalaitoksen monipolttoaineyksikön energiatehokkuutta lämpöpumppulaitoksella. [verkkajulkaisu]. [viitattu 2021-03-30]. Saatavissa: <https://www.tset.fi/tse-parantaa-naantalin-voimalaitoksen-monipolttoaineyksikon-energiatehokkuutta-lampopumppulaitoksella/>  
Polku: <https://www.tset.fi/>; Ajankohtaista;

Valtioneuvosto. 2019. Hiilineutraali ja luonnon monimuotoisuuden turvaava Suomi. [verkkajulkaisu]. [viitattu 2020-12-01]. Saatavissa: <https://valtioneuvosto.fi/marinin-hallitus/hallitusohjelma/hiilineutraali-ja-luonnon-monimuotoisuuden-turvaava-suomi>  
Polku: <https://valtioneuvosto.fi/etusivu>; Marinin hallitus; Hallitusohjelma; Strategiset kokonaisuudet

Yritystulkki. Wirma. Investoinnin kannattavuus. [verkkajulkaisu]. [viitattu 2021-03-02].  
Saatavissa: <https://www.yritystulkki.fi/fi/alue/wirma/aloittava-yrittaja/suunnittelu/taloussuunnitelmat/investoinninkannattavuus/>  
Polku: <https://www.yritystulkki.fi/fi/>; Valitse kunta / Kaupunki; Lappeenranta; Aloittava yrittäjä; Suunnittelu; Taloussuunnitelmat; Investoinnin kannattavuus

**Laskut:****COP:**

Lämpöpumpun tuottama lämpötilataso on 85 °C ja lämmönlähteen lämpötilataso on 10 °C.

Laskelmissa ei ole huomioitu höyrystimen ja lauhduttimen asteisuuksia.

$$COP_i = \frac{T_H}{T_H - T_C} = \frac{358,15 \text{ K}}{358,15 \text{ K} - 283,15 \text{ K}} = 4,8$$

$$COP_{75\%} = \frac{358,15 \text{ K}}{358,15 \text{ K} - 283,15 \text{ K}} \cdot 0,75 = 3,6$$

$$COP_{35\%} = \frac{358,15 \text{ K}}{358,15 \text{ K} - 283,15 \text{ K}} \cdot 0,35 = 1,7$$

**Taulukko 1. (Liite I).** COP:n riippuvuus lämmönlähteen lämpötilasta, kun lämpöpumpulla tuotetun lämmön lämpötilataso on 85 °C.

$T_{\text{lähde}}$ [°C]	COP <sub>i</sub>	COP <sub>75%</sub>	COP <sub>35%</sub>
-30	3,1	2,3	1,1
-25	3,3	2,4	1,1
-20	3,4	2,6	1,2
-15	3,6	2,7	1,3
-10	3,8	2,8	1,3
-5	4,0	3,0	1,4
0	4,2	3,2	1,5
5	4,5	3,4	1,6
10	4,8	3,6	1,7
15	5,1	3,8	1,8
20	5,5	4,1	1,9
25	6,0	4,5	2,1
30	6,5	4,9	2,3
35	7,2	5,4	2,5
40	8,0	6,0	2,8
45	9,0	6,7	3,1
50	10,2	7,7	3,6

**Investoinnin kannattavuus:****Taulukko 2. (Liite I).** Investointilaskennan alkuarvot.

Selite		Kommentit:	
Kokonaisinvestointi:	5 000 000 €	(lämpöpumput 50 %)	2 500 000 €
Lämpöpumpun teho:	5 000 kW		
Ominaisinvestointi:	1 000 €/kW	(toteutuneet hankkeet)	
Lämpöpumpun COP:	3,0	(toteutuneet hankkeet)	
Huolto- ja kunnossapito:	12 500 €/a	(0,5 % LP:n hinnasta)	
Kompressorin uusinta:	250 000 €	(vaihto 15–20 vuodessa, 10 % LP:n hinnasta)	
Lämmön tuotanto:	20 000 MWh/a		
KL:n myyntihinta:	66,0 €/MWh	(2015–2019 keskimääräinen hinta)	
Ostosähkön hinta:	90,0 €/MWh	(Suomen virallinen tilasto)	
Pitoaika:	20,0 a		
Korkokanta:	0,05		

Nettotulot saadaan selville, kun vähennetään tuloista kaikki kustannukset. Tulot syntyvät kaukolämmön myyntituloista ja kustannukset kulutetun sähkön kustannuksesta, huolto- ja kunnossapitokustannuksista, sekä lämpöpumpun kompressorin vaihdon kustannuksesta, joka on jaettu pitoaikaa vastaaville vuosille.

$$KL \text{ myyntitulot} = h_{KL} \cdot KL \text{ tuotanto} = 66,0 \frac{\text{€}}{\text{MWh}} \cdot 20\,000 \frac{\text{MWh}}{\text{a}} = 1\,320\,000 \frac{\text{€}}{\text{a}}$$

$$\text{Sähkön kulutus} = \frac{KL \text{ tuotanto}}{COP} = \frac{20\,000 \frac{\text{MWh}}{\text{a}}}{3,0} = 6\,667 \frac{\text{MWh}}{\text{a}}$$

$$K_{el} = h_{el} \cdot \text{Sähkön kulutus} = 90,0 \frac{\text{€}}{\text{MWh}} \cdot 6\,667 \frac{\text{MWh}}{\text{a}} = 600\,000 \frac{\text{€}}{\text{a}}$$

$$K_{hk} = 12\,500 \frac{\text{€}}{\text{a}} + \frac{250\,000 \text{ €}}{20 \text{ a}} = 25\,000 \frac{\text{€}}{\text{a}}$$

$$\begin{aligned} \text{Nettotulot} &= KL \text{ myyntitulot} - K_{el} - K_{hk} = 1\,320\,000 \frac{\text{€}}{\text{a}} - 600\,000 \frac{\text{€}}{\text{a}} - 25\,000 \frac{\text{€}}{\text{a}} \\ &= 695\,000 \frac{\text{€}}{\text{a}} \end{aligned}$$



**Annuiteettimenetelmä:**

$$AN = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \cdot \left( I - \frac{JA_n}{(1+i)^n} \right) = c_{n/i} \cdot \left( I - \frac{JA_n}{(1+i)^n} \right)$$

jossa AN on annuiteetti [€/a],  $c_{n/i}$  on annuiteettitekijä,  $i$  on laskentakorko [%],  $n$  on pitoaika [a],  $I$  on investointi [€] ja  $JA_n$  on investoinnin jäännösarvo pitoajan lopussa.

Jäännösarvolla tarkoitetaan investointikohteen myynnistä saatavaa tuloa. Oletetaan jäännösarvo nolllaksi, jolloin yhtälö supistuu muotoon

$$AN = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \cdot I = c_{n/i} \cdot I$$

Sijoitetaan arvot yhtälöön

$$AN = \frac{0,05 \cdot (1 + 0,05)^{20}}{(1 + 0,05)^{20} - 1} \cdot 5\,000\,000 \text{ €} = 0,0802 \cdot 5\,000\,000 \text{ €} = 401\,213 \frac{\text{€}}{\text{a}}$$

**Nykyarvomenetelmä:**

$$NA = \sum_{t=1}^n \frac{S_t}{(1+i)^t} - \left( I - \frac{JA_n}{(1+i)^n} \right) \geq 0$$

jossa  $i$  on laskentakorko [%],  $n$  on pitoaika [a],  $S_t$  on vuotuinen nettosäästö tai nettotulo [€/a],  $I$  on investointi [€] ja  $JA_n$  on investoinnin jäännösarvo pitoajan lopussa.

Oletetaan nettotulot jokaisena vuotena yhtä suuriksi ja jäännösarvo nolllaksi, jolloin yhtälö saadaan muotoon

$$NA = \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \cdot S - I = a_{n/i} \cdot S - I$$

jossa  $S$  on vuosittaiset nettotulot (tai säästöt) [€] ja  $a_{n/i}$  on nykyarvotekijä.

Sijoitetaan arvot yhtälöön

$$NA = \frac{(1 + 0,05)^{20} - 1}{0,05 \cdot (1 + 0,05)^{20}} \cdot 695\,000 \frac{\text{€}}{\text{a}} - 5\,000\,000 \text{ €} = 3\,661\,236 \text{ €}$$

### Takaisinmaksuaika:

Tässä työssä laskettu takaisinmaksuaika on korollinen takaisinmaksuaika. Korollinen takaisinmaksuaika voidaan ratkaista nykyarvon yhtälöstä. Investointi on maksanut itsensä takaisin, kun nykyarvo on nolla. Nykyarvon yhtälö voidaan kirjoittaa muotoon

$$a_{n/i} \cdot S - I = 0 \rightarrow a_{n/i} = \frac{I}{S}$$

$$a_{n/i} = \frac{5\,000\,000 \text{ €}}{695\,000 \frac{\text{€}}{\text{a}}} = 7,194$$

Ratkaistaan nykyarvotekijän yhtälöstä  $n$ , joka on korollinen takaisinmaksuaika.

$$a_{n/i} = \frac{(1 + 0,05)^n - 1}{0,05 \cdot (1 + 0,05)^n} = 7,194$$

$$\rightarrow n = 9,1 \text{ a}$$

### Tuotetun lämpöenergian ominaiskustannuksien vertailu:

Tuotetun lämpöenergian ominaiskustannus saadaan selville jakamalla lämpöenergian tuotantokustannukset tuotetun lämpöenergian määrällä. Laskenta tehdään yhden vuoden ajalle, joten kompressorin vaihtokustannusta ei ole huomioitu.

Lämpöpumppu:

$$\text{COP} = 3,0$$

$$h_{el} = 90 \text{ €/MWh}$$

$$K_{hk} = 12\,500 \text{ €/a}$$

Lämpökattila:

$$\eta_K = 90 \%$$

$$h_{pa} = 25 \text{ €/MWh}$$

$$K_{hk} = 50\,000 \text{ €/a}$$

Lämpöpumpulla tuotetun lämmön ominaiskustannus:

$$k_{LP,KL} = \frac{K_{el} + K_{hk}}{KL \text{ tuotanto}} = \frac{600\,000 \frac{\text{€}}{\text{a}} + 12\,500 \frac{\text{€}}{\text{a}}}{20\,000 \frac{\text{MWh}}{\text{a}}} = 30,6 \frac{\text{€}}{\text{MWh}}$$

Lämpökattilalla tuotetun lämmön ominaiskustannus:

$$\text{Polttoaineen kulutus} = \frac{KL \text{ tuotanto}}{\eta_K} = \frac{20\,000 \frac{\text{MWh}}{\text{a}}}{0,9} = 22\,222 \frac{\text{MWh}}{\text{a}}$$

$$K_{pa} = h_{pa} \cdot \text{Polttoaineen kulutus} = 25 \frac{\text{€}}{\text{MWh}} \cdot 22\,222 \frac{\text{MWh}}{\text{a}} = 555\,556 \frac{\text{€}}{\text{a}}$$

$$k_{LK,KL} = \frac{K_{pa} + K_{hk}}{KL \text{ tuotanto}} = \frac{555\,556 \frac{\text{€}}{\text{a}} + 50\,000 \frac{\text{€}}{\text{a}}}{20\,000 \frac{\text{MWh}}{\text{a}}} = 30,3 \frac{\text{€}}{\text{MWh}}$$

**Taulukko 3. (Liite I).** Lämpöpumpulla ja kattilalla tuotetun lämpöenergian ominaiskustannuksen tuotetun lämpöenergian funktiona.

KL [MWh]	Lämpöpumppu [€/MWh]	Lämpökattila [€/MWh]
1000	42,5	77,8
2000	36,3	52,8
4000	33,1	40,3
6000	32,1	36,1
8000	31,6	34,0
10000	31,3	32,8
12000	31,0	31,9
14000	30,9	31,3
16000	30,8	30,9
18000	30,7	30,6
20000	30,6	30,3
22000	30,6	30,1
24000	30,5	29,9
26000	30,5	29,7
28000	30,4	29,6
30000	30,4	29,4

**Herkkyysanalyysi:**

Muutetaan investoinnin, ostosähkön hinnan, COP:n ja lämmön tuotantomäärän arvoa jokaista vuorollaan  $\pm 20\%$  muiden arvojen pysyessä vakiona.

**Taulukko 4. (Liite D).** Herkkyysanalyysi annuiteettimenetelmälle.

	Investointi [€]			Ostosähkön hinta [€/MWh]		
	-20 %	0 %	+20 %	-20 %	0 %	+20 %
	4 000 000	5 000 000	6 000 000	72,0	90,0	108,0
Nettotulot [€/a]	695 000	695 000	695 000	815 000	695 000	575 000
Annuiteetti [€/a]	320 970	401 213	481 456	401 213	401 213	401 213

	COP			Lämmön tuotanto [MWh/a]		
	-20 %	0 %	+20 %	-20 %	0 %	+20 %
	2,4	3,0	3,6	16 000	20 000	24 000
Nettotulot [€/a]	545 000	695 000	795 000	551 000	695 000	839 000
Annuiteetti [€/a]	401 213	401 213	401 213	401 213	401 213	401 213

**Taulukko 5. (Liite D).** Herkkyysanalyysi nykyarvomenetelmälle.

	Investointi [€]			Ostosähkön hinta [€/MWh]		
	-20 %	0 %	+20 %	-20 %	0 %	+20 %
	4 000 000	5 000 000	6 000 000	72,0	90,0	108,0
Nykyarvo [€]	4 661 236	3 661 236	2 661 236	5 156 701	3 661 236	2 165 771

	COP			Lämmön tuotanto [MWh/a]		
	-20 %	0 %	+20 %	-20 %	0 %	+20 %
	2,4	3,0	3,6	16 000	20 000	24 000
Nykyarvo [€]	1 791 905	3 661 236	4 907 457	1 866 678	3 661 236	5 455 794

Investoinnin, ostosähkön hinnan, COP:n ja lämmön tuotantomäärän kriittiset arvot, joilla nykyarvosta tulee nolla.

$$a_{n/i} = \frac{(1 + 0,05)^{20} - 1}{0,05 \cdot (1 + 0,05)^{20}} = 12,46$$

$$NA = a_{n/i} \cdot S - I = 0$$

$$NA = 12,46 \cdot 695\,000 \frac{\text{€}}{\text{a}} - I = 0 \rightarrow I = 8\,661\,236 \text{ €}$$

Ostosähkön hinnan muuttuminen vaikuttaa kulutetun sähkön kustannuksiin ja täten nettotuloihin.

$$NA = a_{n/i} \cdot S - I = 0$$

$$\text{Nettotulot} = S = \text{KL myyntitulot} - K_{el} - K_{hk}$$

$$NA = a_{n/i} \cdot (h_{KL} \cdot \text{KL tuotanto} - h_{el} \cdot \text{Sähkön kulutus} - K_{hk}) - I = 0$$

$$NA = 12,46 \cdot \left( 1\,320\,000 \frac{\text{€}}{\text{a}} - h_{el} \cdot 6\,667 \frac{\text{MWh}}{\text{a}} - 25\,000 \frac{\text{MWh}}{\text{a}} \right) - 5\,000\,000 \text{ €} = 0$$

$$\rightarrow h_{el} = 134,1 \frac{\text{€}}{\text{MWh}}$$

COP:n muuttuminen vaikuttaa kulutetun sähkön määrään ja täten nettotuloihin.

$$NA = 12,46 \cdot \left( 1\,320\,000 \frac{\text{€}}{\text{a}} - 90,0 \frac{\text{€}}{\text{MWh}} \cdot \frac{20\,000 \frac{\text{MWh}}{\text{a}}}{COP} - 25\,000 \frac{\text{MWh}}{\text{a}} \right) - 5\,000\,000 \text{ €} = 0$$

$$\rightarrow COP = 2,0$$

Lämmön tuotantomäärän muuttuminen vaikuttaa kaukolämmön myyntituloihin, kulutetun sähkön määrään ja täten nettotuloihin.

$$NA = 12,46 \cdot \left( 66,0 \frac{\text{€}}{\text{MWh}} \cdot \text{KL tuotanto} - 90,0 \frac{\text{€}}{\text{MWh}} \cdot \frac{\text{KL tuotanto}}{3,0} - 25\,000 \frac{\text{MWh}}{\text{a}} \right) - 5\,000\,000 \text{ €} = 0$$

$$\rightarrow \text{KL tuotanto} = 11\,839 \frac{\text{MWh}}{\text{a}}$$