

Simo Kokko

LÄMPÖVERKON KÄYTÖN OPTIMOINTI

Case Renforsin Ranta

Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Diplomityö
Joulukuu 2019

TIIVISTELMÄ

SIMO KOKKO: Lämpöverkon käytön optimointi – Case Renforsin Ranta
Diplomityö, 60 sivua
Tampereen yliopisto
Automaatiotekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma
Joulukuu 2019
Tarkastajat: professori Matti Vilkkö, DI Yrjö Majanne

Ilmastonmuutos, fossiilisten energiavarojen väheneminen sekä kansainväliset sopimukset ovat luoneet energia-alalle paineita selvittää, miten lämpö pitäisi tuottaa ja jakaa mahdollisimman kustannus- ja energiatehokkaasti. Lämpö ja jäähdytys yhdessä edustavat suurinta energia-alan sektoria tänä päivänä, joten sen seuraaminen ja optimointi on tärkeässä roolissa tulevaisuudessa. Uusiutuvan sähköenergian lisääntyminen, sekä pohjoismainen päätös siirtyä lyhyempään tasejaksoon korostavat lämpökuorman seuraamisen ongelmia entisestään sähkön hinnan vaihdellessa tiheämmin. Sähkön- ja lämmöntuotannon yhteensovittaminen parhaan mahdollisen tuloksen saavuttamiseksi on tulevaisuudessa myös entistä tärkeämpää.

Tässä työssä Renforsin Rannan yritysalueen lämmöntuotantorakenteesta rakennetaan optimointimalli, jolla pyritään parantamaan yritysalueen lämmöntuotannon joustoa. Optimointimallin tavoitteena on pienentää lämmöntuotannon tuotantokustannuksia parantamalla CHP-tuotantoa ja maksimoimalla sähköntuotannon tai -kulutuksen kannattavuutta. Malliin lisätään myöhemmin hukkalämmön lähde, lämpöpumppu sekä sähkökattila, ja tarkastellaan kuinka se parantaa lämmöntuotannon kannattavuutta. Malli rakennetaan kaupalliseen EnerTOP-optimointiohjelmaan, joka perustuu MILP-ohjelmointiin (eng. Mixed Integer Linear Programming). MILP-mallin avulla prosessien epälineaarisuuksia voidaan estimoida osittaislinearisoinnalla, samalla pitäen optimointiongelman lineaarisena. Mallia hyödynnetään lämmöntuotannon optimoinnissa syöttämällä ohjelmaan lämpöennusteet automaattisesti, joiden perusteella ohjelma pyrkii tuottamaan lämmön mahdollisimman kustannustehokkaasti. Optimointimalli on kuitenkin vielä testivaiheessa, joten sitä käytetään tässä tutkimuksessa täysin manuaalisesti käyttäjän toimesta.

Optimointimallin toimivuutta tutkimusongelman ratkaisuksi tutkittiin vertailemalla sen suunnittelemaa lämmöntuotantoa Kainuun Voima Oy:n vuoden 2018 toteutuneeseen lämmöntuotantoon. Optimointimalli säädettiin ensin vastaamaan vuoden 2018 toteutunutta dataa sähköntuotannon osalta, jonka jälkeen malliin lisättiin mahdolliset tulevaisuudessa lämpöä tuottavat komponentit. Lämpödatana käytettiin vuoden 2018 toteutunutta tuotantoa, pois lukien kaupungin kaukolämpöpiiri, jonka lämpökuormana käytettiin ennustetta. Optimointimallin suorittamalla lyhyen aikavälin suunnittelulla pystyttiin pienentämään lämmöntuotannon käyttökustannuksia 5,63 % vuoden käytöllä. Ennustevirheiden poistamisella päästiin vielä parempiin tuloksiin.

Avainsanat: Lämpöverkko, sähkön ja lämmön yhteistuotanto, optimointi, MILP, lämpöpumppu, hukkalämpö, sähkökattila, kaukolämpöakku

ABSTRACT

SIMO KOKKO: Heat Optimization of an Industrial Business Park – Case Renfors Ranta
Master of Science Thesis, 60 pages
Tampere University
Master's Degree Programme in Automation Technology
December 2019
Examiners: Professor Matti Vilkkö, M.Sc. Yrjö Majanne

Climate change, depletion of fossil fuel reserves and international agreements have created pressure on the energy sector to determine how heat should be produced and distributed in the most cost and energy efficient way. Heating and cooling represent the largest energy sector nowadays, which means following and optimizing heat and cooling is increasingly important. Increase in renewable power production and transition to shorter imbalance settlement period (ISP) in the Nordic countries emphasizes the problem of heat demand-based electricity production in CHP plants. Coordination of heat and power production to produce the best possible result is also very important in the future.

In this thesis work, an optimization model is built based on an existing business park to improve the heat production in the area. The objective of the optimization model is to reduce the heat production costs and maximize profit from electricity production. A heat pump and an electric boiler is later added to the model to see how much it helps to minimize heat production costs. The model is built with Enertop-optimization tool, that is based on MILP-modelling (Mixed Integer Linear Programming). With a MILP- model, the non-linearities of heat and power production can be estimated by part linearizing the components. The optimization tool is still in testing phase, so automatic usage is not yet possible. The model is utilized in the optimization of heat production by automatically feeding the temperature forecasts to the programme, according to which, the programme tries to produce the heat as cost effective as possible. However, the optimization tool is still in its testing phase, which means the inputs and operation are done manually by the user.

The functionality of the optimization model was tested by comparing the heat production planned by the optimization model to the actual heat production data of Kainuun Voima Oy from 2018. The optimization model was first adjusted to answer the electricity production of the actual process, after which different heat producing components, that don't yet exist, were added to the model. The actual heat load of 2018 was used as a demand for the model, excluding the heat demand for the city, which was based on the forecast. With short term planning by the optimization model, it was possible to reduce the operating costs of heat production by 5,63 % from 2018. By eliminating the forecast error, even better reduction in the operating cost was achieved.

Keywords: Heating network, combined heat and power, optimization, MILP, heat pump, waste heat, electric boiler, heat storage

ALKUSANAT

Haluan kiittää UPM Energy Oy:tä mielenkiintoisesta ja haastavasta diplomityöaiheesta. Kiitos työkavereille, jotka ovat kannustaneet ja auttaneet työni kanssa. Erityiskiitokset Antti Raukolalle, Pasi Svinhufvudille ja Jarkko Nyrhiselle avusta työn toteuttamisen kanssa sekä erinomaisista kommentteista pitkin työtä. Kiitos myös Tampereen yliopiston puolelta Matti Viikolle ja Yrjö Majanteelle avusta työn rakenteen suunnittelussa sekä erinomaisista kommentteista. Suuri kiitos myös Kainuun Voima Oy:n sekä Loiste Oy:n työntekijöille, jotka jaksoitte vastaila kysymyksiini ja toimittaa tietoa työtäni varten.

Kiitos perheelle, ystäville sekä tietenkin puolisololleni Annille, kun olette jaksaneet kannustaa ja antaa vertaistukea koko opiskelu-urani aikana, erityisesti diplomityöprosessin aikana.

Tampereella, 12.12.2019

Simo Kokko

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
1.1 Työn tavoite ja tutkimuskysymykset	3
1.2 Aiheen aikaisempi tutkimus	3
1.3 Tutkimusmenetelmät	5
1.4 Työn rakenne	6
2. LÄMMÖNTUOTANTO	7
2.1 Lämpöjärjestelmä ja sen komponentit	8
2.2 Komponenttien hyödyntäminen lämmöntuotannossa	16
2.3 Komponenttien käyttöä rajoittavat tekijät	21
3. TUTKIMUSMENETELMÄT	24
3.1 Optimointimallin muodostaminen	24
3.2 Optimointiongelman ratkaiseminen	37
4. CASE RENFORSIN RANTA	38
4.1 Renforsin Ranta	38
4.2 Data-analyysi	39
5. TULOKSET	42
5.1 Optimointimallin vertaaminen nykykäytäntöön	42
5.2 Ennustevirheen vaikutus mallin toimintaan	54
6. POHDINTA	58
7. YHTEENVETO	60
LÄHTEET	61

LYHENTEET JA MERKINNÄT

CHP	Yhdistetty sähkön ja lämmön tuotanto
LP	Lineaarinen optimointi (Eng. Linear Programming)
MILP	Lineaarinen sekalukuoptimointi (Eng. Mixed Integer Linear Programming)
COP	Lämpökerroin (Eng. Coefficient of Performance)
HP	Korkeapaine
MP	Keskipaine
BP	Matalapaine
DH	Kaukolämpö
Wh	Wattitunti
Pa	Pascal

P	Sähköteho
c	Ominaislämpö paineen ja lämpötilan funktiona
ϕ	Varastoitu energia kaukolämpöakussa
C	Kustannus
$^{\circ}\text{C}$	Celsius-aste
η	Hyötysuhde
T	Lämpötila
m	Massa
l	Lämpötila-alueen korkeus
ρ	Tiheys
q	Teho
\dot{m}	Massavirta
h	Entalpia
Q	Lämpöteho
K	CHP-laitoksen toimintapiste
α	Rakennusaste
β	Lineaarisen estimoinnin vakio
φ	Lineaarisen estimoinnin kerroin
S	Varaus
t	Käyttöaika
x	Konveksikombinaation määrittämissuuttuja

Alaindeksit

aux	Apujäähdytys
av	Keskiarvo
dh	Lämpöverkko
g	Generaattori
h	Häviö
HOB	Lämpölaitos
hot	Lämmin vyöhyke
max	Maksimi
min	Minimi
net	Netto
$s -$	Kaukolämpöakun purkaminen
$s +$	Kaukolämpöakun lataaminen
$start$	Käynnistys
tot	Kokonais-
w	Vesi

<i>n</i>	Indeksi
<i>out</i>	Ulostulo
<i>opt</i>	Ideaali
<i>netto</i>	Netto
<i>in</i>	Sisäänmeno
<i>primary</i>	Primäärinen
<i>elec</i>	Sähkökattila
<i>HP</i>	Lämpöpumppu
<i>cond</i>	Lauhde
<i>exchange</i>	Lämmönsiirrin
<i>fuel</i>	Polttoaine
<i>waste</i>	Hukka
<i>heat</i>	Lämpö

1. JOHDANTO

Ilmastonmuutos ja fossiilisten energiavarojen vähentyminen ovat luoneet energia-alalle merkittävän haasteen. Painetta energia-alalle luovat valtiot ja kansainväliset sopimukset. Pariisin ilmastopöytäkirjassa vuonna 2015 sovitun mukaisesti sopimuspiiriin kuuluvat maat sitoutuvat ilmastolämpenemisen rajoittamiseen 1,5 °C asteeseen (Pariisin ilmastopöytäkirja, 2016). Vähennystavoitteeseen päästökseen on jäsenmaiden lisättävä uusiutuvan energian käyttöä ja optimoitu nykyisiä prosessejaan energiatehokkaammaksi. Euroopan Unioni on myös asettanut itselleen sitovia ilmasto- ja energiatavoitteita, jotka se haluaa saavuttaa asteittain. Tavoitteiden mukaan EU pyrkii vuoteen 2020 mennessä pudottamaan kasvihuonepäästöjä 20 %, lisäämään energiatehokkuutta 20 % ja lisäämään uusiutuvan energian käyttöä 20 %. EU:n pidemmän tähtäimen tavoite on vuoteen 2050 mennessä vähentää globaaleja päästöjä vähintään 50 % vuoteen 1990 verrattuna. (da Graça Carvalho, 2012)

Suomi on Pariisin ilmastopöytäkirjan ja EU:n tavoitteiden perusteella laatinut omat ilmastotavoitteensa. Näiden tavoitteiden mukaan Suomen tulee vähentää kasvihuonepäästöjä 80 % vuoteen 1990 verrattuna, vähentää kasvihuonepäästöjä 39 %:lla päästökauppaan kuulumattomalla sektorilla vuoteen 2030 mennessä, poistaa kivihiilen käyttö vuoteen 2030 mennessä, kasvattaa uusiutuvan energian osuutta yli 50 %:iin 2020 -luvulla ja lisätä biopohjaisten polttoaineiden käyttöä liikenteessä 30 % vuoteen 2030 mennessä. Valtion tavoitteena on vähentää varsinkin lämmöntuotannossa tuotettua hiilidioksidia. (IEA, 2018)

Kansainvälisen energijärjestön (Paardekooper et al., 2018) mukaan lämpö ja jäähdytys yhdessä edustavat suurinta energia-alan sektoria tänä päivänä. Nykyään suurin osa Euroopan kaukolämmöstä tuotetaan fossiilisilla polttoaineilla, sillä uusiutuvan energian käyttö kaukolämmön tuotannossa on vain 15 % (Rämä et al., 2017). Suunnitteleamalla lämmöntuotannon ja -jakelun mallit uudelleen, voidaan uusiutuvan energian käyttöä kasvattaa ja savuttaa suuria ilmastohyötyjä. Keinoja, joilla tämä toteutetaan, ovat parantaa olevassa olevia prosesseja optimoimalla ja hyödyntämällä hukkalämpöä lämpöpumppujen avulla. Heat Roadmap Europe tutkimuksessa on todettu, että hyödyntämällä nykYTEKNOLOGIAA, voidaan globaaleja päästöjä vähentää 86 % vuoteen 1990 verrattuna aiemmin esitettyjen toimenpiteiden avulla. (Paardekooper et al., 2018)

Tulevaisuuden haaste lämmöntuotannossa on selvittää, miten lämpö pitäisi tuottaa ja jakaa mahdollisimman energiatehokkaasti. Suomen kaukolämmöstä noin 75 % tuotetaan sähkön ja lämmön yhdistetyllä tuotannolla, eli CHP-laitoksissa (Energiateollisuus, 2019b). Sähkön ja lämmön tuotanto CHP-laitoksissa on Suomen olosuhteissa hyvä ratkaisu, sillä sekä sähkön että lämmön suurin tarve sijoittuu talveen. Sähkö ja lämpöä saadaan CHP-laitoksissa tuotettua hyvällä hyötysuhteella verrattuna erillistuotantoon, mikä on johtanut Euroopan Unionin vaatimaan CHP-tuotannon tehokkaampaa hyödyntämistä kasvihuonepäästöjen vähentämisessä (Raiko, 2007). CHP-tuotannon huonona puolena on sen huonompi joustavuus, koska sähköntuotanto on sidottu lämpökuormaan. Samoin nykyiset prosessi- ja kaukolämpöä tuottavat CHP-laitokset saattavat olla ylimitoitettuja prosessilämmöntarpeen vähennyttyä, joten ne operoivat suurimman osan ajasta osakuormalla huonommalla hyötysuhteella. Tämän seurauksena joudutaan siirtymään taloudellisesti kannattamattomaan pakkolauhde- tai apujäähdytystuotantoon, jotta kattilakuorma saadaan yli minimikuorman. Toinen vaihtoehto on tuottaa lämpö apukattilassa, jossa poltetaan usein fossiilisia polttoaineita. Aiemmin mainittujen asioiden lisäksi, CHP-laitoksen kannattavuuteen vaikuttavat paitsi alhaiset sähkön hinnat, mutta myös CHP-laitosten verotus- ja tukijärjestelmät sähkön- ja lämmöntuotannolle, jotka vaihtelevat käytettyjen polttoaineiden mukaan. Suomessa CHP-laitoksissa poltetaan pääsääntöisesti kivihiiltä, maakaasua, biomassaa ja turvetta (IEA, 2018). Päästöoikeuksien hintojen nousu, ja sen seurauksena fossiilisten polttoaineiden hintojen nousu, kannustaa yrityksiä tutkimaan uusia kustannustehokkaampia keinoja tuottaa lämpöä.

Pohjoismaissa siirrytään tunnin taseselvitysajaksosta niin sanottuun varttitaseeseen vuoden 2022 loppuun mennessä (Fingrid, 2019b). Varttitaseen seurauksena sähkömarkkinoiden päivän sisäisessä kaupankäynnissä sekä säätösähkömarkkinoilla siirrytään 15 minuutin kaupankäyntijaksoihin. Tarve siirtyä lyhyempään tasejaksoon on syntynyt sään mukaan vaihtelevan uusiutuvan energian tuotannon lisääntymisen, ja perinteisen säätökykyisen voimantuotannon vähenemisen seurauksena. Lyhyempi tasejakso mahdollistaa tehokkaamman kulutusjouston sähkömarkkinoilla, mutta hankaloittaa CHP-laitoksen sähköntuotannon ajoittamista taloudellisesti kannattavasti.

Yksi keino lisätä sähkön- ja lämmöntuotannon tehokkuutta on hyödyntää eri prosessien hukkalämpöä. Palvelin keskuksat ovat kasvaneen tiedonkäsittelyn seurauksena lisääntyneet maailmalla, ja varsinkin Suomessa sen viileän ilmaston takia. Palvelin keskuksat käyttävät arvioiden mukaan vuonna 2010 1,3 % koko maailman sähköntarpeesta, ja Suomessa noin 0,5-1,5 % koko sähköntarpeesta (Motiva, 2011). Kyseisen luvun voidaan olettaa kasvaneen viime vuosina. Palvelin keskuksissa sähkö muuttuu pääasiassa lämmöksi ja keskuksissa sijaitsevat palvelimet vaativatkin jäähdytystä toimiakseen tehokkaasti. Aiemmin jäähdytykseen käytetty ilma on puhallettu suoraan ulkoilmaan. Lisääntynyt tarve parantaa energiatehokkuutta on kannustanut energiayhtiöitä tekemään yhteistyötä palvelin keskuksia operoivien yritysten kanssa, ja hyödyntämään hukkalämpöä esimerkiksi lämpöpumppujen avulla. Jäähdytystekniikasta riippuen, hukkalämpö voidaan hyödyntää suoraan kaukolämpöverkossa nostamalla se korkeampaan lämpötilaan. Palvelin keskuksien hukkalämmön lämpötila on nykyään yleisesti noin 30 astetta nestejäädetyissä järjestelmissä, kun se aiemmin on pidetty huomattavasti viileämpänä (18-20 °C) (Stenberg, 2015). Tutkimuksissa on huomattu, ettei palvelin keskuksien lämpötilan nostaminen lähelle niiden maksimilämpötilaa vaikuta palvelimien käyttöikään (Stenberg, 2015). Tämän seurauksena jäähdytystä ei vaadita niin paljoa ja lämpöpumppujen siirtäessä lämpöenergiaa korkeampaan lämpötilaan, ero alemmasta korkeampaan lämpötilaan ei ole niin suuri. Kaukojäähdytystä käyttävien palvelin keskuksien hukkalämpö on mahdollista myydä energiayhtiön kaukolämpöverkkoon. Palvelin keskuksat yhdessä lämpöpumppujen kanssa tuovat tulevaisuudessa joustoa lämmöntuotantoon, ja helpotusta perinteisten laitosten ajamiseen.

Hukkalämmön hyödyntämisen lisäksi lämmön varastointi on merkittävä keino lisätä lämmöntuotannon tehokkuutta. Varastoidulla lämmöllä voidaan tuotantoa allokoida sellaisiin ajankäyttöihin, jolloin se on kannattavinta. Allokoinnin tarkoitus on pääasiassa ekonominen ja perustuu siihen, että lämmön hinta vaihtelee ajan funktiona. Lisäämällä lämpövarasto prosessiin, on mahdollista tuottaa lämpöä varastoon, kun tuotantokustannukset ovat alhaiset ja käyttää tätä varastoitua lämpöä, kun kustannukset ovat korkeat. Lämpövarastot ovat erityisesti CHP-laitosten yhteydessä kannattavia, sillä CHP-laitoksen operoinnin kannattavuus riippuu polttoaineen hinnan lisäksi sähkön hinnasta. Lämmöntarve on Suomessa talvisin suurimmillaan, jolloin joudutaan käynnistämään lämpölaitoksia suuren lämmöntarpeen kattamiseksi. Kaukolämpöakkuihin varastoidulla lämmöllä voidaan siirtää, tai jopa eliminoida kokonaan huippukuormalaitosten käynnistäminen. Kaukolämpöakuilla voidaan hyödyntää myös lisääntyvää uusiutuvan energian tuotantoa. Uusiutuvan energian tuotannossa, esimerkiksi tuulivoimalla, on ongelmana sen tuotannon vaihtelevuus, eli se, että sitä ei ole tasaisesti saatavilla. Esimerkiksi yöt saattavat olla hyvin tuulisia, jolloin taas sähköntarve on alimmillaan. Tällöin on kannattavaa ladata lämpövarastoja uusiutuvasti tuotetulla sähköllä, esimerkiksi sähkökattilan tai lämpöpumpun avulla.

Sähkökattila on erinomainen vaihtoehto öljyllä toimivalle lämpökattilalle, varsinkin maihin, joissa on alhainen sähkön markkinahinta. Sähkökattila operoi hyvällä hyötysuhteella, ja sen investointikustannuksia on tutkittu Hynysen (Hynynen, 2018) diplomityössä, jossa vertailtiin eri tuotantomuotojen taloudellista kannattavuutta korvaamaan maakaasukäyttöinen lämpökattila. Työn laskelemien mukaan sähkökattila oli investointikustannuksiltaan ja takaisinmaksuajaltaan paras vaihtoehto. Öljykäyttöisen lämpökattilan ongelmana on sen tuottamat kasvihuonepäästöt, kallis polttoaine, sekä yleinen asenne fossiilisia polttoaineita kohtaan. Sähkön markkinahinta on Pohjoismaissa ollut viime vuosina hyvin edullista, mikä osaltaan kannustaa investoimaan sähkökattilaan.

Energiantuotannon optimointi on tärkeässä roolissa tulevaisuudessa, jotta kiristyviin päästötavoitteisiin päästään. Energia-alan yritykset panostavatkin uusiin hankkeisiin, jotta perinteisestä fossiilisten polttoaineiden polttoon perustuvasta tekniikasta päästään asteittain eroon. Se vaatii optimoinnin hyödyntämistä nykyisissä prosesseissa, jotta parhaaseen mahdolliseen energiatehok-

kuuteen päästään olemassa olevilla komponenteilla. Samoin uusien komponenttien (lämpöpumput, kaukolämpöakut, hukkalämpö yms.) lisäämisen mahdollisuutta, ja niiden tuomaa hyötyä, on tutkittava.

1.1 Työn tavoite ja tutkimuskysymykset

Työn tavoitteena on tutkia Kajaanin Renforsin Rannan yritysalueen lämmön joustomahdollisuuksia N-side optimointiohjelmalla. Samalla kehitetään ja testataan N-side optimointiohjelmaa ja tutkitaan mahdollisuutta hyödyntää sitä tulevaisuuden projekteissa. Työssä tutkitaan, miten olemassa olevaa CHP-laitosta voitaisiin operoida mahdollisimman tehokkaasti. Työssä keskitytään siihen, millä komponenteilla saadaan paras mahdollinen lämmöntuotannon tehokkuus aikaiseksi yritysalueella. Tutkittavat komponentit ovat lämpöpumppu, kaukolämpöakku, sähkökattila ja palvelinkeskuksen hukkalämmön hyödyntäminen. Työ toteutetaan UPM Energy Oy:lle.

Tutkimuksen tavoitteena on tutkia, voidaanko valitulla optimointiohjelmalla luoda taloudellisia ja käytännöllisiä hyötyjä Renforsin Rannan yritysalueen toimintaan. Taloudelliset hyödyt perustuvat CHP-laitoksen muuttuvien kustannusten pienentämiseen ja sähköntuotannon siirtämisen korkean sähkön hinnan tunneille. Käytännön hyödyt syntyvät siitä, voidaanko alueen energiantuotantoa operoida optimointisovelluksen pohjalta, jolloin toiminta tehostuu. Lisäksi tutkitaan mahdollisuutta käyttää optimointiohjelmaa muihin vastaavanlaisiin projekteihin.

Työn tavoitteet voidaan tiivistää seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

1. Millaisilla komponenteilla saadaan paras mahdollinen kustannus- ja energiatehokkuus aikaiseksi Kajaanin Renforsin Rannan yritysalueella?
2. Miten eri komponenttien lisääminen vaikuttaa alueen lämmöntuotantoon eri vuodenaikoina?
3. Saadaanko N-side optimointiohjelmasta toimiva työkalu tulevaisuuden projekteihin?

Ensimmäisen tutkimuskysymyksen näkökulmana on löytää paras mahdollinen tutkittavien komponenttien yhdistelmä, jolla nykyistä CHP-laitoksen ajoa voitaisiin parantaa. Toisen tutkimuskysymyksen tavoitteena on löytää ensimmäisen tutkimuskysymyksen perusteella löydettyjen komponenttien paras mahdollinen ajosuunnitelma vuodenajan mukaan. Kolmannen tutkimuskysymyksen tarkoituksena on tarjota UPM Energy Oy:lle vastaus siihen, onko N-side optimointiohjelma toimiva työkalu tämänkaltaisiin optimointiongelmiin.

Työssä tutkitaan lämpöpumpun lisäämistä olemassa olevan palvelinkeskuksen yhteyteen, ja tämän yhdistelmän liittämistä kaukolämpöverkkoon. Samoin tutkitaan kaukolämpö- ja höyryakun sekä sähkökattilan tuomaa lisähyötyä prosessien ajossa. Työssä ei huomioida komponenttien investointikustannuksia.

1.2 Aiheen aikaisempi tutkimus

Aiheesta löytyy paljon aiempaa tutkimusta. CHP-laitoksen yhteyteen liitetyn kaukolämpöakun vaikutusta laitoksen käyttökustannuksiin on tutkittu paljon. Samoin uuden sukupolven kaukolämpöverkkoa, johon on liitetty eri komponentteja kuten lämpöpumppuja, sähkökattila ja uusiutuvaa energiantuotantoa, on tutkittu kattavasti. Pääsääntöisesti optimointiongelmat on ratkaistu lineaarisen mallinnuksen keinoin.

Lämmöntuotannon joustomahdollisuuksia on tutkittu uusien tiukempien päästörajoitteiden takia. Heat Roadmap Europe tutkimuksessa tutkittiin kaukolämmön roolia tulevaisuuden kestäväen energiatuotannon toteuttamisessa. Kyseisen tutkimuksen tuloksena kaukolämmön rooli on suuri tulevaisuudessa, mutta nykyinen kaukolämmön tuotanto vaatii isoja muutoksia, kuten nykyisen verkon muutosta alhaisen lämpötilan kaukolämpöverkkoon, joka on yhteydessä matalaenergiisiin rakennuksiin. Samalla, uusien synergioiden kehittäminen on tärkeässä roolissa. (Paardekooper et al., 2018)

Lund et al. (2014) esittelivät tutkimuksessaan neljännen sukupolven kaukolämpöjärjestelmän. Uuden sukupolven kaukolämmön kehittäminen syntyi tarpeesta kehittää entistä energiatehokkaampi tapa jakaa lämpöä kuluttajalle. Tutkimuksessa esitetään energiatehokkuuden parantamiseksi ratkaisuna matalalämpöiset kaukolämpöverkot, energiatehokkaammat rakennukset, kaukolämpöverkon häviöiden pienentäminen ja hukkalämmön hyödyntäminen paremmin. Samoin eri teollisuusalojen keskeistä synergiaa painotetaan. (Lund et al., 2014)

Wahlroos et al. (2018) tutkivat palvelinkeskusten hukkalämmön hyödyntämispotentiaalia. Tutkimuksessa hukkalämmön hyödyntämisestä aiheutuvia päästöjä ja taloudellisia vaikutuksia analysoitiin elinkaariarvoilla. Tällä hetkellä isoimmat ongelmat hukkalämmön hyödyntämisessä ovat lämmön huono laatu ja korkea investointikustannus. Lämmön huono laatu johtuu liian matalasta lämpötilasta tai epätasaisesta lämmönlähteestä. Tutkimuksen taloudelliset laskelmat osoittivat, että investointiin takaisinmaksuaika on lyhyempi kuin lämpöpumpun käyttöikä, kun hukkalämpöä hyödynnettiin kaukolämmön tuotannossa. Hukkalämmön ympäristövaikutukset riippuivat käytetystä polttoaineesta, jota hukkalämpö korvaa. Toisessa tutkimuksessa Wahlroos et al. (2017) tutkivat palvelinkeskusten hukkalämmön hyödyntämistä Espoossa simulointimallin avulla. Simulointimalli ratkaistiin EnergyPro -ohjelmistolla. Tutkimuksessa todettiin, että palvelinkeskusten hukkalämpöä hyödyntämällä voitiin vähentää CHP-laitosten ja lämpövoimaloiden ajamista, tuottaen 0,6-7,3 % säästöt. (Wahlroos et al., 2017 & 2018)

Stenberg (2015) on opinnäytetyössään tutkinut tietokonesalien hukkalämmön hyödyntämismahdollisuuksien teknistaloudellista optimointia. Työn tavoitteena oli löytää järjestelmävaihtoehtoista teknistaloudellisesti paras tapa hyödyntää tietokonesalien hukkalämpö käyttäen simulointimallia. Työssä tutkittiin myös hukkalämmön hyödyntämisen vaikutusta tietokonesalien energiatehokkuuteen. Tulosten perusteella optimaalisin vaihtoehto olisi järjestelmä, jossa hukkalämpö hyödynnetään kaukolämpöverkon lämpötilan mukaan kesäisin kaukolämpöverkon menopuolella, ja talvisin paluupuolella. Elinkaarikustannuksissa kyseinen vaihtoehto toi 4,2 miljoonan euron säästön referenssitapaukseen, jossa jäähdytys tuotetaan vapaajäähdytystä hyödyntävillä vedenjäähdytyskoineilla. (Stenberg, 2015)

Levihn (2018) tutki lämpöpumpun ja CHP-laitoksen yhdistelmän operoimista sähköverkon volatiliiteetin tasapainottamisessa. Tutkimuksessa käytettiin Tukholman kaukolämpöverkkoa esimerkkinä, jossa lämpö tuotetaan CHP-laitoksissa, lämpöpumpuilla ja sähkökattiloilla. Tutkimus tarjosi empiriaa ja käytännön tietoa, miten kaukolämpö-/ kaukokylmäjärjestelmää tulisi optimoida yhdessä CHP-laitoksen ja lämpöpumpun kanssa. Tutkimuksessa pohdittiin sähkön spot -hinnan ja lisääntyvän uusiutuvan sähköntuotannon vaikutusta kaukolämpöjärjestelmän optimointiin. (Levihn, 2018)

Pääkkönen ja Joronen (2019) tutkivat CHP-laitoksen hyödyntämistä uusiutuvan energian tuotannon tasapainottamisessa. Työssä tutkittiin, kuinka kannattavaa Ahvenanmaan tuotannon tasapainottaminen on CHP-laitoksen avulla. Nykyisestä tuotantorakenteesta rakennettiin taulukkolaskentamalli, johon lisättiin myöhemmin eri skenaarioita. Analysoinnissa käytettiin kolmea eri kokoista CHP-laitosta. Tutkimuksen tuloksena todettiin, että CHP-laitoksia voidaan hyödyntää tulevaisuudessa uusiutuvan energian tehoaukkojen tasapainottamisessa kustannustehokkaasti. Tämä kuitenkin vaatii sen, että biomassan hinta pysyy samalla tasolla kuin se nykyään on, tai lämpöä pystytään jatkojalostamaan pidemmälle ("heat-to-x"). (Pääkkönen & Joronen, 2019)

Wang et al. (2015) tutkivat CHP-laitoksen, aurinkolämmön ja lämpövaraston perusteella operoivaa kaukolämpöverkkoa. Tutkimuksessa muodostettiin optimointimalli, jonka tavoitteena on minimoida kokonaiskustannukset sähkön ja lämmön hankinnalle. Mallista muodostettiin LP-ongelma (Linear Programming), joka ratkaistiin LP2 -ohjelmistolla. Tulosten perusteella lämmön varastoinnin hyötysuhteet tulee ottaa tarkasti huomioon mallintaessa CHP-kaukolämpöverkkoa. Lämpövaraston optimaaliseen operointiin vaikuttavat vahvasti lämmöntarve ja sähkön hinta. (Wang et al., 2015)

Carpaneto et al. (2014) kehittivät optimointimenetelmän, jolla haetaan parhain mahdollinen ajo-suunnitelma systeemille, joka koostuu CHP-laitoksesta, lämpökattilasta, aurinkolämpökeräimistä ja lämpövarastosta. Mallista muodostettiin MILP -ongelma (Mixed-Integer Linear Programmin) XEMS13 -ohjelmistoon (XEMS13, 2014), joka hakee parametrinsa MATLAB -ohjelmistosta ja ratkaisee ongelman MATLABin Branch and Bound MILP -algoritilla (MathWorks, 2019). Tuloksien

mukaan optimointimenetelmää voidaan käyttää tuotantos suunnittelussa määrittämään, kuinka paljon eri komponenttien tulee tuottaa lämpöä. Menetelmän avulla voidaan myös määrittää optimaalinen koko eri komponenteille. (Carpaneto et al., 2014)

Giuntoli ja Poli (2013) kehittivät MILP algoritmin, jolla voidaan optimoida seuraavan vuorokauden lämmön ja sähkön tuotantoa suuren mittakaavan virtuaalivoimalaitoksessa, joka sisältää monta pientä tuottajaa, kuluttajaa, energiavarastoja ja yhteistuotantoa. Tutkimuksen MILP-malli ratkaistiin branch and cut -algoritmin avulla, joka todettiin riittävän tehokkaaksi ongelman ratkaisemiseksi. Työn tuloksena huomattiin, että MILP -algoritmi vaatii paljon lisämuuttujia ja yhtälöitä toimiakseen parhaimmillaan, mutta kyseisen mallin todettiin kykenevän ennakoimaan tuotannon operoinnin korjaamista toimituspäivän arvaamattomissa tilanteissa. (Giuntoli & Poli, 2013)






Ahonen (2018) tutki sähkökattilan lisäämistä apukattilaksi UPM Jämsänkosken tehtaalle. Tavoitteena työssä oli kehittää paperitehtaan energiantuotantoa vähäpäästöisemmäksi ja pohtia, miten sähkökattilalla osallistuttaisiin säätösähkömarkkinoille. Samalla tutkittiin sähkökattilan investointikustannuksia kyseiseen kohteeseen. Työn tuloksena sähkökattilainvestointi tehtaan apukattilaksi on täysin realistinen. Samoin sen fyysinen sijainti tehtaalla selvitettiin, jotta sen liitettävyys sähkö- ja höyryverkkoon olisi optimaalinen. (Ahonen, 2018)



Uusiutuvan energian lisäämistä kaukolämpöverkkoon on tutkittu myös paljon. Uusiutuvan energian hyödyntämistä kaukolämmön tuotannossa ja varastoinnissa on tutkittu Saksassa (Böttger, 2014) ja Kreikassa (Xydis, 2013). Tutkituissa tapauksissa lämpö tuotettaisiin uusiutuvan sähköenergian avulla esimerkiksi lämpöpumpuilla tai sähkökattilalla. Aiempaa tutkimusta CHP-laitoksen ajamisesta kaukolämpökäytöllä ja uusiutuvalla energialla on siis melko laajalti, ja se antaa hyvät valmiudet tämän työn tutkimukseen. Suurin osa aikaisemmin tehdystä tutkimuksesta on hyödyntänyt lineaarista optimointia, ja varsinkin MILP -ongelmat ovat osoittautuneet hyvin ratkaistaviksi. Tämän työn optimointiongelma on laaja, mutta koska käytettävällä työkalulla voidaan yksinkertaistaa prosessia huomattavasti, saadaan se helpommin rakennettua kuin puhtaasti matemaattisesti mallinnettu systeemi.

1.3 Tutkimusmenetelmät

Tutkimuksen ensimmäisessä vaiheessa Renforsin Rannan yritysalueesta muodostetaan optimointimalli. Optimointimalli muodostetaan N-side optimointiohjelmalla. N-side on optimointiohjelmajelma-alusta, johon voidaan graafisesti mallintaa prosesseja. Ohjelmassa kuvataan tarkasteltavan systeemin ominaisuuksia erilaisilla symboleilla. Nämä symbolit ovat kuvattuna taulukossa 1 alla.

Taulukko 1: Mallissa käytetyt symbolit

Nimi	Selitys	Symboli
Jatkuva prosessi	Jatkuva muunnosprosessi, jossa muutetaan syötettä ulostuloksi (esim. polttoaine -> höyry)	
Varasto	Välivarasto energialle tai materiaalille	
Lähde	Syöttää materiaalia prosessiin	
Markkinalähde	Kuin lähde, mutta materiaalin hinta mukana	
Nielu	Poistaa prosessista tuotteita (lopputuote, jäte ym.)	

Markkinanielu	Kuin nielu, mutta tuotteen hinta mukana	
Tase	Kerää ja jakaa uudelleen prosessin virtauksia	

Jokaiselle prosessin osalle (symboli), voidaan määrittää oma ”resepti”. Nämä reseptit määrittävät kyseisen prosessin toiminta-alueen. Matemaattisen mallinnuksen mielessä ne ovat tavoitefunktioita tai rajoiteyhtälöitä. Materiaalin tai energian virtaamista eri prosessien välillä kuvataan nuolilla, joille voidaan myös antaa omia rajoitteita.

Mallin rakentaminen aloitetaan muodostamalla nykyisestä alueen kokoonpanosta malli ja konfiguroidaan se. Kun malli on verifioitu, eli siitä saadaan oikeanlaista dataa ulos, voidaan ryhtyä rakentamaan eri skenaarioita. Tässä vaiheessa malliin muodostetaan kaksi eri skenaariota. Skenaariossa yksi toimii perusmallina, johon lisättyjä komponentteja verrataan. Ensimmäisessä skenaariossa mallissa on ainoastaan CHP-tuotanto sekä apukattila. Kaukolämpökun tiedot perustuvat toteutuneeseen tuotantoon alkutilanteessa. Skenaariossa kaksi malliin lisätään hukkalämmön lähde, lämpöpumppu, sähkökattila sekä kaukolämpöakku.

Optimointimalli muodostetaan kuvaamalla eri skenaarioiden sisältävän CHP-tuotannon käyttökustannusta tavoitefunktioilla. Tavoitefunktio rakennetaan malliin reseptien kautta. Tarkasteltavan systeemin ominaisuudet kuvataan mallissa rajoiteyhtälöiden avulla, jotka rakennetaan reseptien ja materiaalivirtojen rajoitteisiin. Rajoiteyhtälöt rajaavat systeemille ratkaisujoukon, jonka sisältä optimointimalli pyrkii löytämään tavoitefunktion kannalta parhaan mahdollisen ratkaisun.

Toisessa vaiheessa tehtyyn optimointimalliin sovelletaan liukuvan aikaikkunan menetelmää. Fang ja Lahdelma (2015) hyödynsivät tutkimuksessaan onnistuneesti kyseistä menetelmää viiden päivän aikaikkunalla parantaakseen mallin tarkkuutta. Menetelmässä määritetään optimointimallille sopiva ajanjakso, eli optimointihorisontti, jonka välillä malli pyrkii saavuttamaan mahdollisimman kustannustehokkaan ratkaisun. Liian lyhyt optimointihorisontti johtaa tuotannon opeoimiseen lähitulevaisuuden kustannuksella, jolloin saatetaan saavuttaa tilanne, jolloin tuotettua lämpöä ei ole tarpeeksi, kun sitä tarvitaan. Liian pitkä optimointihorisontti lisää epätarkkuuksia, eikä ole siitä syystä luotettava. (Fang & Lahdelma, 2015)

Lopuksi muodostettu malli ratkaistaan N-side ohjelman ympäristössä. Ohjelman ratkaisin etsii reseptien määrittämien rajoitteiden ja tavoitteiden kautta optimaalisen ratkaisun, jolla lämpöä saadaan tuotettua tehokkaimmin. Rakennettavan optimointimallin rajoitteineen on vastattava oikeaa prosessia mahdollisimman hyvin, jotta luotettavia tuloksia saadaan aikaiseksi. Ympärivuotisen automaattisen käytön saavuttamiseksi malli on myös oltava ratkaistavissa kaikissa olosuhteissa. Optimointiohjelman laskentatehokkuuteen ei tässä työssä oteta kantaa, sillä laskenta suoritetaan vain kerran vuorokaudessa.

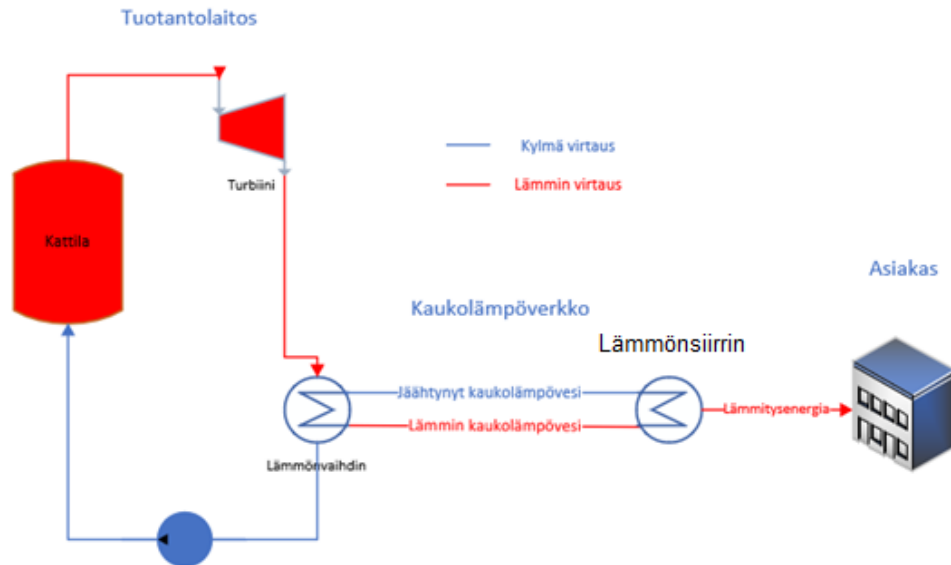
1.4 Työn rakenne

Työn rakenne koostuu tarkasteltavan lämpöjärjestelmän teoriasta, tutkimuksessa käytettävistä menetelmistä ja huomioitavista käytännön rajoitteista sekä saatujen tulosten esittelystä. Teoriassa esitellään kaukolämpöjärjestelmän komponentit ja niiden keskinäiset suhteet kaukolämpöjärjestelmässä. Tämän jälkeen esitellään tutkimuksessa käytetyt menetelmät, ja kuinka niitä sovelletaan tarkasteltavan optimointiongelman mallintamisessa. Seuraavaksi rakennettua optimointimallia simuloidaan oikealla historiadatalla ja tuloksia vertaillaan nykykäytäntöön. Lopuksi tiivistettyjä tuloksia pohditaan ja tehdään yhteenveto työn tärkeimmistä asioista.

2. LÄMMÖNTUOTANTO

Lämpöä tuotetaan yleensä prosessitarpeisiin tai kaukolämmöksi. Prosessihöyryä voidaan tuottaa lämpövoimaloissa tai sähkön ja lämmön yhteistuotantolaitoksissa, eli CHP-laitoksissa. CHP-tuotannossa prosessihöyry otetaan talteen turbiinin väliotoista, samalla tuottaen sähköä. Puhtaassa lämpölaitoksessa sähköntuotantoa ei ole. CHP-tuotanto mahdollistaa myös eri paineisen prosessihöyryn hyödyntämisen ottamalla höyry käyttöön turbiinin väliotoista. Prosessihöyry käytetään suoraan höyrynä, joten lämmönsiirtimiä ei tarvita.

Kaukolämpöjärjestelmä muodostuu järjestelmään liitetyistä lämpöenergian tuotantolaitoksista, jakeluverkosta, kaukolämpöasiakkaan laitteista ja lämmitettävien tilojen lämmönjakelujärjestelmistä. Tuotantolaitoksilta kuuma vesi virtaa suljetussa kaksiputkisessa kaukolämpöverkossa asiakkaalle, jossa kaukolämpövesi luovuttaa energiaa asiakkaalle lämmönsiirtimen kautta, ja palaa jäähtyneenä tuotantolaitokselle. Kaukolämpövesi ei siis itsessään kierrä asiakkaan lämmitysverkossa. Kaukolämpöveden lämpötila vaihtelee sään mukaan 65 ja 115 °C välillä ja paluuputkessa yleensä 40 – 60 °C välillä. Kaukolämpöjärjestelmän periaatteellinen kuva on esitetty kuvassa 1 alla. (Energiateollisuus, 2019a)



Kuva 1: Yksinkertaistettu kaukolämpöjärjestelmä

Kaukolämpöjärjestelmistä on olemassa neljää eri sukupolvea. Sukupolvien erot ovat lämpötilassa ja välittäjäaineen faasissa. Ensimmäisen sukupolven kaukolämpöjärjestelmissä välittäjäaine vesi oli kaasufaasissa, eli lämpö välitettiin vesihöyrynä. Kyseiset järjestelmät olivat usein myös avoimia piirejä, joissa ei ollut paluulinjaa. Toisen sukupolven järjestelmissä siirryttiin paineistettuun veteen, jonka lämpötila oli pääsääntöisesti yli 100 °C astetta. Kolmanteen sukupolven siirtyessä veden lämpötila aleni alle 100 °C asteen. Uusin, neljännen sukupolven kaukolämpöjärjestelmä pyrkii alentamaan veden lämpötilaa jopa alle 80 °C asteen alle. Lämpötilan alentaminen on syntynyt tarpeesta vähentää lämpöhäviöitä ja jakelukustannuksia kaukolämpöjärjestelmässä. Samoin nykyrakennukset ovat paremmin eristettyjä ja tiheästi rakennettuja, joten niiden lämmöntarve on pienempi. Suomessa kaukolämpöjärjestelmät ovat pääasiassa kolmannen sukupolven kaukolämpöjärjestelmiä, joiden lämpötila vaihtelee 65 – 115 °C asteen välillä, vuodenajan mukaan. (Lund et al., 2014)

Kaukolämpöjärjestelmään voidaan liittää monta eri lämmönlähdettä, jotka tuottavat energiaa eri lähteistä. Yleinen käytössä oleva tuotantomuoto on CHP-tuotanto. CHP-laitokset rakennetaan

yleensä peruskuormalaitoksiksi. Huippukuorman tarpeet tyydytetään apukattiloilla, joilla on korkeat muuttuvat kustannukset. Kaukolämpöjärjestelmissä, joihin on kytketty monta eri lämmönlähdettä, pyritään optimoinnin avulla määrittämään tehokkain tapa tuottaa tarvittava lämpö. Tuotettu lämpö siirtyy kaukolämpöverkkoon lämmönsiirtimien kautta. Lämmönsiirtimien ominaisuuksiin vaikuttavat eniten niiden lämmönsiirtopinta-ala sekä siirtimen pituus. Lämmönsiirtopinta-alan tulee olla sitä pidempi mitä pienempi lämpötilaero nesteiden välillä on.

Tulevaisuudessa lämmöntuotannon rakennetta voidaan monipuolistaa tuomalla erilaisia lämmönlähteitä kaukolämpöjärjestelmään. Esimerkiksi palvelinkeskusten hukkalämmön hyödyntämisestä on viime vuosina oltu enenevässä määrin kiinnostuneita (Davies et al., 2016). Tässä luvussa esitetään erilaisia lämmönlähteitä ja niiden tarkoitusta teollisessa lämpöjärjestelmässä. Luvussa käydään läpi lämpöjärjestelmän komponentteja ja niiden toiminnan teoriaa. Viimeiseksi esitetään komponenttien vaikutus sähkön- ja lämmöntuotantoon sekä niiden käytännön rajoituksia.

2.1 Lämpöjärjestelmä ja sen komponentit

Tässä luvussa esitetään tämän tutkimuksen piirissä esiintyvät komponentit ja niiden rooli lämmöntuotantojärjestelmässä. Luvussa pyritään esittämään lämmöntuotannon sekä lämmön varastoinnin periaatteet sekä niihin liittyvät tärkeimmät teoreettiset kaavat. Luvussa keskitytään siihen, kuinka CHP-laitoksen energiatehokkuutta voidaan parantaa monipuolistamalla lämmöntuotantorakennetta.

2.1.1 CHP-laitos

CHP-tuotannolla on monia etuja. CHP-laitos tuottaa samanaikaisesti sähköä ja lämpöä ottamalla talteen normaalissa lauhdetuotannossa hukkaan menevän lämmön. Sillä voidaan vähentää polttoainekustannuksia, kasviuonepäästöjä ja fossiilisten polttoaineiden käyttöä (Bianchi & De Pascale, 2012). Varsinkin polttoaineiden hintojen nousun myötä CHP-tuotannon suosio on noussut viime vuosina. CHP-laitos toimii tyypillisesti yli 80 % hyötysuhteella. Yhteistuotannossa on huomattavasti parempi hyötysuhde kuin erillistuotannossa, sillä lähes kaikki ylimääräinen lämpö voidaan hyödyntää (Raiko, 2007).

Lauhdevoimalaitokset eroavat vastapainevoimalaitoksista siten, että ne tuottavat pelkästään sähköä ja ylimääräinen lämpö jätetään hyödyntämättä. CHP-laitoksen suunnittelun lähtökohtana on alueen lämpökuorma. Lämpökuorma voi koostua prosessihöyryn tarpeesta tai kaukolämmön tarpeesta. CHP-tuotannon suorituskykyä voidaan mitata joko lämpöindeksillä, joka tarkoittaa syötetyn polttoaineen suhdetta tuotettuun sähköön ja lämpöön, tai termisellä hyötysuhteella, joka on lämpöindeksin käänteisluku (Majanne & Seiseddos, 2012).

CHP-laitoksessa tuotettu lämpö hyödynnetään yleensä kaukolämpönä tai prosessihöyrynä. Kaukolämmön lisäksi lämpöä voidaan hyödyntää kaukojäähdytyksessä. Kaukojäähdytysverkossa virtaava kylmä vesi viilennetään käyttämällä CHP-tuotannon lämpötehoa absorptiolämpöpumpun käyttöenergiana. Kaukojäähdytyksen avulla CHP-tuotantolaitoksien kesäajan kuormaa pystytään nostamaan aikana, kun kaukolämpökuorma ei ole suuri. Tällä tavalla CHP-laitosten toiminta-aikaa on pystytty laajentamaan ja sähköntuotantoa lisättyä. Kaukojäähdytyksen ongelmana on kuitenkin sen huono hyötysuhde.

CHP-laitoksissa tuotettu kaukolämpö tuotetaan vastapainehöyrystä, joka on tyypillisesti 0,08 – 0,15 MPa paineessa, mikä riittää kaukolämpöveden lämmittämisen 70 – 120 °C asteeseen. Laitoksen rakenteen mukaan rakennusaste voi vaihdella 0,3 ja 0,6 välillä. Rakennusaste on CHP-laitoksen tärkein karakteristika, joka kuvaa kehitetyn sähköenergian sekä prosessi- ja kaukolämmön tuotantosuhdetta. Rakennusaste voidaan matemaattisesti ilmaista kaavalla (2-1)

$$\alpha = \frac{P_{netto}}{\phi_{kl}}, \quad (2-1)$$

missä ϕ_{kl} on lämpöteho ja P_{netto} on nettosähköteho. Rakennusaste ilmaisee, mikä sähkön- ja lämmöntuotannon suhde CHP-laitoksessa on. Rakennusastetta voidaan kasvattaa lisäämällä

tuorehöyryn painetta, hyödyntämällä matala- ja korkeapaine syöttöveden esilämmitystä ja kaksivaiheista lämmönsiirintä. (Majanne & Seiseddos, 2012)

Prosessihöyryä tuottavien CHP-laitosten tarkoitus on tuottaa eri paineista höyryä teollisuusprosesseille. Eri paineista prosessihöyryä voidaan tuottaa lisäämällä vastapaineturbiiniin välitoitoja. Prosessihöyryä käytetään sen korkean energiakapasiteetin ja hyvän lämmönjohtavuuden takia. Tyypillisiä prosessihöyryn käyttäjiä ovat esimerkiksi paperiteollisuus ja kemianteollisuus. Prosessihöyryn painetasot vaihtelevat 0,2 – 3 MPa: n välillä, riippuen käyttäjien painevaatimuksista. Aina CHP-laitokset eivät kuitenkaan ole puhtaasti prosessihöyryn tai kaukolämmön tarpeisiin rakennettuja voimalaitoksia. Jos alueella on teollisuutta ja tarpeeksi tiheään asuttu kaupunki, tuottaa CHP-laitos prosessihöyryä sekä kaukolämpöä alueen tarpeisiin. Tällöin turbiinista on tehtävä monimutkaisempi, jotta lämpö saadaan tuotettua oikeassa paineessa ja lämpötilassa jokaiselle lämmönkäyttäjälle.

2.1.2 Kaukolämpöakku

Kaukolämpöakulla tarkoitetaan yleensä säiliötä, joka on valmistettu teräksestä, betonista, muovista tai tilasta, joka on vuorattu vettä pitävällä aineella. Varastointi perustuu tuntuvan lämmön varastointiin. Tuntuvan lämmön varastoinnilla tarkoitetaan käytettävän väliaineen lämpötilan muuttamista (Dincer et al., 2010). Varastoidun energian määrä riippuu lämpötilan muutoksesta, väliaineen ominaislämpökapasiteetista ja väliaineen massasta. Kyseinen riippuvuus voidaan matemaattisesti esittää kaavalla

$$\phi = m * c_p * \Delta T, \quad (2-2)$$

missä ϕ on varastoitu energian määrä [kJ], m on väliaineen massa [kg], c_p on väliaineen ominaislämpökapasiteetti [kJ/kg*K] ja ΔT on lämpötilan muutos [K].

Vesi on yleinen varastointiaine sen korkean ominaislämpökapasiteetin, myrkyttömyyden, edullisuuden ja helpon saatavuuden takia. Vesi toimii energian siirron väliaineena ja energiaa varastoivana massana. Tuntuvaan lämpöön perustuvassa varastoinnissa väliaine ei käy faasimuutosta läpi, toisin sanoen vesi ei jäädy eikä höyrysty varastossa. Akulta vaaditaan myös, että se on hyvin kerrostettu, eli sen pitäisi pystyä pitämään eri lämpötilassa olevaa ainetta eri kerroksissa ilman suuria lämpöhäviöitä. Vettä hyödyntämällä tätä ongelmaa ei tule, sillä vedessä tapahtuva tiheyden muutos lämpötilan muuttuessa kerrostaa sen luonnollisesti. Kuumalla vedellä on pienempi tiheys, joten se nousee varaston yläosaan ja kylmä vesi painuu pohjalle. Kylmän ja kuumaa veden välissä on välivähyke, jossa lämpötilagradientti on suuri. Tämä alue erottaa kylmän ja kuumaa veden toisistaan. (Dincer et al., 2010, s. 111)

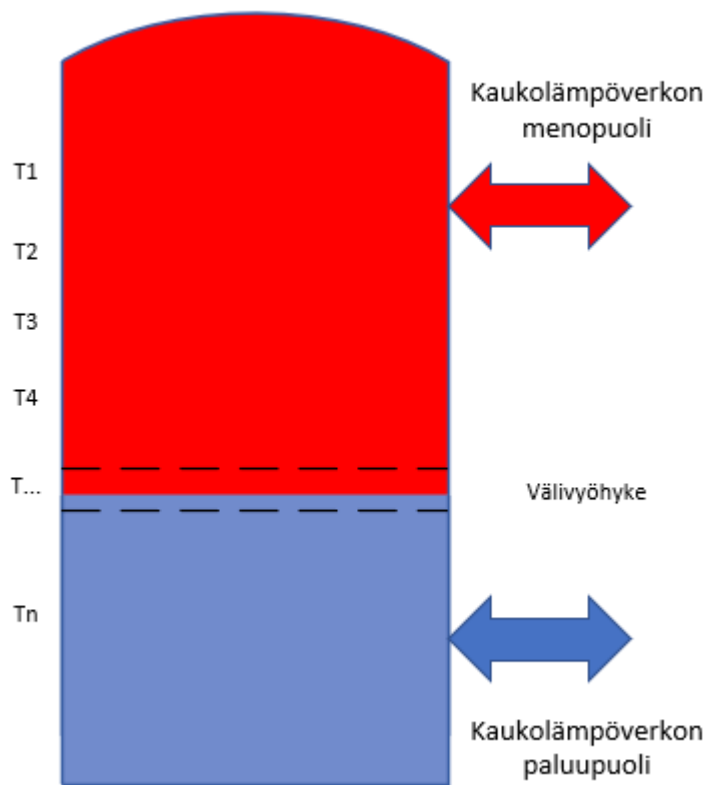
Jos akun veden maksimilämpötila on alle veden kiehumislämpötilan (100 °C), voi akku olla paineistamaton. Suomessa kaukolämmön maksimi tulolämpötila on 115 °C (Raiko, 2007, s.110), mutta kaukolämpöverkossa näin kuumaa vettä vaaditaan hyvin harvoin, joten paineistamaton akku soveltuu yleensä hyvin. Tämä mahdollistetaan joko ohittamalla kaukolämpöakku tai priimaamalla lämmitysvesi ennen kaukolämpöverkkoon menemistä (Phetteplace, 2013). Priimaus tarkoittaa veden lämpötilan nostamista tarvittavalle lämpötilatasolle esimerkiksi lämpökattilan avulla. Kaukolämpöakku voidaan kytkeä kaukolämpöjärjestelmään joko suoralla tai epäsuoralla kytkennällä. Suora kytkentä tarkoittaa, että kaukolämpöakussa kiertää sama vesi kuin kaukolämpöjärjestelmässä. Epäsuorassa kytkennässä kaukolämpöakun ja kaukolämpöjärjestelmän välissä on lämmönsiirrin, jolloin kaukolämpöakulla on oma erillinen vesikierto. Kaukolämpöakku liitetään kaukolämpöverkkoon siten, että lämmin menopuoli kytketään kaukolämpöakun yläosaan ja kylmempi paluupuoli alaosaan. Tässä työssä tarkastellaan suoraan kaukolämpöjärjestelmään kytkettyä kaukolämpöakku. (Dincer et al., 2010)

Veden virtaaminen sisään ja ulos varastosta voidaan toteuttaa suoralla kytkennällä liitettynä kaukolämpöakkuun kahdella tavalla. Kaukolämpöakku voi olla yhdistetty kaukolämpöverkkoon hydraulisesti (paine kytkentä) tai olla paineeltaan eristetty. Hydraulisesti yhdistettyä akku käytetään lähinnä pienemmän kokoluokan kaukolämpöjärjestelmissä, sillä niissä voi olla vain yksi kauko-

lämpöakku verkkoon kytkettynä. Se on myös huono vaihtoehto paikkoihin, joissa on paljon korkeuseroja, sillä sen tuottama paine-ero ei välttämättä riitä voittamaan korkeuserojen aiheuttamaa painehäviötä. (Phetteplace, 2013)

Paineeltaan eristetty varasto on monimutkaisempi vaihtoehto, mutta toimii paremmin kuin hydraulisesti yhdistetty. Tässä toteutuksessa kaukolämpövarastolla on oma lataus- ja purkupumpunsa, jotka mahdollistavat varaston käytön kaukolämpöverkosta riippumatta. (Phetteplace, 2013) Tässä työssä tarkastellaan paineistamatonta akkua, joten sen käyttölämpötila rajoittuu 100 °C asteeseen.

Kun kaukolämpöakku ladataan, syötetään sen yläosaan kuumaa vettä samalla kun sen alaosasta poistetaan kylmää vettä. Akkua purettaessa, on toiminta päinvastaista, eli yläosan kuumaa vettä poistetaan ja alaosaan tuodaan kylmää vettä. Kaukolämpöakku ylläpitää yleisesti vakiomäärän vesimassaa, jonka tilavuuteen vaikuttaa varastoidun veden lämpötila. Kaukolämpöakku mallintaessa on selvitettävä kaukolämpöakun varaus simuloinnin alussa sekä lataus- ja purkuprosessin kulku. Kaukolämpöakun lämmön kerrostuminen on esitetty kuvassa 2. (Badyda et al., 2011)



Kuva 2: Kaukolämpöakku ja sen lämpötilavyöhykkeet kuvattuna

Kaukolämpöakku on jaettu vyöhykkeisiin varastoidun lämmön laskemista varten. Alueet on merkitty kuvaan numeroin 1-n, missä n kuvaa vyöhykkeiden määrää. Kuvaan on merkitty myös väli-vyöhyke $T_{...}$, missä kuuma ja kylmä vesi sekoittuvat. Tämän vyöhykkeen korkeus on tyypillisesti noin 1 metri (Phetteplace, 2013). Mallissa oletetaan, että jokaisen vyöhykkeen lämpötila pysyy vakiona. Varastoidun energian määrä voidaan laskea muokkaamalla kaava (2-2) muotoon

$$\phi_v^t = \sum_n \frac{\pi d^2}{4} l_n \rho_w c_w (T_n^t - T_z^t), \quad (2-3)$$

jossa d on akun halkaisija, l_n on n:nneen alueen korkeus, ρ_w on veden tiheys, c_w on veden ominaislämpökapasiteetti paineen ja lämpötilan funktiona, T_n on veden lämpötila vyöhykkeellä n ajankohdella t , T_z on kylmän paluuvien lämpötila kokonaisenergian laskentahetkellä. Yhtälön (2-3)

mukaan kaukolämpöakun lämpötila muuttuu kylmän paluuveden lämpötilan mukaan. Joissain tapauksissa on mahdollista, että negatiivinen määrä lämpöä varastoidaan akun alaosaan. (Badyda et al., 2011)

Kaukolämpöakkuun varastoidun veden käyttäminen on järkevää ainoastaan, kun sen tarjoama lämpötila on merkittävästi korkeampi kuin kaukolämpöverkon paluupuolen lämpötila. Tämä lämpötilaero on tyypillisesti noin 30 – 40 °C astetta paineistamattomissa ja 50 – 55 °C astetta paineistetussa kaukolämpöakuissa (Phetteplace, 2013). Tämän seurauksena kaukolämpöakun käytävissä oleva lämpöenergia vaihtelee kaukolämpöverkon paluupuolen lämpötilan mukaan. Tämän takia kaukolämpöakun välivyöhykkeen suuruus on määritettävä ja löydettävä niin sanottu ”kuuma vyöhyke”, jossa kaukolämpöakkuun varastoidun veden lämpötilaero on riittävä. Tämä lämpimän alueen alaraja voidaan määrittää laskemalla lämpötila vyöhyke vyöhykkeeltä läpi ylhäältä alas kaavalla (2-4)

$$T_n \geq T_z + T_{hot}, \quad (2-4)$$

missä T_n on tarkasteltavan vyöhykkeen lämpötila, T_z on kaukolämpöverkon paluupuolen lämpötila ja T_{hot} on vaadittu lämpötilaero T_n vyöhykkeen ja paluupuolen lämpötilan välillä. Määritettyä alarajaa voidaan käyttää kaavassa (2-2) kaukolämpöakkuun varastoidun lämpöenergian määrän laskemisessa. Mallissa oletetaan, vyöhykkeiden vakiolämpötilan lisäksi, että lämpöhäviöitä ympäristöön ei tapahdu. Todellisuudessa näin ei ole, mutta sisäisen lämpötilajakauman määrittäminen on hankalaa, joten yksinkertaistuksia on käytettävä.

Kaavalla (2-3) voidaan määrittää kaukolämpöakun aloitushetken varastoituna oleva lämpöenergia. Tulevaisuuden ajanhetkien lämpöenergian määrittämiseen kaava ei kuitenkaan sovellu, sillä lataus- ja purkusyklien vaikutusta vyöhykkeiden lämpötiloihin ei tiedetä. Myöhempien ajanhetkien suunnittelussa varastoidun lämpöenergian määrä voidaan määrittää kaavalla (2-5)

$$\phi_v^i = \phi_v^{t-1} + q_{in}^t t - q_{out}^t t, \quad (2-5)$$

missä t kuvaa alkavaa ajanhetkeä, ϕ_v^{t-1} on akun energiasisältö edellisellä ajanhetkellä, $q_{in}^t t$ on kyseisen hetken akkumuloitu energia ja $q_{out}^t t$ on kyseisen hetken purettu energia (Badyda et al., 2011). Kaava (2-5) olettaa mallin edelleen ideaaliseksi, eikä se ota huomioon kaukolämpöverkon paluuveden lämpötilavaihteluiden vaikutusta varastoituun energiamäärään.

Kaavassa (2-5) käytettyjen lataus- ja purkutehojen suuruus voidaan määrittää kaavalla (2-6)

$$q_{in} = q_{out} = \dot{m}(h_{av}^{hot} - h_{re}), \quad (2-6)$$

missä \dot{m} meno- tai paluupuolen massavirta, h_{av}^{hot} on keskimääräinen lämpimän alueen veden entalpia ja h_{re} on paluupuolen veden entalpia. Kaavalla (2-6) voidaan määrittää kaukolämpöakun maksimikäyttöteho korvaamalla massavirta \dot{m} kaukolämpöakun pumpun maksimimassavirralla \dot{m}_{max} . (Badyda et al., 2011)

Pitkäaikaiset kausivarastot ovat viime vuosina alkaneet kiinnostaa energia-yhtiöitä entistä enemmän. Kausivaraston tarkoituksena on vähentää polttamalla tuotettavan energian määrää korvaamalla kylmän ajan lämmöntarvetta varastoidulla lämmöllä. Suomi on energian kausivarastoinnissa edelläkävijä, sillä Helen suunnittelee Kruunuvuorenrannan kallioluoliin maailman ensimmäistä kausivarastoa. (Helen, 2019) Suunnittelussa ratkaisussa kallioluolat täytetään kesäaikaan auringon lämmittämällä meren pintavedellä, jota hyödynnetään talvikaudella lämpöpumppujen energianlähteenä. Kalliovarastoja on aiemmin käytetty yleisesti raskaan polttoöljyn varastoinnissa, mutta niitä muutetaan nyt aktiivisesti lämmönvarastoinnin tarpeisiin. Hyödyntämällä tämänkaltaisissa sovelluksissa sähköä käyttäviä lämmöntuotantokomponentteja, kuten lämpöpumppua, voidaan osallistua myös sähköverkon kulutusjoustoön, sekä vähentää kalliiden ja ilmastolle haitallisten apukattiloiden käyttöä.

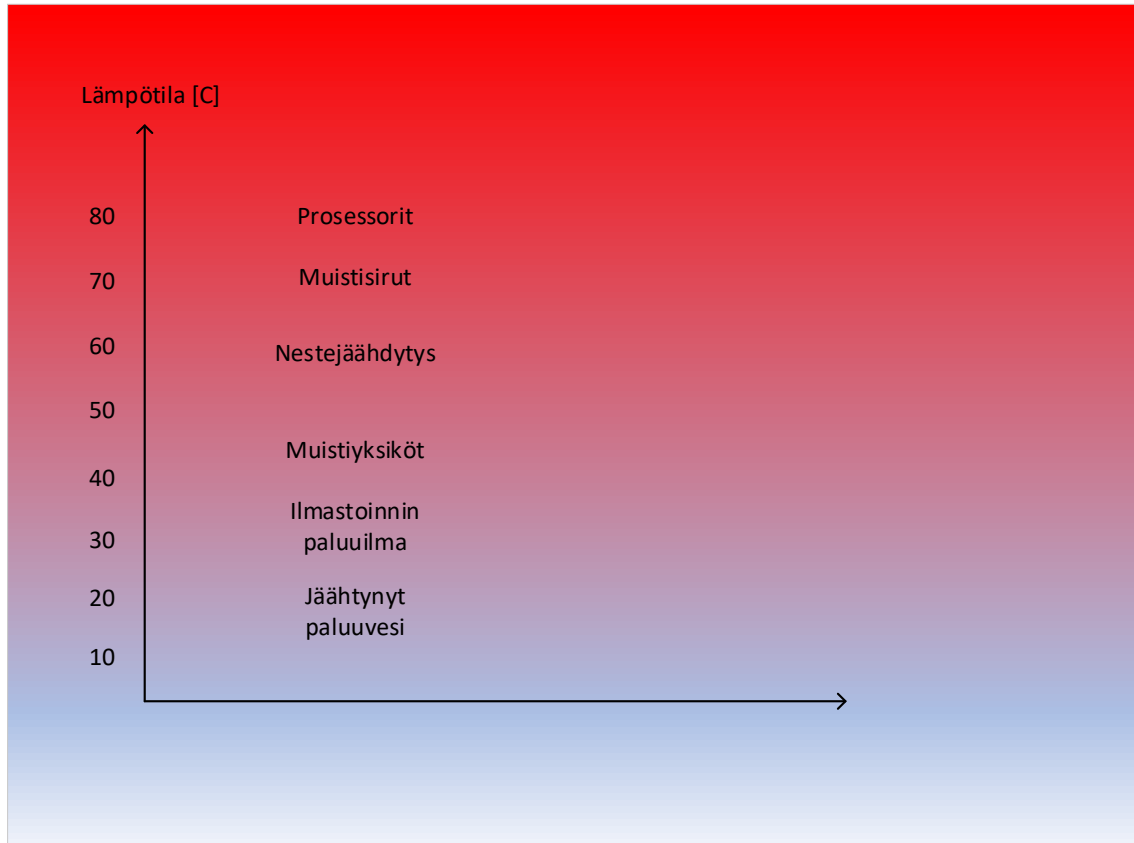
2.1.3 Palvelinkeskusten hukkalämpö

Informaatio- ja kommunikaatioteknologian sovellusten ja palveluiden sekä verkkoliikenteen määrä kasvavat koko ajan. Pilvipalveluiden yleistymisen myötä prosessoitavan datan määrä kasvaa, mihin tarvitaan palvelinkeskuksia. Palvelinkeskukset koostuvat erilaisista tietoliikennelaitteista ja niiden vara- ja suojausjärjestelmistä. Palvelinkeskukset käyttävät paljon sähköä; vuonna 2010 Suomessa noin 0,5-1,5 % koko sähkönkulutuksesta ja maailmanlaajuisesti noin 1,3 %. Palvelinkeskukset tuottavat myös runsaasti lämpöä. Usein tämä hukkalämpö johdetaan suoraan ulos konesalista, mutta sen hyödyntäminen muissa prosesseissa on yleistymässä, mikä lisää palvelinkeskusten energiatehokkuutta huomattavasti. Yleinen käyttökohde on hyödyntää hukkalämpöä kaukolämmityksessä, mikä tapahtuu lämpöpumpun avulla. Esimerkiksi Helsingissä ja Espoossa kyseistä teknologiaa hyödynnetään jo kaukolämmityksessä. Lämpöpumpun hyödyntäminen palvelinkeskuksen hukkalämmön käyttämisessä kaukolämmityksessä vaatii kuitenkin sen, että konesalissa on käytössä nestejäähdytys. (Motiva, 2011, s. 4-13)

Davies et al. (2016) tutkivat mahdollisuutta käyttää palvelinkeskusten hukkalämpöä suoraan kaukolämpöverkossa. Hukkalämpö kerätään yleensä suoraan keskusten tiloista ilmanvaihdon kautta. Ilmanvaihdosta lämmin ilma ohjataan lämmönsiirtimille tai lämpöpumpulle. Lämpöpumpun läpi virrannut viilennyt ilma (20-25 °C) voidaan johtaa takaisin palvelinkeskukseen viilentämään palvelimia.

Yleisin palvelinkeskusten jäähdytysmetodi on ilmajäähdytys yhdessä jäähdytysveden kanssa (Davies et al., 2016). Ilmajäähdytys on kuitenkin energiatehokkuudeltaan huono ratkaisu, sillä konesali itsessään ei tarvitse jäähdytystä, ainoastaan sen komponentit. Komponentteja on järkevämpää jäähdyttää suoraan, ja se onnistuu hyödyntämällä nestejäähdytystä. Nestejäähdytyksellä lämpö saadaan talteen suoraan komponentilta korkeassa lämpötilassa. Nestejäähdytys voidaan toteuttaa joko yhdessä ilmajäähdytyksen kanssa, jolloin vain eniten jäähdytystä tarvitsevat komponentit jäähdytetään nesteellä ja muut ilmalla, tai koko palvelinkeskus voidaan jäähdyttää nesteellä. On myös mahdollista upottaa komponentit kokonaan nesteeseen, jolloin lämmönsiirto komponenteilta tehostuu huomattavasti, sillä neste on ilmaa tehokkaampi lämmönsiirtäjä. (Davies et al., 2016)

Hukkalämmön hyödyntämisessä avainasemassa on talteen otetun lämmön lämpötila. Suurin osa hukkalämmön hyödyntämiskohteista vaativat yli 70 °C asteen lämpötiloja, joten hukkalämpöä ei suoraan ilman esikäsittelyä voida hyödyntää (Davies et al. 2016). Lämpöpumpua hyödyntämällä hukkalämmön lämpötila voidaan nostaa tarpeeksi korkeaksi. Lämpöpumpun tehokkuuteen vaikuttavat saatavilla olevan hukkalämmön lämpötila, käytetty kylmäaine, lämmitysjärjestelmän lämpötila ja lämpöpumpun COP (Coefficient of Performance), eli lämpökerroin. Hukkalämmön hyödyntämisen taloudellinen kannattavuus voidaan määrittellä lämpöpumpun tarvitseman energian suhteena siitä saatavaan energiaan. Kuvassa 3 on havainnollistettu palvelinkeskusten hukkalämmön lähteitä ja niiden lämpötiloja.



Kuva 3: Palvelinkeskuksen hukkalämmön lähteet ja niiden lämpötilat (Davies et al., 2016)

Palvelinkeskusten hukkalämmön hyödyntämismahdollisuuksiin vaikuttavat keskusten sijainti, koko, laitteet, lämpötila ja tekniset ominaisuudet sekä jäähdytysjärjestelmän tyyppi. Hukkalämmön lämpötilaan vaikuttaa vahvasti paikka, missä lämpö otetaan talteen. Perinteisen ilmajäähdytteisen palvelinkeskuksen hukkalämmön lämpötila on noin 25-35 °C astetta. Nestejäähdytteisissä keskuksissa, joissa jäähdytyslaitteisto on asennettu suoraan palvelintelineeseen, voidaan lämpö ottaa talteen läheltä lämmön lähdettä, jolloin ympäröiviä tiloja ei jäähdytetä turhaan ja jäähdytyksen vaikutus kohdistuu suoraan palvelimiin. Tällöin keskuksen jäähdytysverkoston nesteen paluulämpötila voi olla jopa 50-60 °C astetta. (Wahlroos et al., 2017)

Palvelinkeskusten hukkalämmöllä voidaan saavuttaa merkittävät säästöt energiakustannuksissa, mutta merkittävä tekijä säästön syntymisessä on palvelinkeskuksen sijainti. Depoorter et al. (2015) tutkivat palvelinkeskusten energiansäästöpotentiaalia eri alueilla. Tutkimuksen mukaan sijoittamalla palvelinkeskus maahan, jossa on kylmä ilmasto ja halpa sähkön markkinahinta, saavutettiin 5,4 – 7,9 % säästöt palvelinkeskuksen energiankulutuksessa. Esimerkiksi sijoittamalla palvelinkeskus Saksan sijasta Ruotsiin, jossa on halpa sähkön markkinahinta, saavutettiin jopa 42,5 % säästöt energiakustannuksissa. Lisäksi Ruotsissa suurin osa sähköstä on tuotettu uusiutuvalla energialla, mikä osaltaan lisää sen houkuttelevuutta (Depoorter et al., 2015)

Palvelinkeskusten sijoittaminen Suomeen on siis kannattavaa, sillä halvan sähkön markkinahinnan lisäksi kylmä ilma tarjoaa tehokasta viilennystä keskuksille. Pohjoismaissa siirrytään hiljalleen alhaisempiin kaukolämpöverkon lämpötiloihin, sillä uudet rakennukset ovat paremmin eristettyjä. Pohjoismaissa suuri osa kaukolämmöstä tuotetaan tällä hetkellä CHP-laitoksilla. Alhaisempi kaukolämpöverkon lämpötila mahdollistaisi CHP-tuotannon korvaamisen muilla lämmöntuotantomuodoilla, kuten palvelinkeskusten hukkalämmöllä. Tämä kuitenkin edellyttäisi palvelinkeskusten rakentamista lähelle kaukolämpöverkkoa, jotta siirtokustannukset saadaan minimoitua. (Wahlroos et al., 2017)

Tärkeä kysymys hukkalämmön hyödyntämisessä on se, kuka tekee investoinnin laitteistoon, jolla lämpö saadaan hyötykäyttöön, eli lämpöpumppuun. Lämpöpumpput vaativat isoja investointeja ja

ne lisäävät sähkökäyttöä, joten jos palvelinkeskuksen operaattori hankkii lämpöpumput, on lämmön myynnille oltava hyvät tulevaisuudennäkymät. Energiayhtiöiden ja palvelinkeskusten välinen yhteistyö hukkalämmön hyödyntämisessä voi juuri tästä syystä olla ongelmallista. Palvelinkeskusten asiakassopimukset ovat yleensä 1-5 vuoden mittaisia, joten niiden lämmöntuotto tiedetään vain lyhyeltä aikaväliltä (Wahlroos et al., 2017). Energiayhtiöt kuitenkin tekevät investointinsa huomattavasti pidemmällä aikavälillä (15-40 vuotta), joten tämä voi aiheuttaa sopimusongelmia energiayhtiöiden ja palvelinkeskusten välillä.

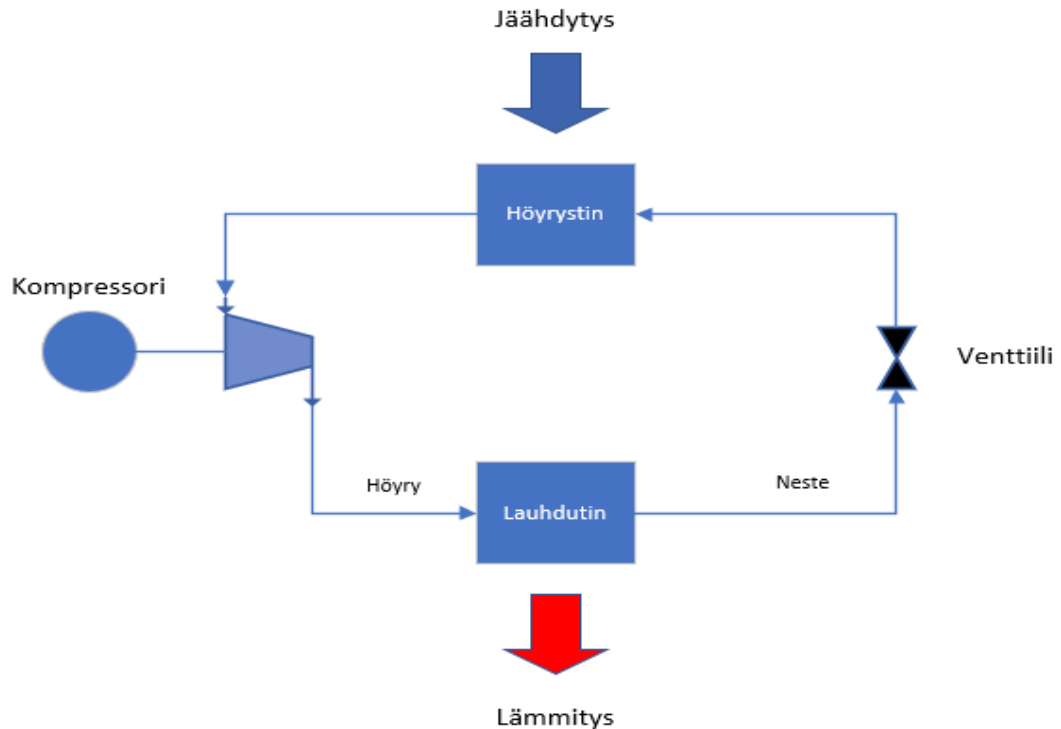
Palvelinkeskusten hukkalämpö kiinnostaa energiayhtiöitä paljon, koska niiden tuottama hukkalämpö on halpaa ja niiden lämmöntuotto on tasaista. Lähes kaikki palvelinkeskuksen tuottama lämpö voidaan hyödyntää. Tutkimusten mukaan palvelinkeskukset toimivat hyvin tasaisella kuormalla, joten niiden lämmöntuotto on tasaista ympäri vuoden (Wahlroos et al., 2017).

Hukkalämmön ostaminen palvelinkeskukselta voi olla suuret hyödyt kaukolämpöä myyvälle energiayhtiölle. Hukkalämpöä ostamalla energiayhtiö voi vähentää tuotantokustannuksia korvaamalla kallista huipputuotantoa palvelinkeskusten hukkalämmöllä. Samalla vähenevät kasvihuonepäästöt, sillä huippukuormalaitokset ovat yleensä öljy- tai maakaasupohjaisia lämpölaitoksia. Palvelinkeskusten lisääntyessä, voidaan mahdollisesti päätyä tilanteeseen, missä uusia lämpövoimalaitosinvestointeja ei tarvita enää ollenkaan. Hukkalämmön määrässä voidaan myös saavuttaa tilanne, jossa sitä on enemmän kuin lämmöntarve kyseisellä ajanhetkellä on. Tällöin olisi edullisinta, jos ylimääräinen lämpö voitaisiin varastoida kaukolämpövarastoon myöhempää käyttöä varten. Samalla lisättäisiin kaukolämpöverkon joustoa.

2.1.4 Lämpöpumppu

Vuonna 2016 suurten lämpöpumppujen osuus kaukolämmön kokonaistuotannosta Suomessa oli vain 0,6 TWh (1,7% kokonaistuotannosta), kun vastaava luku Ruotsissa oli 4,0 TWh (7,4% kokonaistuotannosta). (Valor Partners, 2016, s. 39) Tulevaisuudessa uusiutuvan energian lisääntyminen kannustaa lämpöpumppujen entistä suurempaan hyödyntämiseen kaukolämmön tuotannossa. Lämpöpumpuilla voidaan tuottaa lämpöä kestävästi ja ilmastoa säästävästi hyödyntämällä esimerkiksi tuuli- tai aurinkosähköä, jolloin lämmöntuotannon hiilidioksidipäästöjä saadaan vähennettyä. Lämpöpumpun kannattavuuteen vaikuttaa kuitenkin sen lämmönlähde. Mahdollisia lämmönlähteitä ovat muun muassa jäteveden käsittelyn hukkalämpö ja palvelinkeskusten hukkalämpö.

Lämpöpumppuja on useita eri tyyppisiä. Yleisin lämpöpumppuprosessi on suljettuun kiertoon perustuva lämpöpumppuprosessi, jossa hyödynnetään sähkömoottoria tai polttomoottoria höyryn komprimointiin. Kyseisen lämpöpumppuprosessin toimintakaavio on esitetty kuvassa 4.



Kuva 4: Perinteisen lämpöpumppprosessin toimintakaavio (Raiko & Mäki-Mantila, 2005)

Lämpöpumpun toimintaperiaate muistuttaa höyryvoimalaitoksen toimintaperiaatetta sillä erolla, että väliaineen virtaussuunta on päinvastainen. Lämpöpumpun väliaine valitaan prosessikohtaisesti siten, että höyryn ominaistilavuus ja usein myös paine on mahdollisimman pieni. (Raiko & Mäki-Mantila, 2005)

Lämpöpumpun höyrystimeen tuodaan lämpöä matalasta lämpötilasta, jonka avulla matalapaineinen väliaine höyrystyy. Höyrystynyt väliaine puristetaan eli komprimoidaan kompressorin avulla korkeampaan paineeseen. Korkeapaineinen ja -lämpötilainen höyry lauhdutetaan jäähdyttämällä väliainetta lauhduttimessa. Lauhduttimessa väliaine muuttuu nesteeksi, jonka jälkeen sen paine alennetaan paineenalennusventtiilissä. Lauhduttimen teho on lämpöpumpun lämpöteho. Sen suuruus on kompressorin ja höyrystimen tehojen summa. Kylmäteho on lauhduttimen teho ja kompressorin tehojen erotus. Lämpökerroin, eli COP, on hyötytehon suhde kompressoritehoon. (Raiko & Mäki-Mantila, 2005)

Prosessin hyötysuhdetta voidaan parantaa tekemällä prosessista kaksivaiheinen ja lisäämällä yksi tai useampi kompressori sekä jäähdytyskone. Erilaisten syklien hyödyntäminen mahdollistaa lämmön hyödyntämisen eri lämpötiloista. Esimerkiksi kaksivaiheisella syklillä voidaan nostaa alhaisemman lämpötilan lämpöä korkeampaan lämpötilaan ja yksinkertaisemmalla, yksivaiheisella syklillä, voidaan hyödyntää korkeampaa lämpötilaa. (Davies et al., 2016)

Lämpöpumpulla tuotetun lämmön määrään vaikuttavat lämmönlähteen lämpötila ja määrä, sekä lämpöpumpun hyötysuhde. Lämpöpumppuja kaukolämpöverkkoon integroitaessa on otettava huomioon sen tuottama lämpötila, sillä kaukolämpöverkko vaatii maksimissaan 115 °C asteista vettä. Kaukolämpöverkon alempia lämpötilatasoja on tutkittu ratkaisuna lämpöpumppujen hyödyntämisessä.

Suurten lämpöpumppujen hyöty lämpöjärjestelmässä syntyy niiden tuomasta suuremmasta lämmöntuotannon joustavuudesta. Lämpöpumppujen käynnistys- ja käyttökustannukset ovat alhaiset ja ne käynnistyvät tarvittaessa nopeasti, jopa minuuteissa. Tämän seurauksena lämpöpumppuilla pystytään ajamaan varsin joustavasti ja parantamaan voimalaitosten energiatehokkuutta

esimerkiksi siirtämällä CHP-laitosten käynnistysajankohtaa syksyisin ja aikaistamalla alasajoa keväisin. Tämä parantaa CHP-laitosten kykyä ajaa peruskuormalla suurimman osan siitä ajasta, kun laitos on käynnissä. Jos lämpöpumppu on yhdistettynä kaukolämpöakkuun, lisää se joustavuutta entisestään, sillä silloin voidaan hyödyntää sähkömarkkinoiden hintaheilahtelut. Alhaisen sähkön hinnan aikoihin kaukolämpöakkuun voidaan tuottaa lämpöä varastoon ja ajaa osa pumppuista alas korkean sähkön hinnan aikoina. Jaksottainen käyttö saattaa kuitenkin vaikuttaa negatiivisesti lämpöpumppujen käyttöikänsä. (Valor Partners, 2016, s. 23)

Lämpöpumput myös monipuolistavat lämpöjärjestelmän lämmöntuotantorakennetta, mikä auttaa suojautumaan markkinariskeiltä. Erityisesti CHP-tuotannon kanssa toimiva lämpöpumppu auttaa optimoimaan tuotannon arvoa sähkön markkinahintojen mukaan vaihtelemalla sähkön ja lämmön tuotantosuhdetta CHP-tuotannossa. Lämpöpumput suojaavat polttoaineiden hintaheilahteluilta pienentämällä riippuvuutta polttoaineista. Optimoinnin avulla voidaan lämpöpumpun ja CHP-tuotannon välillä löytää edullisin tuotantotapa. Kaukojäähdytyksen lisääntyminen tulevaisuudessa lisää lämpöpumppujen houkuttelevuutta, sillä lämpöpumppu mahdollistaa kaukolämmön ja kaukojäähdytyksen tehokkaan yhteistuotannon yhdessä prosessissa.

Tämän diplomityön kannalta merkittävin hyöty on se, että lämpöpumput mahdollistavat hukkalämmön hyödyntämisen. Kuten aiemmin jo todettiin, mahdollisia lämmönlähteitä ovat esimerkiksi jätevesien hukkalämpö, voimalaitosten savukaasujen lämpö tai palvelinkeskusten ylijäämlämpö. Hukkalämmön matala lämpötila ei ole este lämpöpumpuille, sillä esimerkiksi Espoon Suomenojalla lämpö voidaan ottaa talteen vielä 7-8 asteisesta jätevedestä. Talvella hukkalämmön lämpötila saattaa laskea niin alhaiseksi, että siitä on vaikea saada enää lämpöä talteen. Näin voi tapahtua esimerkiksi jätevesien hukkalämmössä. Palvelinkeskuksissa ulkolämpötilan vaikutus on kuitenkin kohtalaisen pieni. (Valor Partners, 2016, s. 24-27)

2.2 Komponenttien hyödyntäminen lämmöntuotannossa

Biomassaa polttavat CHP-laitokset ovat erinomainen vaihtoehto lisätä uusiutuvan energian käyttöä. CHP-laitokset operoivat kuitenkin lämmöntarpeen mukaan, ja koska lämmöntarve ei ole vakio ympäri vuoden, on niiden operointi vähäisen lämmöntarpeen aikana epäedullista. Ilman tasapainottavia komponentteja kaukolämpöverkko käyttäytyy lähes yhtä joustamattomasti kuin sähköverkko, eli tuotannon ja kulutuksen täytyy olla tasapainossa. Talvella käytetään kalliita ja ympäristölle haitallisia polttoaineita muiden tuotantomuotojen kapasiteetin loppuessa. Kesäaikaan yhteistuotantolaitokset joutuvat käyttämään kannattamattomia säätöjä, kuten pakkolauhdetta ja apujäähdytintä, pitääkseen CHP-laitoksen kuorman minimikuorman yläpuolella. Tässä kappaleessa käydään läpi, miten CHP-laitoksen optimointiin voidaan vaikuttaa aiemmin esitellyillä komponenteilla.

2.2.1 Komponenttien vaikutus lämmöntuotantoon

Komponentteja voidaan hyödyntää lämmöntuotannossa sekä CHP-tuotannon energiatehokkuuden parantamisessa että lämpöverkon toimintavarmuutta nostavana komponenttina. Komponenteilla voidaan vaikuttaa CHP-laitoksen toimintapisteeseen, vähentää apukattiloiden, apujäähdytyksen ja ulospuhalluksen tarvetta sekä tuottaa sähköä ihanteellisina ajankohtina. Pelkästään CHP-laitosta käyttäessä, laitoksen toimintapistettä ohjaa kaukolämpöverkon lämmöntarve, joka määrittää CHP-laitoksen lämmöntuotantotehon. Tietyllä ajanjaksolla tuotettu lämpömäärä ϕ voidaan laskea kaavalla (2-7)

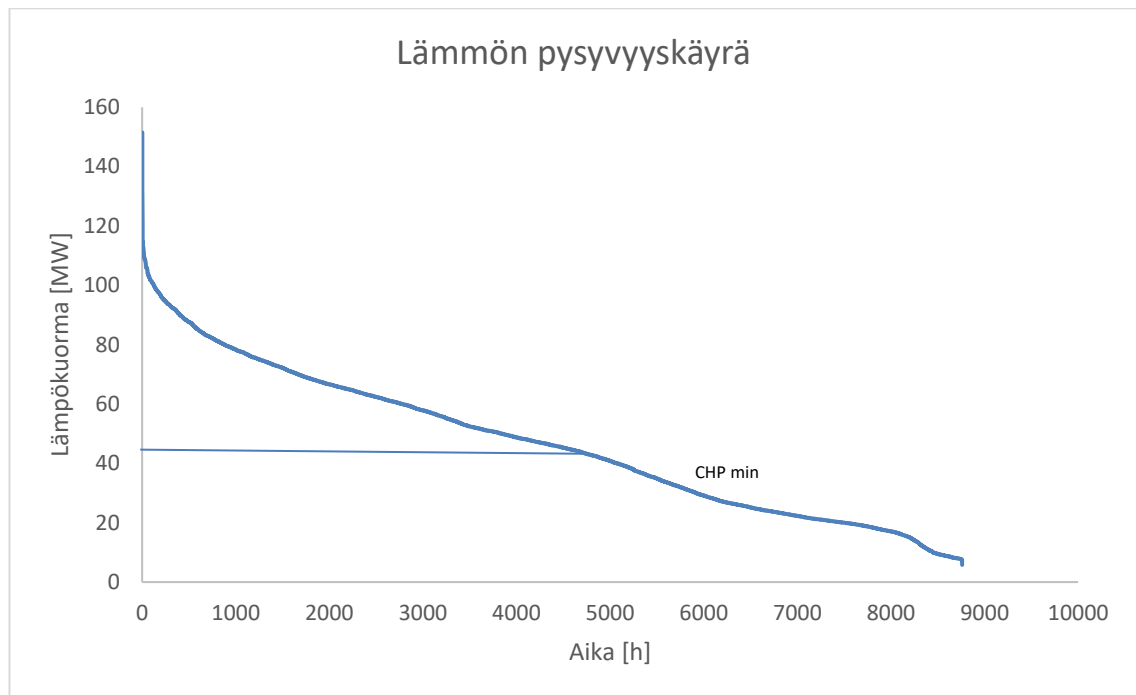
$$\phi_h = \phi_t + \phi_h, \quad (2-7)$$

missä ϕ_h on tuotettu lämpöteho, ϕ_t on lämpöverkon tehotarve ja ϕ_h on lämpöverkon häviö (Raiko et al., 2006).

Jotta ymmärtää komponenttien vaikutuksen lämmöntuotantoon, on ensin ymmärrettävä peruskuorman ja huippukuorman ero. Peruskuormalla tarkoitetaan lämpökuormaa, joka on suurimman osan vuodesta voimassa ja tuotettavissa CHP-laitoksella (Wiltshire, 2015). Tällöin CHP-laitos ajaa, oikein mitoitettuna, lähes 100 % teholla. Kun verkon lämpöteho nousee yli CHP-laitoksen

lämmöntuotantokapasiteetin, puhutaan huippukuormasta. Huippukuormat sijoittuvat yleensä kylmään aikaan, kun kiinteistöjen ja asuntojen lämmitystarve on kovimmillaan. Tällöin pienitehoisemmat apukattilat käynnistyvät, jotta huippukuorman vaatimuksiin päästään. Apukattilat polttavat yleisesti öljyä tai maakaasua, joilla on suhteellisen korkeat muuttuvat kustannukset, joten niiden käyttökustannukset ovat huomattavasti suuremmat.

Matalien kuormien aikaan, jolloin lämpökuorma on liian matala tuotettavaksi CHP-laitoksella, lämpökuormaa voidaan kasvattaa esimerkiksi apujäähdytystä tai höyryn ulospuhallusta käyttäen. Tällöin tuotetusta lämmöstä ei kuitenkaan saada korvausta, mikä tekee siitä hyvin kannattamattonta. On myös mahdollista tuottaa lämpö matalien kuormien aikaan apukattilalla, mikä ei ole kannattavaa varsinkin, jos pyritään vähentämään fossiilisten polttoaineiden käyttöä. Kuvassa 5 on havainnollistettu pysyvyyskäyrän avulla eri kuormatasojen tyypilliset kestoajat lämpöverkossa. Kuvaan on merkitty alueella toimivan CHP-laitoksen minimiteho. Maksimitehoa ei ole merkitty, koska se ylittää lämpökuorman maksimimäärän.



Kuva 5: Lämmön pysyvyyskäyrä

Pysyvyyskäyrällä voidaan siis arvioida lämpökuorman tasaisuutta. Käyrä ilmaisee ajan, jonka tietty teho on saavutettuna tai ylitettynä. Mitä tasaisempi käyrän muoto on, sitä pienempi on kuormituksen ajallinen vaihtelu. Käyrän vasemmassa reunassa on ilmaistuna huippukuorma. Tällä toiminta-alueella CHP-laitoksen lisäksi joudutaan ottamaan mahdollisesti muita lämmöntuottajia mukaan prosessiin. Minimikuorma tulee ottaa huomioon CHP-laitoksen tuotannonsuunnittelussa ja mallintamisessa. Ylimoitettun CHP-laitoksen lämpökuormaa joudutaan nostamaan apujäähdytystä tai pakkolauhdetta käyttäen, mikä heikentää prosessin tehokkuutta. Minimikuorman ongelmat tulevat esille tyypillisesti kesäaikana, jolloin lämmöntarve on alhaisimmillaan.

CHP-laitoksen energiatehokkuutta ja käyttöä saadaan parannettua korvaamalla apujäähdytys- ja kattiloiden käyttö muilla komponenteilla. Energiatehokkuuden parantaminen perustuu lämpökuormien vuorokausirytmien tasaamiseen. Lämpökuormien ollessa pieniä, voidaan esimerkiksi kaukolämpöä ladata, jolloin se toimii apujäähdytyksen tavoin. Kaukolämpöäkin etuna on kuitenkin se, että tuotettu lämpö voidaan hyödyntää myöhemmin, kun lämpökuorma on korkeampi. Korkeiden kuormien aikaan apukattiloiden käytöltä vältytään purkamalla akkuun varastoitua lämpöä verkkoon. Lisätessä kaukolämpöä järjestelmään on kuitenkin otettava huomioon, että se ei lisää järjestelmän kapasiteettia ja sillä ei tulisi korvata apukattiloiden kapasiteettia (Wiltshire, 2015).

Huippukuormien aikana myös palvelinkeskuksen hukkalämmöllä voidaan vähentää apukattiloiden sekä -jäähdytyksen käyttöä. Korkean kuorman aikaan hukkalämmöllä saadaan helposti lisää

lämpötehoa verkkoon ilman apukattiloita, ja pienillä kuormilla hyöty perustuu CHP-laitoksen sammuttamiseen ja lämmön tuottamiseen mahdollisesti kokonaan hukkalämmöllä. Ideaalisessa tapauksessa palvelinkeskuksen yhteydessä toimivat lämpöpumput sekä itse palvelinkeskus saisivat energiansa uusiutuvasti tuotetulla sähköllä, jolloin alueen hiilijalanjälki pienenee. Jos palvelinkeskuksia on alueella useita, voidaan niiden tuottamalla lämpömäärällä tuottaa koko tarvittava kaukolämpö lämpöiseen aikaan, jolloin kuorma ei ole suuri.

Peruskuormien aikana CHP-tuotannon energiatehokkuuteen voidaan vaikuttaa lähinnä kaukolämpöakun käytöllä. Peruskuormien aikaan CHP-laitoksen lämpökuormaa nostetaan tai laskeaan kaukolämpöakun avulla siten, että CHP-tuotannon kokonaishyötysuhde on mahdollisimman hyvä. CHP-tuotannon hyötysuhde on siis vahvasti kytköksissä sen toimintapisteeseen. CHP-laitoksella on yleisesti neljä ulostuloa: sähkö, lämpö, lämpöhäviöt ja savukaasupäästöt. Käytössä olevaa energiaa ovat sähkö ja lämpö, osittain myös savukaasuista lämmönsiirtimien kautta saatu lisälämpö. CHP-laitoksen kokonaishyötysuhde voidaan laskea kaavalla (2-8)

$$\eta_{tot} = \eta_k \eta_g \eta_t \eta_{omak}, \quad (2-8)$$

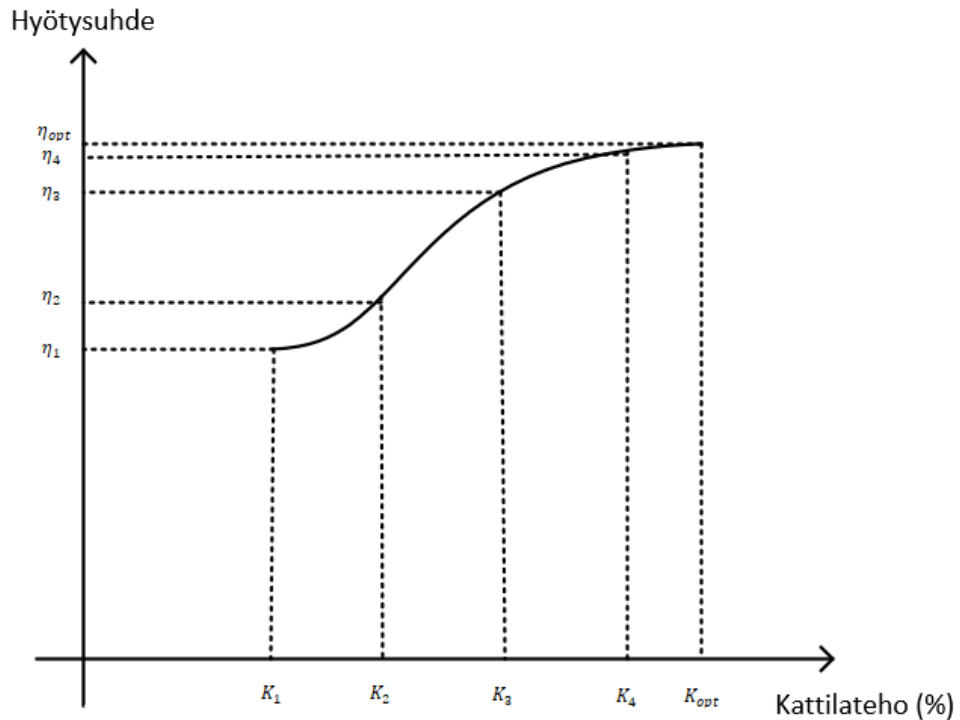
missä η_k on kattilan hyötysuhde, η_g on generaattorin hyötysuhde, η_t on turbiinin mekaaninen hyötysuhde ja η_{omak} on omakäyttöhyötysuhde. Kattilan hyötysuhde muodostuu palamishäviöistä, säteilyhäviöistä ympäristöön sekä savukaasuhäviöistä. Omakäyttöhyötysuhde ottaa huomioon laitoksen käyttöön tarvittavan tehon, ja näihin kuuluu esimerkiksi ilma- ja savukaasupuhaltimet, lauhduttimen jäähdytysvesi sekä tehonsiirtohäviöt syöttöpumppuun. (Raiko et al., 2006)

CHP-laitosta mallintaessa on toimintapisteen vaikutus hyötysuhteeseen otettava huomioon, sillä hyötysuhde muuttuu epälineaarisesti toimintapisteen muutosten mukaan. Kokonaishyötysuhde voidaan ilmaista toimintapisteen funktiona yhtälöllä (2-9)

$$\eta_{tot} = f(K), \quad (2-9)$$

missä K on CHP-laitoksen toimintapiste.

Kuvassa 6 on esitetty tyypillinen CHP-laitoksen hyötysuhdekuvaaja. Kun CHP-laitos toimii lähellä huippukuormaa, on hyötysuhde silloin parhaimmillaan. Kuvassa tämä piste on merkitty K_{opt} (n. 90 %). Suurin osa kattilan häviöistä syntyy savukaasuhäviöistä, palamishäviöistä ja säteilyhäviöistä ympäristöön (Raiko et al., 2006, s. 128).



Kuva 6: CHP-tuotannon hyötysuhde toimintapisteen funktiona (Gu et al., 2015)

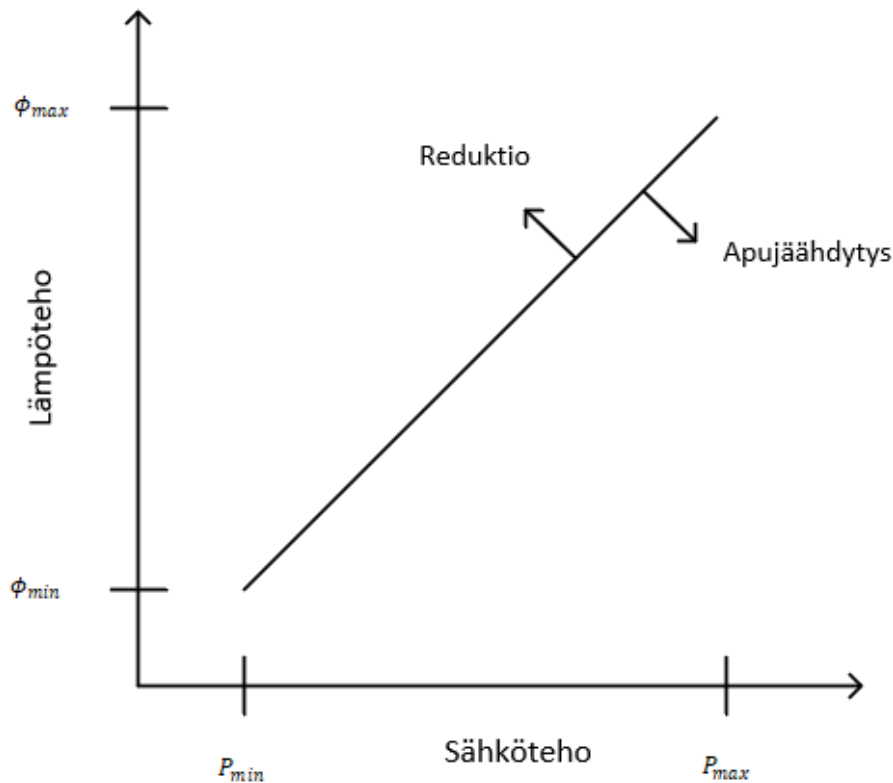
Kuvasta 6 nähdään, että hyötysuhde on huonoimmillaan matalilla osakuormilla. Osakuorman huono hyötysuhde selittyy pääosin tehosta riippumattomista lämpöhäviöistä. Pienillä kuormilla poltossa tarvitaan suurempi ilmakerroin, joka aiheuttaa savukaasuhäviöiden ja säteilyhäviöiden suhteellisen osuuden kasvun, sillä ne ovat toimintapisteestä riippumatta lähes vakioita. Maksimikuormaa lähestyessä hyötysuhde heikkenee hieman, koska savukaasujen jäähtyvyys huononee, kun lämmönsiirtimien lämpötilaerot kasvavat (Huhtinen et al., 2004).

Kuten aiemmin todettiin, CHP-laitoksen tehokkuuden parantuminen perustuu sen lämpökuorman vuorokausirytmien tasaamiseen. Optimoinnin avulla pyritään maksimoimaan CHP-tuotannon määrä ja vähentämään apukattilan, apujäähdytyksen sekä pakkolauhdetuotannon ajoa. CHP-tuotannon kannattavuus perustuu sen hyvään hyötysuhteeseen, alhaiseen polttoaineen hintaan sekä sen sähkön ja lämmön myynnin tuottoihin. CHP-laitoksen mitoitus vaikuttaa sen kannattavuuteen myös vahvasti. Liian suureksi mitoitettu CHP-laitos ei pysty tehokkaasti tuottamaan lämpimän ajan lämpökuormia, jolloin se joudutaan ajamaan alas ja lämpö tuottamaan apukattilalla.

2.2.2 Komponenttien vaikutus sähköntuotantoon ja kulutukseen

Luvussa 2.2.1 esiteltiin komponenttien käyttöä CHP-tuotannon energiatehokkuuden ja hyötysuhteen parantamisessa. Lämpökuorman tasaamisen hyödyt jäävät vuositasolla kuitenkin pieniksi, sillä kaukolämpökuorma on CHP-laitoksen toiminta-alueella suurimman osan vuodesta. Tällöin komponentteja voidaan hyödyntää sähköntuotannossa sekä sen järkevässä kuluttamisessa.

CHP-laitoksen lämmön- ja sähköntuotanto ovat tiukasti sidottu toisiinsa. CHP-laitoksen lämmön- ja sähköntuotannon suhdetta kuvataan yleensä rakennusasteella, joka on esitetty jo luvussa 2.1.1. Sähkön- ja lämmöntuotannon välistä suhdetta voidaan kuvata myös graafisesti ϕP -karakteristikalla, jossa toisena akselina on sähköteho ja toisena lämpöteho (Raiko, 2007, s.129). Kuvassa 7 on kuvattuna eräs CHP-laitoksen ϕP -karakteristika.



Kuva 7: CHP-laitoksen ϕP -karakteristika (Raiko, 2007, s. 132)

Kuvassa 7 on havainnollistettu CHP-laitoksen toiminta-alueen rajaavat minimi- ja maksimitehot sähkö- ja lämpötehon osalta. Jokaisella laitoksella on oma ϕP -karakteristika, jonka tehot määräytyvät laitoksen teknisten ominaisuuksien mukaan. Kuvassa 7 on myös havainnollistettu, kuinka apujäähdytyksen ja reduktion käyttäminen vaikuttaa karakteristikaan. Tekemällä apujäähdytyksellä käyrästä loivempi, saadaan enemmän sähkötehoa lämpötehon kustannuksella. Reduktio tarkoittaa tuorehöyryn ohjaamista turbiinin ohi. Höyry kuristetaan pienempään paineeseen ja sen lämpötilaa alennetaan halutuksi ruiskuttamalla vettä höyryn sekaan. Reduktion avulla laitoksen sähkötehoa voidaan muuttaa lämpötehoksi. Tämän lisäksi reduktio mahdollistaa lämmöntuotannon turbiinirikon aikana. Apujäähdytys tarkoittaa turbiinin jälkeisen höyryn ohjaamista suoraan lämmönsiirtimelle, jossa se lauhdutetaan joihinkin luontaista vesivarastoa, kuten jokea tai merta, käyttäen. Höyryn ulospuhallus tarkoittaa prosessihöyryn puhaltamista ulkoilmaan. Ulospuhalluksella voidaan apujäähdytyksen tapaan nostaa CHP-laitoksen kuormaa ilman muutosta lämpökuormassa.

CHP-laitoksen sähköntuotannon kannattavuuden parantaminen kaukolämpöakun avulla tapahtuu lisäämällä tai vähentämällä kaukolämpöverkon kulutustehosta kaukolämpöakun käyttöteho. Tällöin CHP-laitosta voidaan ajaa kaukolämpökuormaa suuremmalla teholla sähkönhinnan ollessa korkealla, ja vastaavasti pienemmällä teholla sähkönhinnan ollessa matala. CHP-laitoksen kaukolämpötehon ja kaukolämpöverkon tehon erotus kuvaa kaukolämpöakun käyttötehoa kyseisessä tilanteessa. (Wiltshire, 2015)

Sähköntuotantoa pystytään lisäämään lämpökuormasta riippumatta myös apujäähdytintä tai ulospuhallusta hyödyntämällä. Apujäähdytyksen ja ulospuhalluksen avulla pystytään CHP-laitoksen tehoa nostamaan hetkellisesti, jolloin myös sähköä tuotetaan enemmän. Apujäähdytyksen ja ulospuhalluksen ongelmana on, että tuotetusta lämmöstä ei saada korvausta, jolloin sen kannattavuus pienenee. Apujäähdytyksen ja ulospuhalluksen korvaaminen kaukolämpöakulla perustuu siihen, että CHP-laitoksen tuottama lisälämpö ei mene hukkaan, vaan se voidaan varastoida akkuun ja hyödyntää myöhemmin. Kaukolämpöakun kustannukset muodostuvat lähinnä vain kaukolämpöakun lämpöhäviöistä ja pumppauskustannuksista. (Raiko et al., 2006)

Lämpövarastojen tärkeys uusiutuvan energian lisääntyessä kasvaa. Tuuli-, aurinko- ja vesivoimalla tuotettu energia lisää sähkömarkkinoiden volatiliteettia ja tekee sähkön hinnan entistä riippuvaisemmaksi tuotannosta ja kulutuksesta. Lämpövarastoja hyödyntämällä toimintaa voidaan optimoida siten, että halvin tuotantomuoto on aina käytössä. Esimerkiksi tuulivoiman tuotanto energiamarkkinoilla tarkoittaa, että suuri määrä sähköenergiaa saatetaan tuottaa hallitsemattomasti aikana, jolloin sähkönkulutus on vähäistä, esimerkiksi yöaikaan. Sähköverkossa tuotannon ja kulutuksen on jatkuvasti oltava tasapainossa, jolloin ylimääräinen sähköenergia on kulutettava jossain, sillä sähkön varastointi nykyisellään on hyvin tehotonta. Yksi tapa hyödyntää tämä energia on ajaa lämpöpumppuja tai sähkökattilaa matalalla kustannuksella, varastoiden sillä tuotettu lämpöenergia lyhyt- tai pitkäaikaiseen varastoon ja hyödyntämällä se myöhempanä aikana.

Sähkön markkinahinta on pitkään ollut matala Suomessa ja muissa Pohjoismaissa. Se lisää lämpöpumpun ja sähkökattilan kannattavuutta lämmöntuotannossa, sillä niiden muuttuvat kustannukset pysyvät matalana sähkön hinnan ollessa matala. Matalan sähkön hinnan ja korkean lämpökuorman aikana CHP-tuotantoa voidaan korvata lämpöpumpulla ja sähkökattilalla, koska CHP-tuotannon muuttuvat kustannukset ylittävät sähkön markkinahinnan, jolloin on kannattavampaa ostaa sähköä markkinoilta kuin tuottaa sitä. Aiemmassa luvussa esitetyn CHP-tuotannon matalien kuormien huonon hyötysuhteen takia lämmöntuotantoa ei kuitenkaan kannata liikaa korvata muilla komponenteilla.

Tulevaisuudessa uusiutuvan energian käyttö sähköntuotannossa lisääntyy. Sähköverkossa tuotannon ja kulutuksen tulee olla tasapainossa jatkuvasti. Sähköverkon tasapainosta kertoo sähköverkon taajuus, joka tasapainotilassa on 50 Hz. Normaaliolanteessa sähköverkon taajuus saa vaihdella 49,9 ja 50,1 Hz välillä. Sähkömarkkinaosapuolet pyrkivät suunnittelemaan kulutuksen ja tuotannon etukäteen vastaamaan toisiaan mahdollisimman tarkasti, mutta tasepoikkeamia syntyy joka tapauksessa usein. Kansallisten kantaverkkoyhtiöiden tehtävänä järjestelmävastaavina on jatkuvasti ylläpitää sähköjärjestelmä toimintakykyisenä siten, että sen käyttövarmuus säilyy suunnitellulla ja sovitulla tasolla, tuotanto ja kulutus ovat yhtä suuret sekä häiriötilanteista toivutaan nopeasti. Tämä toteutetaan aktiivisella säätötarjouksilla Fingridin ylläpitämiä säätösähkömarkkinoilta ja varaamalla reservejä. Reserveillä tarkoitetaan voimalaitoksia ja kulutuskohteita, jotka tarpeen mukaan joko nostavat tai laskevat tehoaan. (Fingrid, 2019a)

Pohjoismaiset kantaverkkoyhtiöt ovat siirtymässä yhteiseen varttitaseeseen vuoden 2022 loppuun mennessä (Fingrid, 2019b). Lyhyemmän tasejakson tavoitteena on, että uusiutuvan energian lisääntyessä voidaan tuotanto ja kulutus tasapainottaa helpommin jokaisella taseselvitysjaksolla, ja toisaalta, että jokaisella taseselvitysjaksolla olisi mahdollisimman totuudenmukainen sähkön hinta. Lyhyempi taseselvitysjakso vaatii suurempaa sähkömarkkinoiden kulutusjoustoa. Kulutusjoustolla tarkoitetaan sähkönkulutuksen hetkellistä vähentämistä tai kasvattamista tuotantotilanteen mukaan. Suurempi määrä tasapainottavia komponentteja lämpöjärjestelmässä helpottaa kulutusjouston toteuttamista. Samalla optimoinnin tärkeys kuitenkin korostuu.

2.3 Komponenttien käyttöä rajoittavat tekijät

Mallia käytettäessä on otettava huomioon prosessin todelliset rajoitukset parhaalla mahdollisella tavalla. Huomioitavia rajoituksia tässä tutkimuksessa ovat lämmöntuotannon rajoitukset sekä jokaisen komponentin omat rajoitukset. Rajoitukset on asetettava kuitenkin siten, että optimointiongelma pysyy ratkaistavissa. Malliin saattaa helposti syntyä tilanteita, jossa malli ei ole ratkaistavissa, jos rajoitukset ovat liian tiukat.

2.3.1 Komponenttien käytännön rajoitukset

Suurin komponenttien käytännön rajoittava tekijä on CHP-tuotannon minimikuorman takaaminen. CHP-tuotannon ylläpitämiseksi on alueelle taattava tarpeeksi suuri lämpökuorma, jotta CHP-laitoksen minimikuormarajoite täyttyy. Toisin sanoen kaukolämpöakun ja palvelinkeskuksen hukkalämmön tuoma lisälämpö ei saa olla niin suuri, että CHP-laitoksen minimikuorma alittuu. Tällöin osa lämmöstä täytyisi tehdä kalliilla apukattilalla ja CHP-laitoksen tuottaman sähkön myynti me-

netettäisiin. Vastaavasti kaukolämpötehoa ei kannata kasvattaa yli CHP-laitoksen maksimilämpötehon esimerkiksi hukkalämmöllä, koska silloinkin osa lämmöstä täytyisi tehdä kalliilla apukattiloilla.

CHP-tuotannon prosessirajoituksiin kuuluu myös turbiinin rajoitukset. Eri paineista prosessihöyryä tuotettaessa höyry otetaan turbiinin välitoista, jolloin myydyin höyryn lisäksi tuotetusta sähköstä saadaan korvaus. Turbiinin rakennusaste saattaa kuitenkin olla sellainen, että välitosta ei saada otettua tarpeeksi korkeapaineista höyryä prosessitarpeisiin, jolloin tarvittava höyry on otettava reduktioventtiiliin kautta. Tämänkaltaiseen tilanteeseen saatetaan päätyä CHP-laitoksissa, joiden lämpöä käyttävä asiakas on muuttunut, jolloin prosessihöyryn painetasot saattavat muuttua. Turbiinille on määritettävä toiminta-alue, jonka sisällä se voi operoida. Tällöin malli ei aja höyryä turbiinin läpi tilanteissa, joissa se ei olisi mahdollista todellisuudessa.

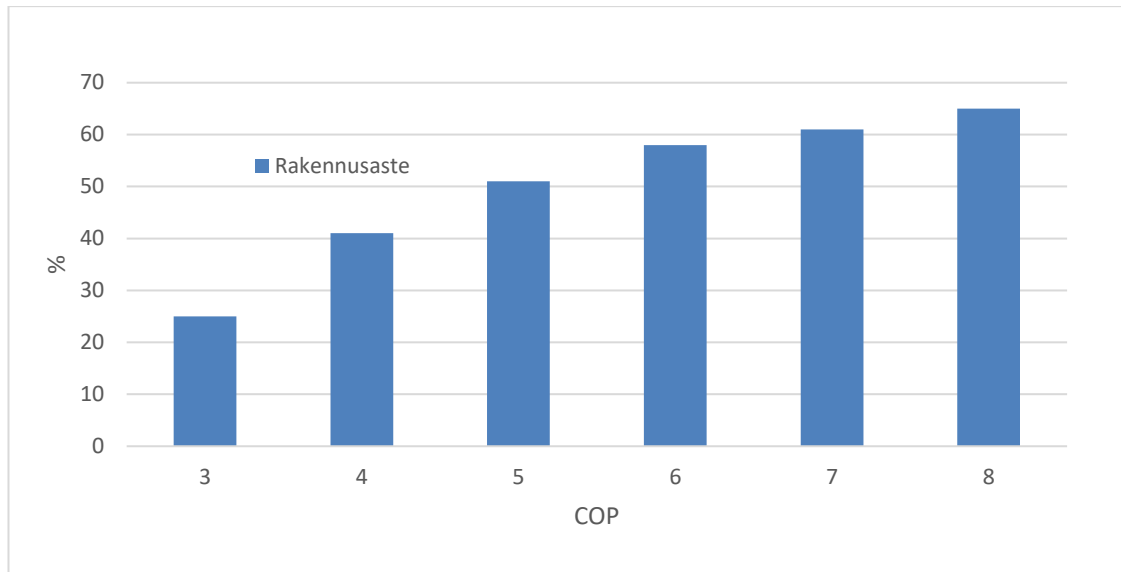
Kaukolämpöakun pumppujen minimiteho on otettava huomioon mallissa. Kaukolämpöakun pumpun imupuolella olevassa imukanavassa esiintyy virtauksen takia kitka- ja kertavastushäviöitä, jotka aiheuttavat sen, että kanavistossa vallitseva paine voi laskea alhaisemmaksi kuin nestesäiliön ilmatilassa vallitseva paine. Tällöin imukanavistoon syntyy alipaine, joka aiheuttaa nesteseen liunneen ilman erottumisen kupliksi. Jos paine laskee edelleen, alitetaan tiettyssä vaiheessa nesteen höyrytymispaine, jolloin neste alkaa kiehua ja muodostuu kaasu- ja höyrykuplia eli neste kavitoi. Kun nesteeseen vielä kohdistuu pumpun syrjäytyselimen voima, nesteen paine nousee, jolloin höyrykuplien koko pienenee ja lopulta ne luhistuvat kokoon erittäin nopeasti. Tällöin syntyy hyvin suuria paineiskuja, jotka metallipintojen läheisyydessä aiheuttavat pumpun osien voimakasta kulumista, pumpun hyötysuhteen laskun sekä voimakasta melua. Kavitaation välttämiseksi kaukolämpöakun pumpun imukanava tulisi mitoittaa siten, ettei paine kanavassa laske liian alhaiseksi. (Kauranne et al., 2013)

Kavitoinnin estämiseksi kaukolämpöakkuun virtaavalle vedelle on käytännössä asetettava jokin minimivirtaus, joka määrittää kaukolämpöakun pumpun minimitehon. Kyseinen minimiteho rajoittaa kaukolämpöakun minimitehon samalle tasolle. Ongelma voitaisiin kiertää asettamalla useampia pumppuja rinnan, jolloin käyttöteho saadaan lähelle nolaa, mutta se ei usein ole kovin kannattavaa lisäinvestoinnin takia. Kirjallisuuden mukaan kaukolämpöakun lataamista ja purkamista kontrolloidaan yleensä yhdellä tai kahdella pumpulla (Phetteplace, 2013).

Suurten lämpöpumppujen käyttöön liittyy rajoituksia ja joitain mahdollisia riskejä. Tärkein edellytys lämpöpumppuinvestoinnille on lämmönlähteen läheisyys ja hukkalämmön alhainen hinta. Tärkein tekninen rajoite lämpöpumpun käytölle on sähköverkon riittävyys, sillä lämpöpumppu ottaa käynnistyessään jopa 7-kertaisen sähkötehon normaaliin käyttötilanteeseen verrattuna (Valor Partners, 2016, s. 25). Lämpöpumpun on sijaittava vahvassa pisteessä sähköverkkoa.

Suuret lämpöpumput vaativat paljon tilaa, mikä varsinkin kaupunkien kaukolämpöverkkoon integroitaessa voi muodostaa ongelman. Esimerkiksi Helsingissä ja Turussa lämpöpumppulaitokset on sijoitettu maan alle tilanpuutteen tai kalliin maa-alan vuoksi. Louhitusta murskeesta on tosin viime vuosina saanut hyvän hinnan, mikä helpottaa investointipäätöstä. Teollisuusalueelle sijoitettavalle lämpöpumppulaitokselle tilaongelmia tuskin syntyy. (Valor Partners, 2016, s. 25)

Suurten lämpöpumppulaitosten alkuinvestointi on lämpökattiloihin verrattuna melko suuri (Valor Partners, 2016, s. 25). Jos olemassa oleva tuotantorakenne on sen kaltainen, että voimalaitosta ajetaan aina peruskuormalla ja huippukuormaa ei juuri ikinä saavuteta, ei suurelle lämpöpumpulle jää vuoden aikana riittävästi ajotunteja, jotta alkuinvestointi saataisiin katettua. Järjestelmätasolla investoinnilla ei tällöin myöskään synny merkittäviä hyötyjä. CHP-laitoksen yhteyteen rakennetulla lämpöpumpulla voidaan kuitenkin säästää polttoainetta laitoksen rakennusasteesta riippuen. Kuvassa 8 on esitetty CHP-laitoksen raja-arvo, jonka ylittävä rakennusaste johtaa alempaan polttoaineiden käyttöön kuin lämpöpumppuja käytettäessä (Raiko & Mäki-Mantila, 2005).



Kuva 8: CHP-tuotannon rakennusaste lämpöpumpun COP -arvon funktiona

Lämpöpumpuinvestoinnin perustaminen pelkän teollisuuden hukkalämmön saatavuuteen voi olla hyvin riskialtista. Teollisuustoimija voi varsin lyhyellä varoitusaajalla sulkea laitoksensa tai prosessinsa, josta ylijäämälämpö saadaan. Hukkalämmön hinnasta tulee olla selkeä käsitys osapuolten kesken, jotta lämpöpumpuinvestointi voidaan tehdä. Sähkön hintakehitys on myös epävarmaa. Markkinainstrumentit ennustavat sähkön hinnan pysyvän keskimäärin alhaisena lähitulevaisuudessa, mutta se ei tarkoita, etteikö sähkön hinta voisi nousta voimakkaasti. Liian korkea sähkön hinta saattaa helposti tehdä lämpöpumpuista kannattamattomia.

2.3.2 Lämmöntuotannon prosessirajoitukset

CHP-laitoksen energiantuotanto perustuu ennusteisiin, joissa voi esiintyä suuriakin virheitä. Tällöin saattaa syntyä tilanne, jossa lämpöä tuotetaan joko liian paljon tai liian vähän ennusteeseen nähden. Tilanne korostuu, kun CHP-tuotannon lisäksi mallissa on kaukolämpöakku sekä palvelinkeskuksen hukkalämpöä. Tilanteissa, joissa lämpöteho ylittää tai alittaa CHP-laitoksen tuotantorajoitteen, on joko kaukolämpöakun ja lämpöpumpun ajosuunnitelmaa muutettava tai palauttaa tuotanto CHP-laitoksen toiminta-alueelle pakkolauhteen, apujäähdytyksen tai apukattilan avulla. Kaikki nämä keinot kuitenkin lisäävät kustannuksia, ja on huomioitava mallissa.

Apujäähdytyksen- ja kattiloiden rajoitukset, kuten minimiteho tai minimi päällä oloajan rajoitukset tulee ottaa huomioon tilanteissa, joissa lämpökuormat ovat hyvin korkeat tai matalat. Tällöin voidaan komponenttien tehokkaasta käytöstä huolimatta joutua tilanteeseen, jossa apujäähdytystä ja -kattiloita joudutaan hyödyntämään.

Lämpöpumpuista saadaan yleensä otettua ulos maksimissaan 85-90 asteista vettä ilman monivaiheisia kytkentöjä ja lämpökertoimen huononemista (Valor Partners, 2016, s. 25). Talvella kaukolämmön menoveden lämpötila saattaa kuitenkin olla jopa 110-115 °C asteista, jolloin lämpöpumppujen tuottama lämpö ei yksin riitä. Lämpöpumpuista saatava vesi voidaan priimata, mutta se on erittäin kallista, ellei sitä pystytä tekemään lämpöpumppulaitoksen yhteydessä toimivalla lämpökattilalla. Lämpökattilan käyttäminen on kuitenkin ei-toivottavaa, jos tavoitteena on minimoida polttoaineiden käyttöä järjestelmätasolla.

Lämpöiseen aikaan lämpöpumpusta ulos saatavan veden lämpötila ei muodostu ongelmaksi, sillä kaukolämmön menovesi pidetään alhaisempina lämpöhäviöiden minimoimiseksi. Kaukolämpöverkon menoveden lämpötilaa voidaan alentaa myös talviaikaan, mutta se vaatisi vesivirtojen kasvattamista korkeammaksi kuin verkko tai asiakaslaitteet ovat mitoitettu. Tällöin verkko voisi syntyä pullonkauloja ja häiriöitä lämmön toimituksissa. Lämpötilarajoitukset on siis otettava tarkasti huomioon.

3. TUTKIMUSMENETELMÄT

Tässä luvussa määritellään alueen lämmönkäytön optimoinnissa käytettävät menetelmät. Luvussa käydään läpi, miksi kyseisiin menetelmiin päädyttiin, ja kuinka niitä sovelletaan tutkimuskohteisiin ja -ongelmiin. Luvussa 3.1 esitetään optimointimallin muodostamiseen käytettävä ohjelma ja kuinka eri komponentit mallinnetaan ohjelmaan. Tämän jälkeen esitetään optimointimallissa tehtävät oletukset ja käytettävät yhtälöt. Lopuksi käydään läpi mallin ratkaisemiseen käytetty menetelmä.

3.1 Optimointimallin muodostaminen

Optimoinnissa käytetään N-side Enertop optimointiohjelmaa. N-side on kaupallinen optimointipalvelu, jonka avulla voidaan optimoida esimerkiksi toimitusketjua, työprosessia tai energiaprosessia. Ohjelmaa käytetään varsinkin sähkön spot-hintaennusteiden sekä teräs-, paperi- ja selluteollisuuden optimoinnissa. Aiemmat optimoinnit ovat perustuneet lähinnä sähkön kustannusten alentamiseen, mutta tässä työssä pyritään alentamaan lämmöntuotannon kustannuksia. Optimointiohjelma pyrkii optimoimaan rakennetun prosessin asetettujen ulostulojen perusteella. Jos esimerkiksi prosessihöyrylle annetaan vaatimus, pyrkii optimointimalli tuottamaan höyryn mahdollisimman tehokkaasti rajoitukset huomioiden.

Optimointimallin tekeminen aloitetaan muodostamalla malli nykyisestä tilasta. Malli konfiguroidaan siten, että sen antama data vastaa oikeaa prosessia. Kun malli on verifioitu, voidaan aloittaa eri skenaarioiden rakentaminen. Mallissa on nykyisellään mukana biomassalla käyvä CHP-laitos, öljyllä toimiva höyryä tuottava varakattila ja eri lämmönkäyttäjät. Pohjamallista luodaan vaihtoehtoskenaario, jolloin prosessiin tuodaan mukaan sähkökattila, lämpöpumppu, palvelinkeskus ja kaukolämpöakku. Skenaariot ovat listattuna taulukossa 2.

Taulukko 2: Skenaariot

Skenaario	Komponentit
1	Alkutilanne
2	Sähkökattila, hukkalämpö, lämpöpumppu, KL-akku

Mallin rakentaminen aloitetaan määrittämällä ohjelman solut. Luvussa 1 on esitetty ohjelmassa käytettyjen solujen merkitykset. Solut määritetään niiden tyyppin mukaisesti joko jatkuvana prosessina, varastona, taseena, (markkina)lähteenä tai (markkina)nieluna. Jokainen luotu solu siirtyy prosessikaaviolla symbolina, jotka voidaan myöhemmässä vaiheessa liittää toisiinsa. Jokaiselle solulle voidaan määrittää käyttötila, päätuote, sivutuote, muutosresepti sekä pää- ja apupolttaineet. Käyttötiloja soluille on määritetty kolme: päällä, pois sekä tyhjäkäynti. Jokaiselle solulle voidaan näiden perusteella määrittää mahdolliset käyttötilat, sekä oletustila, mihin solu siirtyy oletuksena.

Muutosreseptejä määritettäessä on ensin määritettävä jokaiselle solulle tuote. Jokainen tuote voidaan kategorisoida joko sähköksi tai kategoriaan ”muut”. Tuotteelle voidaan määrittää myös yksikkö sekä hinta. Kun tuotteet on määritetty, voidaan muutosreseptit rakentaa. Muutosreseptit määrittävät mahdollisen muutoksen joko yhdestä tai useammasta sisäänmenotuotteesta yhteen ulostulotuotteeseen. Muutosreseptejä voi ajatella energiakonversioyhtälöinä. Muutosreseptit liitetään soluihin, jotta ohjelma tietää, mikä energia tai tuote siinä virtaa. Jos solu kuluttaa tai tuottaa useampaa asiaa, voidaan sille määrittää sivutuote tai toissijainen sisäänmeno.

Jokaiselle muutosreseptille ja tuotteelle voidaan määrittää rajat ja hyötysuhteet, minkä sisällä ne voivat operoida. Esimerkiksi kattilan käyttämä polttoainejakauma voidaan näin määrittää tarkasti. Optimointimallin rakenne on esitetty kuvassa 9. Mallissa lämpöä tuottavia komponentteja ovat biomassaa ja turvetta polttava CHP-laitos, öljyä polttava apukattila sekä palvelinkeskuksen hukkalämpöä hyödyntävä lämpöpumppu. Malliin syötetään tunneittain muuttuvat tiedot ohjelmaan

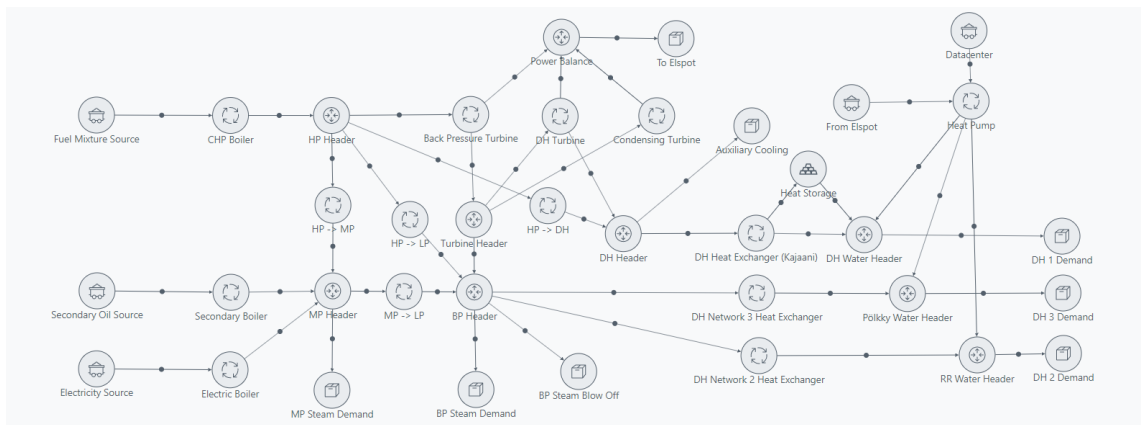
ladattavan Excel-tiedoston kautta. Näitä tietoja ovat sähkön hinta, lämpökuorma sekä polttoaineiden hinnat. Nämä ladatut tiedot ohjaavat mallin toimintaa siten, että malli pyrkii aina tuottamaan jokaiselle lämmönkäyttäjälle tarvittavan määrän lämpöä ottaen huomioon sähkön sekä polttoaineiden hinnat. Mallin tavoitteena on minimoida sähkön- ja lämmöntuotannon kustannuksia. Tavoitefunktioon palataan tarkemmin luvussa 3.1.7.

CHP-laitoksessa tuotettu tuorehöyry siirtyy mallissa höyrytukkien kautta joko suoraan lämmönkäyttäjälle reduktion kautta, tai turbiinille. Tuorehöyryn painetta voidaan reduktion kautta alentaa kolmeen eri painetasoon, joita mallissa kuvataan keskipaine-, matalapaine- ja kaukolämpöhöyryinä. Oletuksena malli syöttää kaiken höyryn turbiinille, mutta alueen teknisten rajoitteiden takia keskipainehöyry otetaan suoraan reduktion kautta. Turbiinin ja reduktion käyttäytymistä ohjataan sähkön hinnan sekä lämpökuormien perusteella. Turbiini on mallissa jaettu kolmeen osaan; vastapaine-, kaukolämpö- ja lauhdeturbiiniin. Vastapaine- ja kaukolämpöturbiini tuottavat sähkön lisäksi höyryä, lauhdeturbiini pelkkää sähköä. Lauhdeturbiini on mallinnettu siten, että käyttäjä itse päättää milloin se on toiminnassa.

Alueen kolme kaukolämpöpiiriä ovat mallissa kuvattuna nieluina, joihin tuotetaan kaukolämpöä lämmönsiirtimien kautta. Vastapainehöyryllä tuotetaan kaukolämpöä yritysalueen tarpeisiin, joita mallissa kuvataan asiakkaiden nieluina. Kajaanin kaupungin kaukolämpö tuotetaan kaukolämpöturbiinin kaukolämpöhöyrystä. Kajaanin kaupungin kaukolämpökuormaa kuvataan kaukolämpönieluna. Käyttäjien lämmönkäyttöä kuvataan mallissa nieluina, joille määritetään ennusteiden perusteella tuntitason lämpökuorma. Tässä tutkimuksessa lämpökuormat tosin perustuvat historia-tietoihin.

Skenaarioita testatessa mallissa on mukana sähkökattila, lämpöpumppu sekä kaukolämpöakku. Sähkökattilalla pyritään korvaamaan apukattilan käyttö kokonaan. Lämpöpumppu sekä kaukolämpöakku toimivat kaukolämpöpiirien yhteydessä. Kaukolämpöakku toimii pelkästään kaupungin kaukolämpöpiirissä, mutta lämpöpumppu tuottaa lämpöä kaikkiin kolmeen piiriin. Uusien komponenttien avulla testataan, kuinka alueen lämmöntuotanto paranee nykytilanteeseen verrattuna. Mallin antamia tuloksia verrataan historia-tietoihin, minkä perusteella lämpökuormatkin on määritetty.

Seuraavaksi esitellään tarkemmin, kuinka mallin pääkomponentit on mallinnettu ohjelmassa. Samalla esitetään kyseisen komponentin matemaattisen mallinnuksen perusta, ja miten kyseinen teoria siirtyy Enertop-ohjelman mallinnukseen.



Kuva 9: Mallin rakenne Enertop-alustalla

3.1.1 Optimointimallin muunnosprosessi

Tässä aliluvussa määritetään Enertop- optimointiohjelmassa käytetty jatkuva prosessi. Jatkuvalle prosessille voidaan mallintaa yhden tai useamman sisäänmenotuotteen muuntamista määrättyksi päätuotteeksi. Jatkuva prosessi voi myös kuluttaa käyttäjän määrittämää sekundaarisisäänmenoa, kuten sähköä, ja tuottaa jotain sivutuotetta. Jatkuvalle prosessille siis kuvataan kaikkea säh-

kön- ja lämmöntuotantoa, mitä mallissa tapahtuu. Samoin kaikki muunnosprosessit, missä esimerkiksi höyryn painetta alennetaan tai toteutetaan faasimuutos, on kuvattu jatkuvalla prosessilla. Jatkuvan prosessin päätuote määritetään kaavalla

$$P_{primary,out} = \beta + \varphi * P_{in} * (1 - \eta), \quad (3-1)$$

missä β on lineaarisen estimoinnin mukaan määritetty vakio, φ on lineaarisen estimoinnin mukaan määritetty kerroin, P_{in} on primääri sisäänmenotuote ja η on häviöt. Kiinteä tuotantomäärä ja yksikkömuunnos määritetään ainoastaan paloittain linearisoiduille komponenteille.

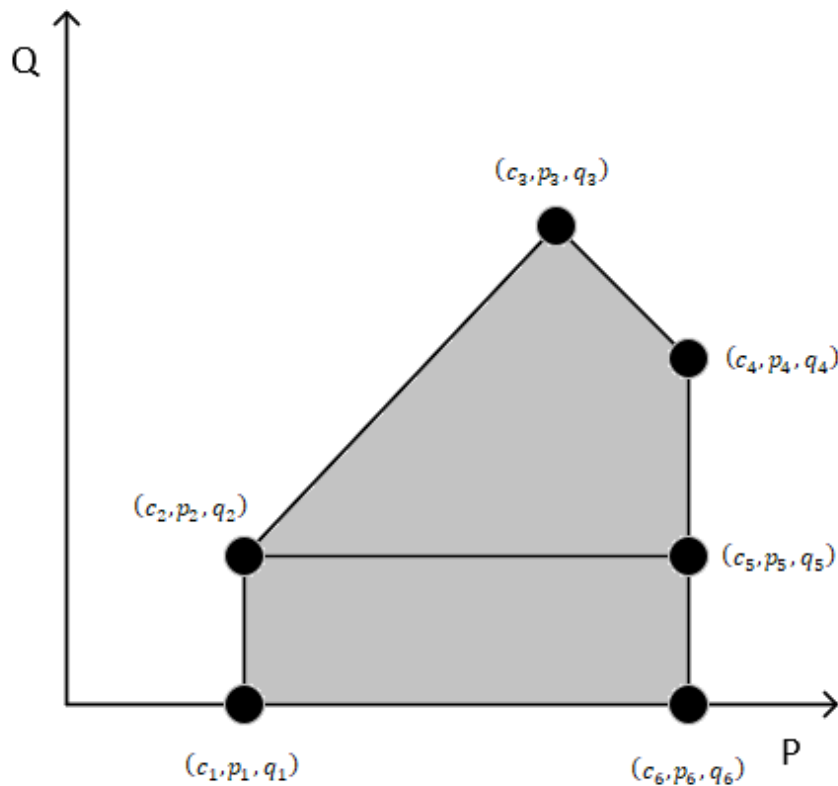
Jatkuvan muunnosprosessin sivutuotteet määritetään päätuotteen avulla kaavalla

$$P_{aux,out} = \beta + \varphi * P_{primary,out}. \quad (3-2)$$

Sivutuotteen määrittäminen tulee tarpeeseen esimerkiksi turbiinia määritettäessä. Seuraavaksi esitetään kaikki komponentit, jotka ovat mallinnettu jatkuvana prosessina. Samalla esitetään, kuinka kyseiset prosessit mallinnetaan ohjelmaan.

3.1.2 CHP-tuotannon mallintaminen optimointimallissa

CHP-tuotannossa sähkön ja lämmön tuotanto ovat vahvasti kytköksissä toisiinsa. Lisäksi sähkö ja lämpö tuotetaan eri hyötysuhteella ja kustannuksella CHP-laitoksen eri toimintapisteissä. CHP-laitoksella on korkein mahdollinen hyötysuhde operoitaessa täydellä teholla suunnitellulla rakennusasteella. Tämä toimintapiste on niin sanottu ominaispiste CHP-laitoksen toteutettavissa olevassa toiminta-alueessa. Kuva 10 havainnollistaa tyypillisen CHP-laitoksen toiminta-alueen, jossa jokainen ominaispiste voidaan kuvata sähkön (p), lämmön (q) sekä tuotantokustannuksen (c) avulla.



Kuva 10: CHP-laitoksen toiminta-alue ja toimintapisteet (Wang et al., 2015)

CHP-laitoksen toiminta-alue oletetaan olevan konvekksi sähkön, lämmön ja tuotantokustannuksen avulla ilmaistuna. Toiminta-alueen konveksisuus tarkoittaa sitä, että jos CHP-laitos pystyy operoimaan kahdessa pisteessä kuvan 10 toiminta-alueella, pystyy se operoimaan missä tahansa pisteessä niiden välillä. Tämän oletuksen perusteella voidaan sähkön ja lämmön tuotannon, sekä tuntitason tuotantokustannusten välinen yhteys kuvata CHP-tuotannon toiminta-alueen reunapisteiden konveksikombinaationa (q_j, p_j, c_j) .

$$C = \sum_{j \in J} c_j x_j,$$

$$P = \sum_{j \in J} p_j x_j,$$

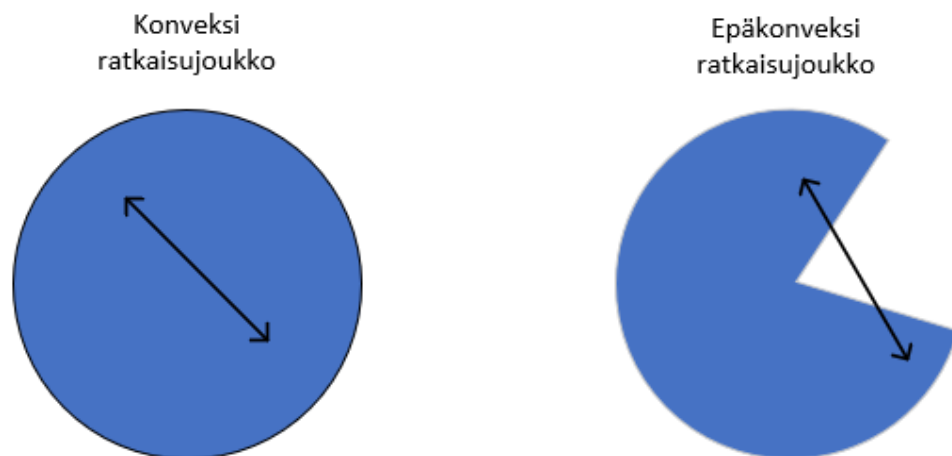
$$Q = \sum_{j \in J} q_j x_j, \tag{3-3}$$

$$\sum_{j \in J} x_j = 1,$$

$$x_j \geq 0, j \in J.$$

Yhtälöissä (3-3) C on CHP-tuotannon tuotantokustannus, joka voi koostua polttoainehinnoista, vuosihuoltokustannuksista, veroista, päästöoikeuksien hinnoista ym.; P on nettosähköteho; Q on kaukolämpöteho; J on toimintapisteiden indeksi ja x_j on päätösmuuttuja, joka määrittää toiminta-alueen konveksikombinaation. Netto sähkö- ja lämpötehon käyttäminen tarkoittaa, että kaikki tehtaen omakäyttö on jätetty huomioimatta mallissa. Tuotantokustannukset koostuvat lähinnä polttoainekustannuksista, mutta niihin voi kuulua muitakin muuttuvia kustannuksia, kuten huoltokustannuksia. (Fang & Lahdelma, 2015)

Oletus konveksiuudesta voidaan olettaa pitävän paikkaansa suurimmalle osalle CHP-laitoksista, sillä useiden yksinkertaisten vastapainevoimalaitosten toiminta-alue on konvekksi. Monimutkaisemmissa CHP-tuotantoteknologioissa, kuten kombivoimalaitoksissa, voi toiminta-alueesta tulla epäkonvekksi. Kuten aiemmin todettiin, konveksissa joukossa ratkaisu voi löytyä mistä tahansa pisteestä reunapisteiden välillä. Epäkonveksissa ratkaisujoukossa sen sijaan voi olla pisteitä, jotka eivät täytä ratkaisujoukon kriteereitä. Kuvassa 11 on havainnollistettu konveksin ja epäkonveksin ratkaisujoukon ero.



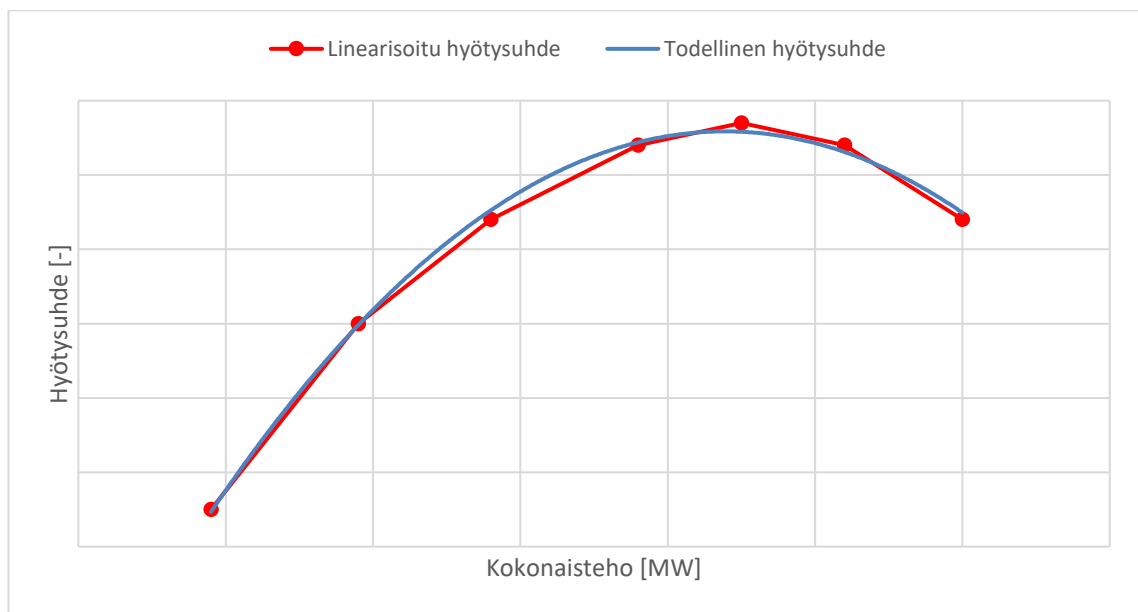
Kuva 11: Konveksin ja epäkonveksin ratkaisujoukon ero

CHP-laitokselle määritetään mallissa minimi- ja maksimiteho, sekä kiinteä hyötysuhde. CHP-laitoksen päätuote on siis tuorehöyry, jonka teho lasketaan kaavalla (3-1). CHP-laitokselle annetaan mallissa yksi polttoainelähde, joka kuvastaa käytettyjen polttoaineiden sekoitusta. Polttoaine-

sekoitukselle on ladatussa Excel-tiedostossa annettu keskihinta, jonka mukaan malli laskee tuotantokustannuksen CHP-laitokselle. Mallille voisi määrittää jokaisen polttoaineen erikseen, mutta mallin toiminnan kannalta sillä ei ole merkitystä käytetäänkö keskihintaa.

Tämän tutkimuksen CHP-laitos mallinnetaan siis hyvin yksinkertaisesti. CHP-laitoksella annetaan ainoastaan minimi- ja maksimitehot tuorehöyrylle, sekä hinta polttoaineelle. Toisin sanoen polttoainekustannuksilla on kiinteät arvot, jotka eivät vaihtelee tehon muutosten suhteen. Sähkön ja lämmön määrä vaihtelee lineaarisesti kattilatehon mukaan. Tämä tarkoittaa, että CHP-tuotannon rakennusaste on vakio. Todellinen CHP-laitos Kajaanissa on paljon monimutkaisempi ja pystyy operoimaan joustavammin tuotannossa.

Todellisuudessa CHP-laitoksen karakteristika on epälineaarinen rakennusasteen ja hyötysuhteen epälineaarisuuden takia. Epälineaarinen karakteristika tarkoittaa, että CHP-laitoksen malli on epäkonvekksi. Epälineaarista ja epäkonvekksia mallia voidaan mallintaa jakamalla CHP-laitoksen toiminta-alue pienempiin osiin, ja olettamalla osien käyttäytyminen lineaarisiksi. CHP-laitoksen hyötysuhteen linearisointi on esitetty kuvassa 12.



Kuva 12: CHP-laitoksen todellinen ja linearisoitu hyötysuhde

Kuvan 12 linearisoinnilla voidaan malli ratkaista käyttämällä lineaarista optimointia (LP), lineaarista sekalukuoptimointia (MILP) tai jotain muuta ratkaisualgoritmia (Rong et al., 2009). Konvekseja toiminta-alueita voidaan kuvata LP-mallin keinoin, mutta monimutkaisempia epäkonvekseja CHP toiminta-alueita on kuvattava MILP-mallin keinoin. MILP-ongelmassa minimoitava kohdefunktio ja käypien ratkaisujen joukkoa rajaavat rajoitusehdot voidaan esittää lineaarisina funktioina päätösmuuttujista x , joista osa määrittellään kokonaislukurajoitteisiksi. MILP-ongelman yleinen malli voidaan esittää muodossa kaavalla (3-4)

$$\min/\max (cx + dy)$$

$$s. t. Ax + By \leq b$$

$$x \geq 0$$

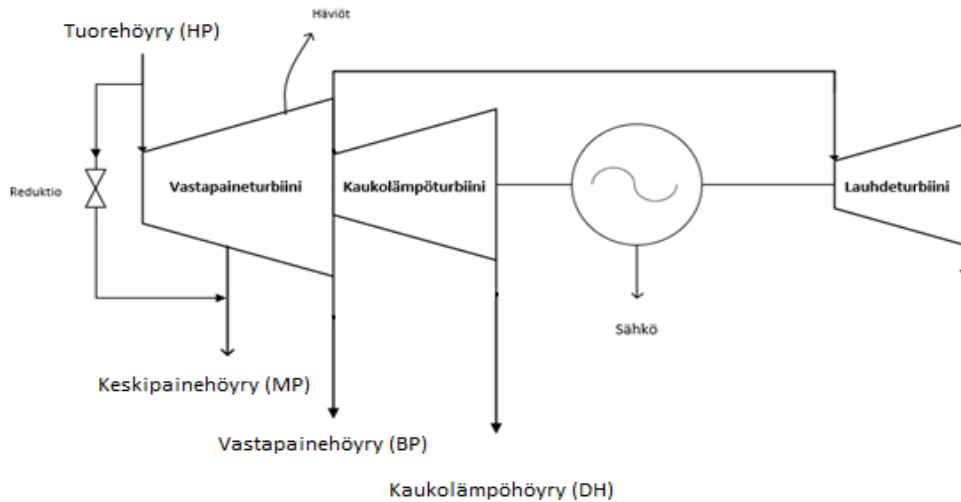
$$y_i \in \{0,1\},$$

(3-4)

jossa ensimmäinen rivi on tavoitefunktio, toinen rivi on rajoiteyhtälö, x on muuttuja ja y_i on binäärimuuttuja. (Lahdelma, 2017)

3.1.3 Turbiinin mallintaminen optimointimallissa

Kuten aiemmin todettiin, turbiini koostuu kolmesta osasta: vastapaine-, kaukolämpö- sekä lauhdeturbiiniosasta. Lauhdeturbiini tai lauhdeperä on normaalisti mekaanisesti kytketty pois päältä, mutta voidaan halutessa kytkeä turbiinin akselille kiinni. Tämä tosin vaatii turbiinin alasajoa, jotta työ voidaan suorittaa. Vastapaineturbiinin jälkeisestä höyrystä otetaan prosessihöyryä sekä vastapainehöyry, joka jatkaa kaukolämpöturbiinille ja lauhdeperälle. Kaukolämpöturbiinissa höyry lauhtuu $0,15 \text{ MPa}$:n höyryksi, josta otetaan lämpö Kajaanin kaupungin kaukolämpöverkkoon. Turbiini mallinnetaan kolmessa osassa kuvan 13 mukaisesti.

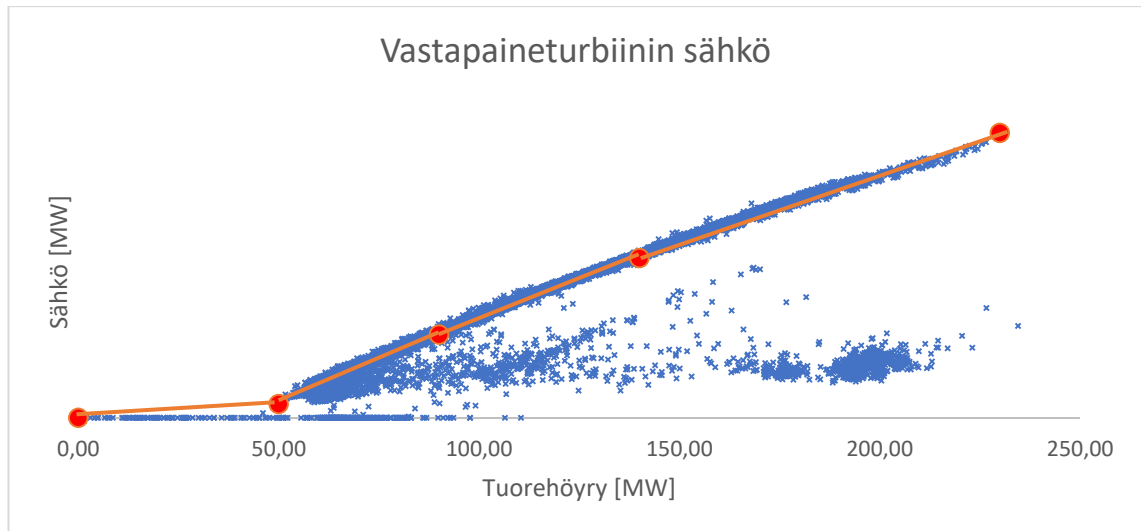


Kuva 13: Havainnekuva turbiinin vyöhykkeistä mallinnusta varten

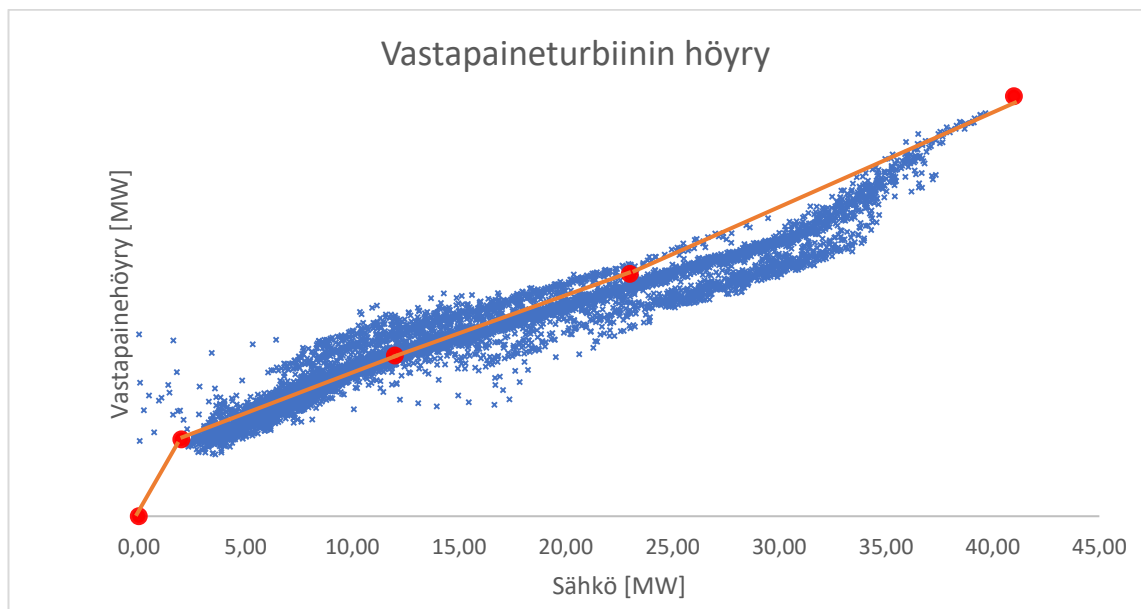
Syy, miksi turbiini jaetaan kolmeen osaan, johtuu siitä, että turbiinilla on monta höyryn väliottoa, joiden tuottama höyryteho, ja sitä vastaava sähköteho pitää määrittää tarkasti. Tällä tavalla jokaisen turbiinin vyöhykkeen tuottama sähkö- ja höyryteho saadaan tarkasti määritettyä mallissa. Varsinkin tuotetun prosessihöyryn määrän määrittäminen tarkasti on tärkeää, jotta malli toimisi oikein, eikä esimerkiksi tuottaisi kaukolämpöhöyryä enemmän kuin on mahdollista. Turbiinin mallintaminen yhtenä kokonaisuutena olisi epätarkkaa ja hankalaa käytetyllä ohjelmalla.

CHP-laitoksen turbiini mallinnetaan ohjelmaan historiatietoon perustuvalla regressiotarkastelulla. Turbiinilla on ohjelmassa kaksi tuotetta: sähkö ja lämpö. Ohjelmassa sähkö asetetaan päätuotteeksi, sillä ohjelma on kehitetty sähkön optimointia varten. Todellisuudessa lämpö on päätuote ja sähkö sivutuote. Turbiinin historiatietoja analysoimalla jokaiselle turbiinin osalle muodostetaan käyrästöt, jotka ilmaisevat tuotetun sähkön määrän turbiiniin syötetyn höyryn funktiona sekä jäljelle jääneen höyryn määrän turbiinissa tuotetun sähkön funktiona. Käyrästöjen avulla jokaisen turbiinin osan tuottama sähkö- ja höyryteho saadaan tarkasti määritettyä. Häviöt kuvataan mallissa epäsuorasti sisällyttämällä ne käyrästöjen toiminta-alueeseen, joten hyötysuhteita turbiineille ei erikseen anneta.

Turbiinin historiatiedoista jokaiselle turbiinin osalle määritetään höyryn tulo- ja lähtöarvojen, sekä entalpioiden avulla kertoimet, joilla määritetään tuotetun sähkön määrä syötetyn höyryn suhteen. Tuotettu sähkö lasketaan tuntikohtaisesti vuoden 2018 tiedoista, josta saadaan muodostettua suuri pistejoukko. Pistejoukolle tehdään sovite, joka määrittää turbiinin toiminta-alueen. Sovitteesta saadaan määritettyä kertoimet, joiden avulla turbiinin tuottama sähkö- ja höyryteho lasketaan kaavojen (3-1) ja (3-2) avulla. Vastapaineturbiinille saadaan historiadatan perusteella muodostettua seuraavat käyrästöt sähkölle ja höyrylle.

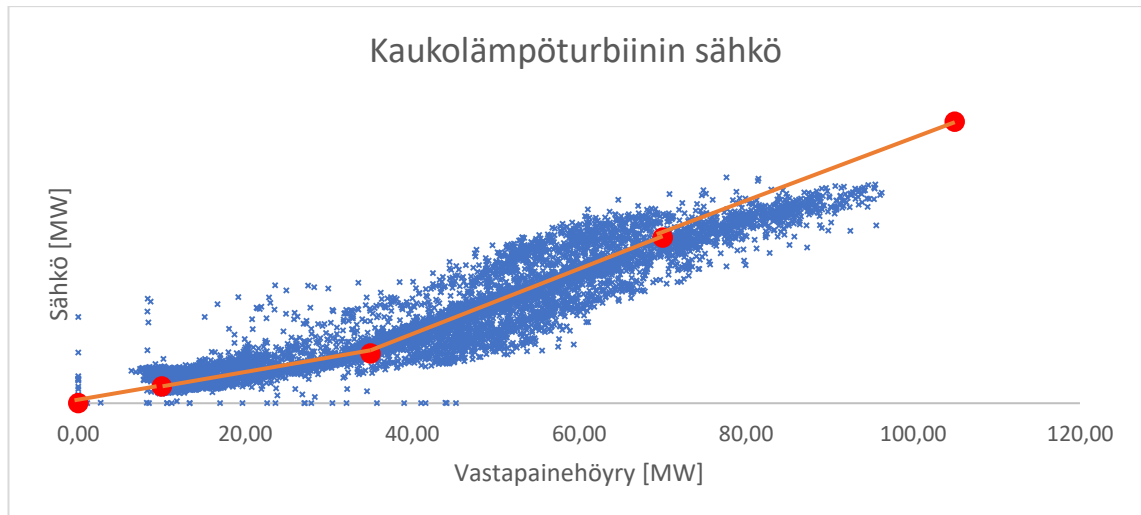


Kuva 14: Vastapaineturbiinin sähköteho tuorehöyrytehon funktiona

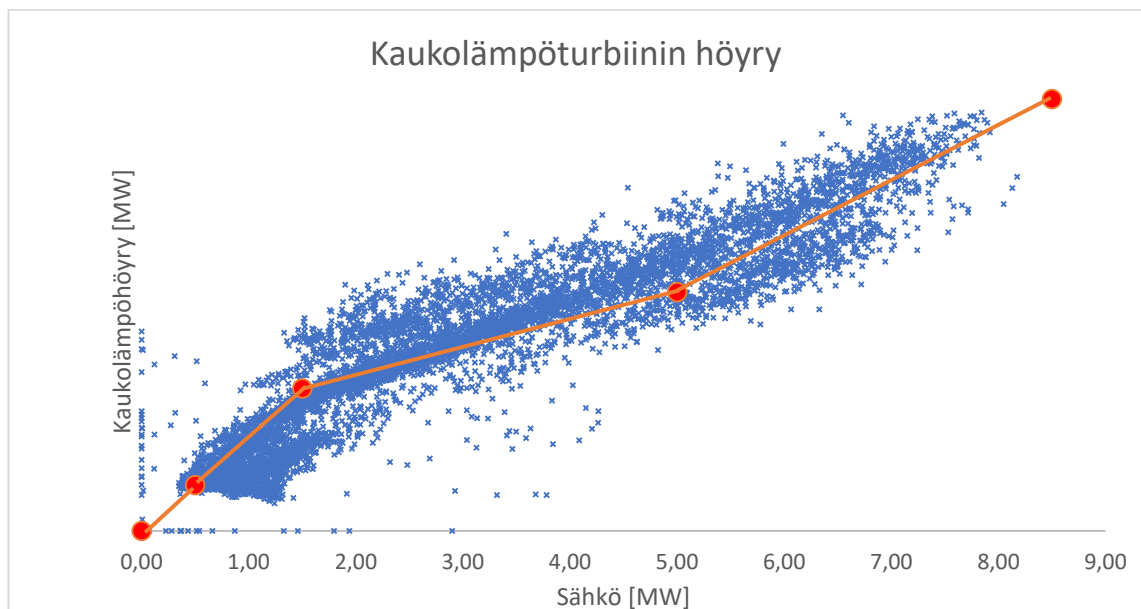


Kuva 15: Vastapaineturbiinin höyryteho sähkötehon funktiona

Sähkökäyrästä (kuva 14) siis kertoo, kuinka paljon vastapaineturbiini tuottaa sähköä suhteessa turbiiniin syötettyyn höyryyn. Samalla tavalla höyrykäyrästä (kuva 15) kertoo kuinka paljon sivutuotetta, eli höyryä, turbiinin jälkeen jää tuotetun sähkön suhteen. Kaukolämpöturbiinin vastaavat käyrästä on esitetty kuvissa 16 ja 17.



Kuva 16: Kaukolämpöturbiinin sähköteho vastapainehöyrytehon funktiona



Kuva 17: Kaukolämpöturbiinin höyryteho sähkötehon funktiona

Turbiineille määritetään siis 5 mittapistettä, jotka mahdollisimman hyvin mukailevat historiatietoon perustuvaa pistejoukkoa. Jokainen kahden pisteen välinen viiva määrittää ohjelmaan yhden reseptin, eli turbiineille luodaan ohjelmassa neljä muutosreseptiä. Käyrästä muokattiin testaamisvaiheessa siten, että turbiini toimisi mahdollisimman laajalla tehoalueella. Näin vältetään ongelmilta optimointiongelman ratkaisemisessa.

Kuten aiemmin todettiin, tuotettu sähkö lasketaan ohjelmassa molemmille turbiineille erikseen kaavalla (3-1), ja tuotettu höyry kaavalla (3-2). Kaavojen (3-1) ja (3-2) kerroin φ ja vakio β määritetään Excelin LINEST-funktion avulla. Taulukossa 3 & 4 on esimerkkinä vastapaineturbiinin sähkö- ja höyrytehon määräytyminen ohjelmassa.

Taulukko 3: Päätuotteen määrittäminen Enertop- ohjelmaan

Resepti	Tuorehöyry, P_{in}	Sähkö, $P_{primary,out,min}$	Sähkö, $P_{primary,out,max}$	Kerroin, φ	Vakio, β
1	0 – 50	0	2	0,04	0
2	50 – 90	2	12	0,25	-10,5
3	90 – 140	12	23	0,22	-7,8
4	140 – 230	23	41	0,2	-5

Taulukko 4: Sivutuotteen määrittäminen EnerTOP- ohjelmaan

Resepti	Sähkö, $P_{primary,out}$	Vastapaine- höyry, $P_{aux,out,min}$	Vastapaine- höyry, $P_{aux,out,max}$	Kerroin, φ	Vakio, β
1	0 – 2	0	31	15,5	0
2	2 – 12	31	65	3,4	24,2
3	12 – 23	65	98	3	29
4	23 - 41	98	170	4	6

3.1.4 Muut ohjelman prosessit

Ohjelman muut solut kuvaavat paljon abstraktimpia asioita, kuten tasetta tai lämpökuormaa. Varastosolu on jatkuvan prosessin lisäksi ainoa, joka kuvaa jotain fyysistä komponenttia. Kaukolämpöakku mallinnetaan ohjelmaan varastosoluna. Varastolle voidaan määrittää kapasiteetti, minimi- ja maksimitasot sekä varastoidun hyödykkeen loppuhinta. Kapasiteetilla rajataan kaukolämmön maksimimäärä varastolle. Minim- ja maksimitasoilla voidaan määrittää kaukolämmön määrä prosentteina maksimikapasiteetista kaukolämpöakussa. Ladatulla Excel-tiedostolla voidaan määrittää kaukolämpöakun varaus optimoinnin aloitushetkellä. Loppuhinnalla määritetään hinta jokaista tehoyksikköä kohden optimoinnin päättyessä. Määrittämällä hinta korkeaksi, pyrkii optimointiohjelma pitämään kaukolämpöakun varauksen mahdollisimman korkeana optimoinnin päättyessä. Kaukolämpöakku on kytkettynä ainoastaan kaupungin kaukolämpöverkkoon, joten se ei osallistu yritysalueen lämmöntuotannon optimointiin.

Kaukolämpöverkko mallinnetaan ohjelmassa virtauksina, joiden väliin on asetettu lämmönsiirrin. Lämmönsiirrin aiheuttaa mallissa ainoastaan kiinteän tehohäviön, jolla mallinnetaan lämmönsiirrimen asteisuuksia. Kaukolämpöverkon lämmönkäyttäjät on mallinnettu yksittäisinä soluina, joille syötetään Excel-tiedostolla historiatietoon perustuvaa lämmönkäyttödataa. Solujen lämpökuorman perusteella malli pyrkii tuottamaan lämmön mahdollisimman kustannustehokkaasti.

Palvelinkeskus mallinnetaan mallissa markkinalähteenä, jolla on jokin tietty kiinteä markkinahinta hukkalämmölle. Palvelinkeskuksen yhteyteen on mallinnettu lämpöpumppu, joka kuluttaa sähköä nostaessaan hukkalämmön lämpötilaa. Tällä tavalla hukkalämmön hinta sidotaan sähkön markkinahintaan, sillä yhtä kulutettua sähköyksikköä kohti, lämpöpumppu tuottaa (COP:sta riippuen) 3-4 yksikköä lämpötehoa. Kustannukseksi tulee siis lämpöpumpun kuluttama sähkö, sekä hukkalämmön markkinahinta. Palvelinkeskuksen hukkalämmöllä lämmitetään pääasiassa alueen rakennuksia ja loput käytetään kaupungin kaukolämpöverkossa. Renforsin rannan osuus lämmöstä on rajoitettava mallissa.

3.1.5 Mallin oletukset

Malliin on tehtävä monia oletuksia lineaarisuuden säilyttämiseksi. Mallissa tehtävät oletukset ovat:

- CHP-laitoksen karakteristika oletetaan paloittain lineaariseksi.
- CHP-laitoksen hyötysuhteen vaikutusta tuloksiin ei oteta huomioon.
- CHP-laitoksen tehon muutosnopeuden oletetaan tapahtuvan viiveettömästi.
- Lämpö siirtyy häviöttömästi käyttäjälle.
- Kaukolämpöakun lataaminen ja purkaminen oletetaan tapahtuvan viiveettömästi.
- Kaukolämmön varastointi oletetaan häviöttömäksi.
- Sähkökattilan sähkön hinnassa ei oteta mahdollisia veroja huomioon.
- Sähkön siirtokustannuksia ei oteta huomioon.

Tässä tutkimuksessa käytetään yksinkertaistettua vastapainevoimalaitosta, jonka mallintaminen ohjelmaan on esitetty luvussa 3.1.2. Mallissa oletetaan, että CHP-tuotanto operoi vakio hyötysuhteella kuormasta riippumatta. Vakio hyötysuhteen oletus parantaa tuloksia huomattavasti ja on jatkotutkimuksessa otettava paremmin huomioon. Todellisuudessa hyötysuhde heikkenee huomattavasti matalilla kuormilla, kuten luvussa 2.2.1 esitettiin.

Ohjelmassa CHP-laitoksen tehon muutosnopeus oletetaan tapahtuvan viiveettömästi. Tehon muutosnopeus ilmaisee, kuinka nopeasti voimalaitoksen teho voi joko nousta tai laskea. Todellisuudessa CHP-laitoksella on jokin rajoite sille, kuinka nopeasti teho voi muuttua tuntitasolla.

Kaukolämpöakun operointi Enertop optimointialustalla oletetaan häviöttömäksi, sekä purkamisen ja lataamisen oletetaan tapahtuvan viiveettömästi. Kaukolämpöakun purkamisen ja lataamisen toteutetaan pumpuilla, jolloin purkamiseen ja lataamiseen syntyy väistämättäkin viive. Viivettä voisi simuloida lisäämällä eksponenttifunktio kaukolämpöakun soluun, mutta Enertop optimointialustalla se ei ole mahdollista. Kaukolämpöakun veden lämpötilaa ei voida optimointialustalle mallintaa, joten mallissa käytetään pelkästään tehoa.

Mallissa sähkökattilan käyttämälle sähkölle ei lasketa veroja mukaan, vaan se perustuu ainoastaan sähkön spot-hintaan vuodelta 2018. Verojen huomiotta jättäminen pienentää sähkökattilan operoinnin muuttuvia kustannuksia. CHP-laitoksessa tuotetun sähkön siirtokustannuksia ei sähköveron tapaan oteta huomioon mallissa. Sähköveron ja siirtokustannusten huomiotta jättäminen parantaa optimoinnin antamia tuloksia merkittävästi.

3.1.6 Mallin parametrit

Malli sisältää kiinteitä parametrejä ja muuttujia. Kiinteät parametrit ovat vakioarvoja, jotka on määritetty ohjelmaan. Muuttujat tuodaan malliin sisään Excel-tiedostossa, jossa jokaiselle muuttujalle on määritetty arvo jokaisella aikasarjan T hetkelle t. Indeksi t ilmaisee parametrin arvon vastaavalla hetkellä. Kiinteät parametrit ovat optimointimallin sisäänmenoarvoja, jotka kuvaavat systeemin sen hetkistä toimintapistettä tai -ympäristöä.

Taulukko 5: Optimointimallin parametrit

Parametri	Päätuotteiden parametrit:
Q_{CHP}^{max}	CHP-laitoksen maksimilämpöteho (MW)
Q_{CHP}^{min}	CHP-laitoksen minimilämpöteho (MW)
C_{CHP}^{start}	CHP-laitoksen käynnistyskustannus (e/MWh)
C_{CHP}^t	CHP-laitoksen tuotantokustannus toimintapisteessä $j \in J$ (e/MWh)
η_{CHP}	CHP-laitoksen hyötysuhde (-)
Q_{heat}^t	Lämmöntarve hetkellä t (MW)
Q_{HOB}^{max}	Varakattilan maksimilämpöteho (MW)
Q_{HOB}^{min}	Varakattilan minimilämpöteho (MW)
C_{HOB}^{start}	Varakattilan käynnistyskustannus (e/MWh)
C_{HOB}^t	Varakattilan tuotantokustannus (e/MWh)
η_{HOB}	Varakattilan hyötysuhde (-)
Q_{elec}^{max}	Sähkökattilan maksimilämpöteho (MW)
Q_{elec}^{min}	Sähkökattilan minimilämpöteho (MW)
η_{elec}	Sähkökattilan hyötysuhde (-)
$Q_{exchange1}^{min}$	Lämmönsiirrin 1 minimiteho
$Q_{exchange1}^{max}$	Lämmönsiirrin 1 maksimiteho
$Q_{exchange2}^{min}$	Lämmönsiirrin 2 minimiteho
$Q_{exchange2}^{max}$	Lämmönsiirrin 2 maksimiteho

$Q_{exchange3}^{min}$	Lämmönsiirrin 3 minimiteho
$Q_{exchange3}^{max}$	Lämmönsiirrin 3 maksimiteho
Q_{HP}^{max}	Lämpöpumpun maksimiteho (MW)
Q_{HP}^{min}	Lämpöpumpun minimiteho (MW)
$P_{BP,elec}^{min}$	Vastapaineturbiinin minimisähköteho (MWh)
$P_{BP,elec}^{max}$	Vastapaineturbiinin maksimisähköteho (MWh)
$P_{DH,elec}^{min}$	Kaukolämpöturbiinin minimisähköteho (MWh)
$P_{DH,elec}^{max}$	Kaukolämpöturbiinin maksimisähköteho (MWh)
$P_{cond,elec}^{min}$	Lauhdeturbiinin minimisähköteho (MWh)
$P_{cond,elec}^{max}$	Lauhdeturbiinin maksimisähköteho (MWh)
Q_{AUX}^{max}	Apujäähdytyksen maksimilämpöteho (MW)
c_{AUX}^t	Apujäähdytyksen käyttökustannus (e/MWh)
	Sivutuotteiden parametrit:
$Q_{BP,heat}^{min}$	Vastapaineturbiinin minimihöyryteho (MWh)
$Q_{BP,heat}^{max}$	Vastapaineturbiinin maksimihöyryteho (MWh)
$Q_{DH,heat}^{min}$	Kaukolämpöturbiinin minimihöyryteho (MWh)
$Q_{DH,heat}^{max}$	Kaukolämpöturbiinin maksimihöyryteho (MWh)
	Muut parametrit:
q_s^{min}	KL-akun minimikäyttöteho (MW)
q_s^{max}	KL-akun maksimikäyttöteho (MW)
S_q^t	KL-akun varaus hetkellä t (MWh)
S_q^{max}	KL-akun maksimivaraus (MWh)
S_q^{min}	KL-akun minimivaraus (MWh)
c_{spot}^t	Sähkön hankintahinta (Elspot) hetkellä t (e/MWh)
c_{waste}^t	Palvelinkeskuksen hukkalämmön hinta hetkellä t (e/MWh)
T	Aikaikkunan pituus (h)

Taulukko 6: Optimointimallin muuttujat

Muuttuja	
q_{HOB}^t	Apukattilan lämpöteho hetkellä t (MW)
q_{elec}^t	Sähkökattilan lämpöteho hetkellä t (MW)
q_{HP}^t	Lämpöpumpun lämpöteho hetkellä t (MW)
q_{AUX}^t	Apujäähdytysteho hetkellä t (MW)
q_{s+}^t	Kaukolämpöakun latausteho hetkellä t (MW)
q_{s-}^t	Kaukolämpöakun purkuteho hetkellä t (MW)
x_j^t	Määrittämuuttuja CHP-laitoksen toiminta-alueen muuttamiseksi konveksikombinaatioksi
p_j^t	CHP-laitoksen sähköteho hetkellä t toimintapisteessä $j \in J$ (MWh)
q_j^t	CHP-laitoksen lämpöteho hetkellä t toimintapisteessä $j \in J$ (MWh)
c_j^t	CHP-laitoksen polttoainehinta hetkellä t toimintapisteessä $j \in J$ (e/MWh)

3.1.7 Mallin tavoitefunktio

Optimoinnin tavoitteena on minimoida CHP-laitoksen käyttökustannuksia. Käyttökustannukset muodostuvat tuotannon muuttuvista kustannuksista sekä sähkön myynnin tuotoista. Koska optimointimalli tehdään kaupallisella optimiohjelmalla ja taustalla olevaan laskentaan ei tämän tutkimuksen aikana päästä käsiksi, perustuu seuraavat yhtälöt kirjallisuuteen. Optimoinnin tavoitteena on käyttökustannusten minimoiminen, jota voidaan kuvata yhtälöllä (3-5) (Fang & Lahdelma, 2015)

$$\min J \sum_{t=1}^T (C_{CHP}^t + C_{CHP}^{start} + q_{HOB}^t c_{HOB}^t + C_{HOB}^{start} + q_{elec}^t c_{elec}^t + q_{HP}^t c_{waste}^t + q_{AUX}^t c_{AUX}^t - P_{CHP}^t c_{spot}^t), \quad (3-5)$$

missä J on toteutunut käyttökustannus aikahorisontin T yli ja P_{CHP}^t on CHP-laitoksen nettosähköteho hetkellä t . Tavoitefunktio (3-5) minimoi CHP-laitoksen käyttökustannuksia vähentämällä tuotantokustannuksesta C_{CHP}^t markkinoille myydyin sähkötehon P_{CHP}^t määrän kerrottuna sähkön spot-hinnalla c_{spot}^t . Investointikustannukset ja muut kiinteät kustannukset on jätetty pois yhtälöistä, sillä ne eivät vaikuta CHP-laitoksen optimaaliseen operointiin (Fang & Lahdelma, 2015). Kaavassa (3-5) esiintyvät tuotantokustannus C_{CHP}^t ja nettosähköteho P_{CHP}^t muodostuvat kuvan 10 ääripisteiden konveksikombinaationa.

$$C_{CHP}^t = \sum_{j \in J} c_j^t x_j^t, \quad (3-6)$$

$$P_{CHP}^t = \sum_{j \in J} p_j^t x_j^t, \quad (3-7)$$

missä, c_j^t on tuotantokustannus ja p_j^t on laitoksen nettosähköteho CHP-karakteristikan pisteessä x_j^t . Tavoitefunktion C_{CHP}^{start} ja C_{HOB}^{start} ovat CHP-laitoksen ja apukattilan käynnistyskustannukset. Yhtälöllä (3-8) voidaan määrittää mallille lämpötase.

$$\sum_{j \in J} q_j^t x_j^t - q_{s+}^t + q_{s-}^t + q_{HOB}^t + q_{HP}^t + q_{elec}^t \geq Q_{heat}^t \quad (3-8)$$

Yhtälö (3-8) ilmaisee, että tuotetusta lämmöstä, jonka pitäisi tyydyttää alueen lämmöntarpeen Q_{heat}^t kaikkina hetkinä t , vähennetään kaukolämpöakkuun ladatun ja puretun lämmön määrä. Mallissa lämpötase jyvittää lämpöä kunkin lämmönkäyttäjän tarpeen mukaisesti. Yhtälö kirjoitetaan epäyhtälömuotoon, sillä malli ei rajoita lämmön tuottamista yli tarpeen. Ylimääräinen lämmöntuotanto voi olla tarpeen tilanteissa, jolloin sähkön hinta on korkea, vaikka lämmöntarve ei ole. Tällöin ylimääräisestä lämmöstä päästään eroon lauhduttamalla se johonkin luonnolliseen kohteeseen, kuten järveen. Jos ylimääräisestä lämmöstä ei päästä ilmaiseksi eroon, voidaan malliin lisätä lisäkustannus ylimääräisen lämmön poistamisesta.

Yhtälöön (3-5) voidaan myöhemmin lisätä muita komponentteja, jos tarvetta lisätutkimukselle tulee. Optimointimalliin syötetään sisäänmenona polttoaineiden ja sähkön hinta. Ulostulona mallista saadaan tuotetun ja kulutetun sähkön määrä ja eri komponenttien tuotantosuunnitelmat sekä virtaamat. Alueen malliin kuuluvat pääkattilalaitos, varakattilalaitos, kaukolämpövarasto, lämpöpumppu ja palvelinkeskus. Malli kuvaa alueen energiarajoitteita ja riippuvuussuhteita MILP-mallin avulla, joka toteutetaan N-side optimointiohjelmaan graafisena esityksenä. Mallin optimointihorisontti voi olla maksimissaan viikon, jonka sisällä malli pyrkii tuntitasolla muodostamaan parhaan mahdollisen tuotantosuunnitelman käyttökustannusten minimoimiseksi. Alueen lämmönkäyttötiedot ovat peräisin Loiste Oy:ltä.

3.1.8 Mallin rajoiteyhtälöt

Mallin rajoiteyhtälöiden on tarkoitus rajata mallin toiminta-alue siten, että sen antamat tulokset vastaavat todellisuutta mahdollisimman hyvin. Optimointiongelman ratkaisujoukosta saadaan yhdessä rajoiteyhtälöiden kanssa mallinnettua systeemin toiminta-alue. N-siden Enertop alustalla rajoiteyhtälöt kuvataan reseptien avulla. Jos mallille antaa liian tiukat rajoitteet, ei malli pysty ratkaisemaan ongelmaa ja antaa tuloksen relaxoituna. Tämä tarkoittaa sitä, että jotkin mallin rajoitukset on jätetty huomioimatta ja malli pyrkii rajoitusten poistamisen kautta ratkaisemaan optimointiongelman.

Mallin eräs tehtävä on taata CHP-tuotannon sekä turbiinin toiminta kaikkina aikoina. Mallille on annettava rajoite, mikä estää CHP-laitoksen ja turbiinin alasajon. Käytännössä tämän voi tehdä kahdella tavalla: asettamalla CHP-tuotannon ja turbiinin alasajolle tarpeeksi korkea hinta, tai määrittämällä niille kielletty toiminta-alue. Jälkimmäinen vaihtoehto on järkevämpi, sillä simuloiteja tehtäessä huomattiin, että malli ajoi kattilan ja turbiinin alas, vaikka niille oli määritetty todelliset alasajon kustannukset. Tämä johtui hyvin matalista sähkön hinnoista, jolloin malli näki kannatta-

vammaksi tuottaa lämpö lämpöpumpulla tai sähkökattilalla. Todellisuudessa kattila ja turbiini ajetaan alas vain vuosihuollon tai rikkoutumisen seurauksena. Kielletty toiminta-alue tarkoittaa, että CHP-laitos sekä turbiini pakotetaan olemaan päällä -tilassa jatkuvasti.

CHP-tuotannon minimi- ja maksimitehot sekä tehon muutosnopeus on myös huomioitava mallissa. Yhtälöillä CHP-tuotanto on rajattava minimi- ja maksimituotannon väliin, jotta malli antaa todellisia tuloksia. CHP-laitoksen tehon muutosnopeus on myös rajattava siten, että malli ei esimerkiksi aja CHP-tuotantoa minimistä maksimiin yhden tunnin sisällä. Tehon muutosnopeus huomioidaan mallissa käytännössä määrittämällä CHP-tuotannolle tehon heilahtelukustannus. CHP-tuotannon minimi- ja maksimituotannot ovat huomioitu mallissa yhtälön (3-9) mukaisesti.

$$Q_{CHP}^{min} \leq Q_{heat}^t + q_{s+}^t - q_{s-}^t + q_{HOB}^t - q_{AUX}^t - q_{elec}^t - q_{HP}^t \leq Q_{CHP}^{max} \quad (3-9)$$

Laitosta ajaessa voidaan päätyä tilanteeseen, jossa lämpökuorma ylittää tai alittaa CHP-tuotannon toiminta-alueen. Tällöin malli pyrkii tuottamaan erotuksen joko apukattilalla tai lämpöpumpulla. Päätökseen vaikuttaa komponenttien käynnistyskustannukset, käynnissäpitokustannus (state cost), polttoainehinnat sekä sähkön spot-hinta. Käynnistyskustannuksen määrittäminen on tärkeää tilanteissa, joissa lisälämmöntarve esiintyy vain muutamina tunteina ennusteissa, jolloin apukattilan tai lämpöpumpun käynnistäminen on harvoin kannattavaa. Tästä syystä apukattilalle ja lämpöpumpulle on määritettävä käynnistyskustannukset, sekä minimi- ja maksimitehot yhtälöiden (3-10) ja (3-11) avulla.

$$Q_{HOB}^{min} \leq Q_{HOB}^t \leq Q_{HOB}^{max} \quad (3-10)$$

$$Q_{HP}^{min} \leq Q_{HP}^t \leq Q_{HP}^{max} \quad (3-11)$$

Kaukolämpöakun käyttöä rajoittaa akun minimi- ja maksimikapasiteetti sekä lataus- ja purkutehon ylä- ja alarajat. Kaukolämpöakun kapasiteetin ylä- ja alarajat rajoitetaan yhtälöllä (3-12). Kaavat (3-13) ja (3-14) pitävät virtaaman kaukolämpöakkuun lataus- ja purkutehon asettamien rajojen sisällä. Enertop ympäristössä akun minimi- ja maksimikapasiteetti asetetaan solun määrittämien parametrien sisään suoraan. Minimivirtaamat rajoitetaan soluja yhdistävällä viivalla.

$$S_q^{min} \leq S_q^t \leq S_q^{max} \quad (3-12)$$

$$q_{s+}^t \leq q_s^{max} \quad (3-13)$$

$$q_{s-}^t \leq q_s^{max} \quad (3-14)$$

Lauhdeturbiini on ohjelmassa jatkuvasti päällä. Tämä ei vastaa todellisuutta, sillä lauhdeturbiini ei normaalisti ole generaattorin akselilla, vaan se joudutaan aina mekaanisesti kytkemään kiinni. Optimoinnin tavoitteena on kuitenkin, että käyttäjän ei enää tarvitsisi muokata ohjelman määrittelyosiota. Lauhdeturbiinille tulevalle virtaukselle on asetettu kustannus, mikä antaa optimoinnille mahdollisuuden ajaa turbiinia, mutta lisäkustannuksen takia optimointi ei sitä herkästi tee.

Apujäähdytys ja höyryn ulospuhallus on mallinnettu vapaina höyryn kuluttajina, joille on samaan tapaan määritetty sisään tulevalle virtaukselle kustannus, kuten lauhdeturbiinille. Malli voi vapaasti ajaa höyryä niihin, jos se on kannattavaa. Näin toimimalla mallista saadaan joustavampi ja robustimpi.

Korkean ja matalan lämpökuorman aikana käytettävien lämpöpumpun ja apukattilan rajoitukset ovat myös otettava huomioon mallissa. Rajoitukset ovat esimerkiksi käynnistyskustannus, minimi- ja maksimitehot sekä minimi päällä oloaika. Tällöin ei päädytä tilanteeseen, jossa malli käynnistää ja sammuttaa apukattilan sekä lämpöpumpun jatkuvasti. Varsinkin korkean lämpökuorman aikana kaukolämpöverkon maksimikapasiteetti on myös otettava huomioon.

3.2 Optimointiongelman ratkaiseminen

Optimointiohjelma muodostaa tavoiteyhtälön sekä rajoiteyhtälöiden avulla tuntikohtaisen matemaattisen mallin lämmöntuotannosta. Mallin ratkaisun monimutkaisuus riippuu käytetyistä yhtälöistä, ja prosessien määrästä. Malli tuottaa optimointiongelmaista erilaisia ratkaisukombinaatioita, joiden määrä riippuu komponenttien ja niiden osittaislinearisoitujen riippuvuuksien määrästä. Ohjelman on ratkaisua etsiessään otettava huomioon myös asetetut rajoitukset, mikä saattaa vaikeuttaa ratkaisun löytymistä.

Optimointimallin optimointihorisontin voi kerralla asettaa maksimissaan seitsemään päivään. Tämä tarkoittaa, että malli soveltuu ainoastaan lyhyen aikavälin optimointiin. Pidemmällä aikavälillä ennustevirheiden suuruus kasvaisi suureksi ja mallista tulisi todella raskas ratkaista, jolloin mallin tuloksen saamisessa kestäisi pitkään. Tulevaisuudessa mallia on pystyttävä käyttämään suoraan tuotannon optimoinnissa, jolloin suoritetuissa simuloinneissa ei saa mennä liian kauan, jotta tuotantosunnitelmat saadaan ajoissa valmiiksi. Tämä korostuu erityisesti siirryttäessä vartitaseeseen, eli lyhyempään tasejaksoon.

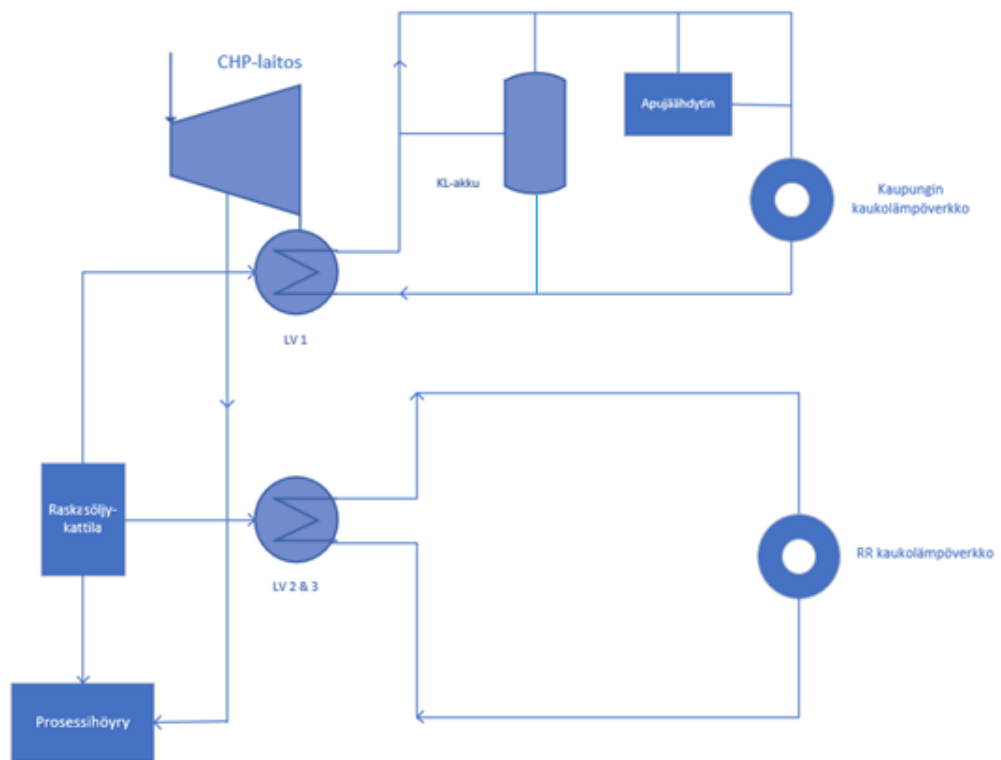
Optimointimallin lämmöntarpeet tuodaan ohjelmaan tässä tutkimuksessa lataamalla ohjelmaan Excel-tiedosto, johon voidaan syöttää koko vuoden lämpökuorma kerralla. Ohjelma suodattaa tiedostosta optimointihorisonttiin kuuluvat tunnit ja syrjäyttää muut tiedot. Tietenkään todellisessa käytössä ohjelma ei toimi näin, mutta historiadatan avulla simuloitaessa näin voidaan tehdä. Todellisuudessa ohjelma on tarkoitettu toimivaksi suoraan tuotannonsuunnittelussa, jolloin lämmöntarpeet ja muut ennusteet tuodaan suoraan tietokannasta ohjelmaan. Ohjelma ratkaisee optimointiongelman lämmöntarpeen, sähkön hinnan ja polttoainehintojen perusteella. Jokaiselle lämmönkäyttäjälle on oma lämpökuorma, jonka mukaan ohjelma tekee päätöksen lämmöntuotannosta mahdollisimman pienin kustannuksin ja tekniset rajoitukset huomioiden. Alueella on esimerkiksi ainoastaan prosessihöyryä hyödyntäviä laitoksia, jolloin pelkkää kaukolämpöä tuottava tuotantolaitos ei voi sen lämmöntarvetta tyydyttää.

4. CASE RENFORSIN RANTA

Tässä luvussa esitellään Kajaanissa Renforsin Rannalla sijaitseva yritysalue, jonka lämmönkäyttöä optimointimallilla pyritään parantamaan. Luvussa kerrotaan, kuinka alueen lämpö tällä hetkellä tuotetaan, ja mikä ongelmakohta on. Malli on rakennettu alueen historiadatan perusteella.

4.1 Renforsin Ranta

Renforsin Ranta on Kajaanissa sijaitseva UPM:n omistama yritysalue, jossa toimi aiemmin Kajaanin paperitehdas vuoteen 2008 asti. Alue on muutettu yrityskäyttöön ja tällä hetkellä alueella toimii 35 yritystä ja noin 600 työntekijää. Suurimmat lämmönkuluttajat alueella ovat matala- ja keskipainehöyryä sekä kaukolämpöä alueen sisällä käyttävät asiakkaat. Alueen, sekä Kajaanin kaupungin kaukolämpö tuotetaan Kajaanin kaupungin ja UPM Energy Oy:n yhteysomistetuilla CHP-laitoksella. Voimalaitoksen tuotteet ovat prosessihöyry, kaukolämpö sekä vastapainesähkö. Kajaanin kaupunki on vuokrannut osuutensa voimalaitoksesta Loiste Energia Oy:n käyttöön omistusoikeutta vastaavalla pitkäaikaisella vuokrasopimuksella. Alueen lämpöverkko on esitetty kuvassa 18. Alueen lämmönkäyttäjien kuuluvat St1, Kajaanin kaupunki sekä Renforsin Ranta. (Kainuun Voima Oy, 2019)



Kuva 18: Renforsin Rannan lämpöverkko

CHP-laitoksella tuotetaan kaukolämpöä ja prosessihöyryä koko alueen, sekä kaupungin tarpeisiin. Apukattilalla tuotetaan kaukolämpöä lähinnä Renforsin Rannan yritysalueen käyttöön sekä prosessihöyryasiakkaille. Renforsin Rannan kaukolämpöverkon lämpöä käytetään yritysalueen toimistojen lämmittämiseen sekä asiakkaan kuivatusprosesseissa.

Voimalaitoksen pääkattila on kiertopetikkattila (CFB-kattila), jonka on toimittanut A. Ahlström Osakeyhtiö Varkaudesta. Kattila tuottaa $13,5 \text{ MPa}$:n paineista ja 535 °C lämpöistä höyryä enimmäkseen

100 kg/s. Polttoaineen energiasta saadaan sähkön ja lämmön yhteistuotannolla hyödynnettyä noin 80 %. Mikäli lämmön ja vastapainesähkön tuotannon jälkeen kattilaan jää tehoa käyttämättä, on mahdollista tuottaa lisäksi lauhdesähköä. Pääkattilaa käytetään alueen peruskuormalaitoksena. Laitos tuottaa lämpöenergiaa kaukolämpöverkkoon sekä prosessihöyryksi. Pääkattilan polttoaineena käytetään turpeen ja biomassan sekoitusta. (Kainuun Voima Oy, 2019)

Lämpövoimalaitoksen vara- ja huippukattilana toimii tamperelaisen Tamentec Oy:n valmistama raskasöljykattila, missä on neljä low-nox öljypoltina. Enimmillään kattila tuottaa 65 kg/s 3 MPa:n kylläistä höyryä. Kattilan tuottamaa lämpöä käytetään prosessihöyryn ja kaukolämmön tekemiseen pääkattilan huollon ja huippukuormituksen aikaan, jolloin pääkattilan kapasiteetti yksin jää liian pieneksi. (Kainuun Voima Oy, 2019)

Alueen komponenttien käyttötekniset tiedot on esitetty taulukossa 7.

Taulukko 7: Renforsin Rannan mallissa käytetyt komponenttien käyttötekniset tiedot.

Pääkattila:	
- Maksimiteho [MW]	200
- Minimiteho [MW]	38
Varakattila:	
- Maksimilämpöteho [MW]	120
- Minimilämpöteho [MW]	5
Kaukolämpöakku:	
- Tilavuus [m^3]	10 000
- Käyttölämpötila [$^{\circ}C$]	99
- Käyttötehon minimi [MW]	5
- Käyttötehon maksimi [MW]	45

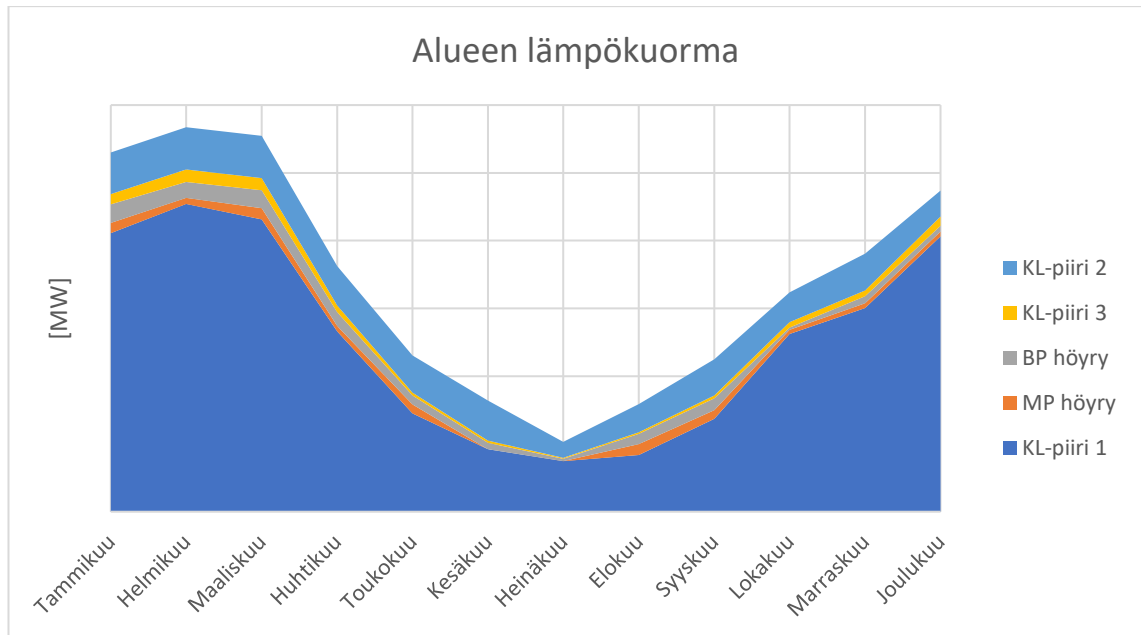
4.2 Data-analyysi

Renforsin Rannan lämmöntuotannon operointia tarkastellaan vuoden 2018 tuotantodataan perustuen. Toteutuneet datat perustuvat Kainuun Voimalta ja Loisteelta saatuihin tietoihin. Kaikki lämmöntuotantokomponentteihin liittyvät tekniset tiedot on saatu Kainuun Voimalta.

4.2.1 Nykytilanne

Alueen lämmöntuotantoa ohjataan automaattisesti kaikissa lämpöpiireissä. Jokaiselle verkolle on lämpötilan asetusarvo, joka joko syötetään käsin asiakkaan toivomuksen mukaan tai ulkoilman lämpötilan perusteella. Lämpöpiirien staattinen paineenpito hoidetaan myös automaattisesti, esiasetellun paineasetusarvon perusteella. Dynaaminen paineenpito hoidetaan verkon yli automaattisesti esiasetellulla paine-ero asetusarvolla. Operaattorin rooli lämmöntuotannon ajamisessa on pieni. Operaattoria tarvitaan ainoastaan häiriötilanteessa tai asetusarvomutoksissa.

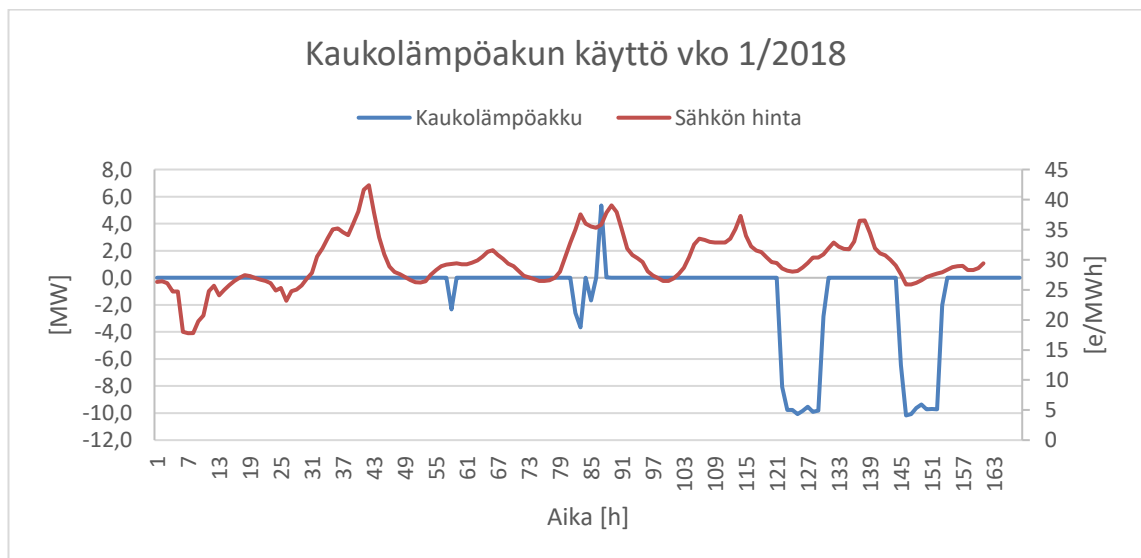
Alueen nykyinen lämpökuorma ja lämmönkäyttäjät vuodelta 2018 on esitetty kuvassa 19. Kuvasta nähdään, että Kajaanin kaupungin kaukolämpö on ylivoimaisesti suurin lämmönkäyttäjä alueella. Matalapaine ja keskipainehöyryn käyttö ei tällä hetkellä ole kovin suurta, mutta tulevaisuudessa niiden osuus saattaa kasvaa merkittävästi. Ongelmana on, että paperitehtaan poistuttua vuonna 2008, ei alueelta löytynyt tarpeeksi lämpökuormaa, jolloin pääkattilan minimikuormaan pääseminen muuttui haasteelliseksi.



Kuva 19: Renforsin Rannan lämpökuorma vuodelta 2018

Alueen suurin haaste tällä hetkellä on lämpökuorman pienuus. Optimoinnin avulla lämmöntuotantoa pyritään parantamaan siten, että pääkattila pystyisi operoimaan mahdollisimman pitkän aikaa vuodesta peruskuormalla. Samalla tutkitaan vaihtoehtoisia tapoja tuottaa huippukuorma.

Kaukolämpöakku on kaupungin kaukolämpöverkossa kiinni. Akun purkamista ja lataamista kontrolloi voimalaitoksen operaattori tuotanto-ohjeiden mukaisesti. Sähkön tuotantoa pyritään optimoimaan kaukolämpöakun avulla. Kuvassa 20 on esitetty kaukolämpöakun käyttö yhden viikon ajalta. Kuvassa kaukolämpöakun positiivinen käyttö kuvastaa akun lataamista ja negatiivinen purkamista.



Kuva 20: Kaukolämpöakun käyttö sähkön hintaprofiilin mukaan viikolla 1/2018

Kuvasta 20 nähdään, että kaukolämpöakun käyttö ei ole kovin aggressiivista kyseisellä viikolla. Kuvaajasta nähdään myös kaukolämpöakun manuaalijon suurimmat ongelmat. Akun purkamisen ja lataaminen mukaillee sähkön markkinahintaa vain vähän, jolloin sen tuomat hyödyt jäävät pieniksi. Akun käytön kannattavuus perustuu nimenomaan aktiiviseen purkamiseen ja lataamiseen. Nykyisellään kaukolämpöakun käyttöä operoidaan ainoastaan manuaalisesti sähkön hinnan perusteella. Tämän seurauksena kaukolämpöakun käytöllä ei pystytä vähentämään peruskuorman ulkopuolista tuotantoa.

Rakennetulla optimointiohjelmalla pyritään parantamaan ja optimoimaan nykyistä tilannetta, sekä tutkimaan lisäkomponenttien tuomaa lisäarvoa käyttökustannusten osalta.

4.2.2 Mallin soveltaminen

Jotta optimointimalli voidaan ottaa käyttöön, on luvussa 3 esitellyt muuttujat ja parametrit määritettävä. Viiden päivän sääennustetta käytetään yleisesti energiayhtiöissä sen kohtuullisen hyvän tarkkuuden vuoksi. Tutkimusten mukaan yli kolmen päivän optimointihorisontti ei tuota merkittävästi parempaa operointikustannusten vähennystä (Fang & Lahdelma, 2015). Käytettävän aikaikkunan pituus valitaan tässä tutkimuksessa kuitenkin mahdollisimman pitkäksi, jotta optimointien määrä pysyisi pienenä. Aikaikkuna valittiin näin, koska käytetty ohjelma toimi yrityksen sisäverkoissa erittäin hitaasti. Käytännössä lyhyen aikaikkunan optimoinnit kestivät yhtä kauan kuin pitkät.

Alueella on tällä hetkellä toiminnassa CHP-laitos, öljykäyttöinen apukattila sekä kaukolämpöakku. Alueelle luodaan optimointimallia varten hukkalämmön lähde, lämpöpumppu, joka nostaa tämän hukkalämmön lämpötilaa sekä sähkökattila, jonka tarkoitus on korvata öljykäyttöinen apukattila. CHP-laitoksen ja apukattilan oletetaan toimivan mallissa aina vakio hyötysuhteella. Kattiloille syötetään ainoastaan minimi- ja maksimiteho sekä kiinteä hyötysuhde. Käynnistyskustannus määritetään mallissa CHP-tuotannolle, apukattilalle ja turbiinille. Turbiini ja CHP-laitos pakotetaan myös olemaan jatkuvasti päällä tuotannon takaamiseksi.

CHP-laitoksesta muodostetaan yksinkertainen lineaarinen ΦP –karakteristika, jonka pohjalta CHP-tuotannolle määritetään neljä muutosreseptiä ohjelmaan. Turbiini jaetaan mallissa kolmeen osaan luvussa 3.1.3 esitetyllä tavalla. Turbiinin vastapaine- ja kaukolämpöosat jaetaan neljään toimintapisteeseen, joten niistä luodaan myös neljä reseptiä malliin. Jokaisen toimintapisteen välisen janan oletetaan käyttäytyvän lineaarisesti tehon suhteen. Käyrästöt, joiden perusteella turbiinin vyöhykkeet muodostetaan, saadaan historiadataa analysoimalla.

Optimointimallissa tuntikohtainen lämpökuorma, sähkön hinta ja polttoaineiden hinnat määritetään Excel-tiedostossa, joka ladataan optimointiohjelman palvelimelle. Arvoina käytettiin todellisia tuotantosuunnittelussa käytettyjä historiallisia arvoja, pois lukien kaupungin kaukolämpödata, jossa käytettiin ennustetietoa. Tähän päädyttiin siitä syystä, että myöhemmin työssä voidaan vertailla ennustetun ja toteutuneen lämpödatan vaikutusta kustannuksiin. Sähkön hinta perustui vuoden 2018 spot-hintoihin. Lämpöpumpun ja sähkökattilan minimi- ja maksimitehoina käytettiin arvoja, sillä kyseisiä komponentteja ei yritysalueella ole.

Taulukko 8: Renforsin Rannan optimointimallissa käytetyt kiinteät parametrit

Käytetyt parametrit	
CHP-laitoksen maksimilämpöteho, Q_{CHP}^{max}	200 MW
CHP-laitoksen minimilämpöteho, Q_{CHP}^{min}	38 MW
CHP-laitoksen tuotantokustannus, C_{CHP}^t	- e/MWh
Varakattilan maksimilämpöteho, Q_{HOB}^{max}	120 MW
Varakattilan minimilämpöteho, Q_{HOB}^{min}	5 MW
Varakattilan käyttökustannus, c_{HOB}^t	- e/MWh
Apujäähdytyksen käyttökustannus, c_{AUX}^t	- e/MWh
Kaukolämpöakun maksimikäyttöteho, q_s^{max}	45 MW
Kaukolämpöakun minimikäyttöteho, q_s^{min}	5 MW
Kaukolämpöakun maksimikäyttölämpötila, T_s	99 C
Kaukolämpöakun maksimivaraus, S_q^{max}	400 MWh
Kaukolämpöakun minimivaraus, S_q^{min}	150 MWh
Hukkalämmön teho, Q_{waste}	13 MW
Sähkökattilan maksimilämpöteho, Q_{elec}^{max}	120 MW
Sähkökattilan minimilämpöteho, Q_{elec}^{min}	1 MW
Lämpöpumpun maksimiteho, Q_{HP}^{max}	12,35 MW
Lämpöpumpun minimiteho, Q_{HP}^{min}	0 MW
Optimoinnissa käytetyn aikaikkunan pituus, T	168 h

5. TULOKSET

Tässä kappaleessa esitellään optimointimallin suunnittelemalla komponenttien käytöllä lasketut tulokset. Ensimmäisessä aliluvussa verrataan optimointimallin antamia tuloksia todellisiin historiatietoihin. Seuraavaksi tarkastellaan kuinka uudet komponentit vaikuttavat alueen lämmönkäyttöön ja kuinka suuriin kustannussäästöihin mallia käyttämällä päästään. Lopuksi tutkitaan, kuinka lämmöntuotantodatan ennustevirhe vaikuttaa mallin tuloksiin.

5.1 Optimointimallin vertaaminen nykykäytäntöön

Optimointimallin toimintaa verrataan nykykäytäntöön simuloimalla komponenttien käyttöä optimointimallilla vuoden 2018 lämpökuorman ja sähkön markkinahintaan perustuen. Optimointimallin antamia tuloksia verrataan todelliseen tuotantodataan ja viritetään siten, että mallin antamat tulokset vastaavat todellisuutta. Simulointi suoritetaan teollisuushöyryn käyttäjien osalta todellisella tuotantodatalla, sillä sen voidaan olettaa olevan hyvin tasaista ympäri vuoden, esimerkiksi ulkolämpötila ei vaikuta siihen. Kaukolämmön suunnittelussa käytetään lämpöennusteita, jotta optimoinnin antamat ja toteutuneet tulokset olisivat vertailukelpoisia.

Tuloksissa toteutuneita käyttökustannuksia ja mallin komponenttien käyttöä verrataan historiatietoon. Käyttökustannuksiin vaikuttaa suoraan, kuinka eri komponentteja on käytetty. Optimointimalli pyrkii minimoimaan käyttökustannuksia, joten se siirtää tuotantoa halvempien muuttuvien kustannusten komponentille, samalla pitäen CHP-tuotannon toiminta-alueensa sisällä. Todellisuudessa operaattori tekee ennusteiden perusteella lopullisen päätöksen eri komponenttien ajosta.

Käyttökustannusten muutoksen syitä tarkastellaan komponenttien käytön kautta. Tarkasteltavat eroavaisuudet tulevat kaukolämpöakun vaikutuksesta tuotetusta sähköstä saatuun hintaan ja apukattiloiden, lämpöpumpun sekä apujäähdytyksen käytöstä. Sähkön markkinahinta ja polttoainehinnat vaikuttavat mallin toimintaan suuresti. Korkean sähkön markkinahinnan aikana malli pyrkii siirtämään tuotantoa CHP-laitokselle, jolloin turbiinien läpi virtaa enemmän höyryä ja generaattorin tuottamasta sähköstä saadaan hyvä hinta. Sähkön markkinahinnan ollessa alhainen, pyrkii malli tuottamaan höyryä mahdollisimman paljon sähkökattilalla sekä kaukolämpöä lämpöpumpulla, jotta tuotantokustannukset pysyvät alhaalla.

Optimointimalli vähentää käyttökustannuksia kasvattamalla tai vähentämällä CHP-tuotannon määrää, ajoittamalla sähkön- ja lämmöntuotantoa sähkön hinnan mukaan sekä vähentämällä apukattiloiden ja apujäähdytyksen käyttöä. Mainittujen osatekijöiden vaikutus käyttökustannukseen ja tuotettuun energiaan on esitetty taulukossa 9.

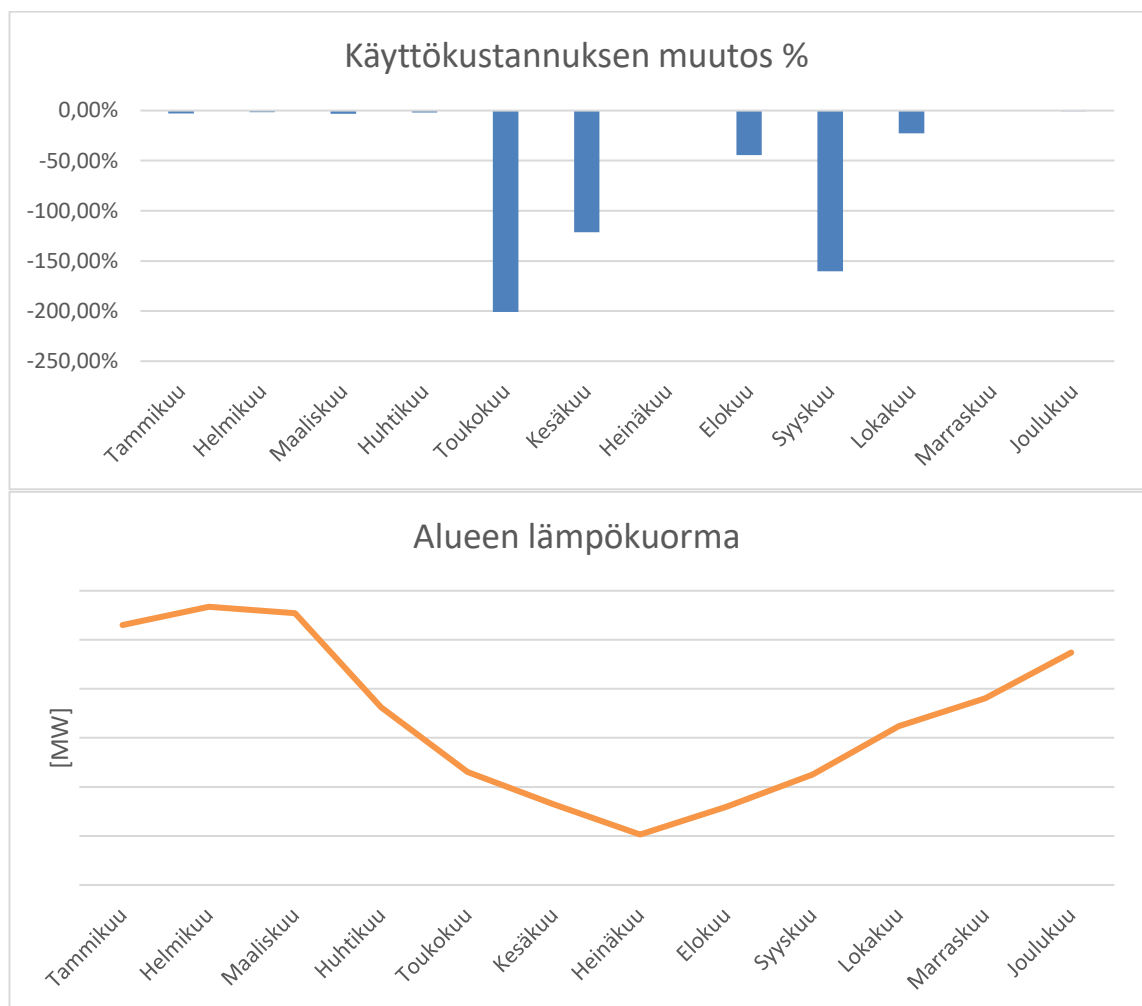
Taulukko 9: Tekijät, joihin vaikuttamalla optimointimalli vähensi käyttökustannusta nykykäytäntöön verrattuna.

	%	MWh
Käyttökustannuksen kokonaisuusmuutos	-5,68	-
Osuus käyttökustannuksen muutoksessa:		
- Sähköntuotannon muutos	9,55	-13 915
- Pääkattilan käytön muutos	-28,78	-65 073
- Apujäähdytyksen käytön muutos	-1,12	-2614
- Ulospuhalluksen käytön muutos	-0,05	-28
- Sähkökattilan käytön muutos	2,32	6083
- Lämpöpumpun lämmönkäytön muutos	4,14	25 354
- Lämpöpumpun sähkön käytön muutos	8,26	-

Eniten käyttökustannuksen pienenemiseen näyttäisi vaikuttavan pääkattilan pienentynyt käyttö. Optimointimalli siirsi lämmöntuotantoa halvan sähkön hinnan aikaan pääkattilalta lämpöpumpulle ja sähkökattilalle. Pääkattilan pienemmällä käytöllä hävitään sähkön tuotannossa, mutta alhaisen sähkön hinnan aikaan on optimoinnin perusteella viisaampaa hyödyntää halpaa sähköä suoraan lämmöntuotannossa. Pienillä kuormilla CHP-tuotannon hyötysuhde on kuitenkin huono, kuten luvussa 2.2.1 on esitetty. Hyötysuhteen vaikutusta kustannuksiin ei otettu huomioon tuloksia tarkasteltaessa, mikä parantaa tulosta huomattavasti.

Malli vähentää apujäähdytyksen käyttöä myös merkittävästi. Apujäähdytyksen käyttöön vaikuttaa kaukolämpöakun tuominen malliin. Kaukolämpöakun avulla malli pystyi myös siirtämään sähkön tuotantoa kannattavammille tunneille aiempaan verrattuna. Kaukolämpöakun avulla tuotantoon on kuitenkin mahdollista tehdä vain muutaman tunnin mittaisia ajallisia siirtoja.

Käyttökustannuksen muutos oli suurinta lämpimään aikaan, jolloin lämpökuormaa ei ollut paljon. Tämä johtui osittain siitä, että malli vähensi apujäähdytyksen käyttöä ja tuotti suurimman osan tarvittavasta lämmöstä lämpöpumpulla ja sähkökattilalla.

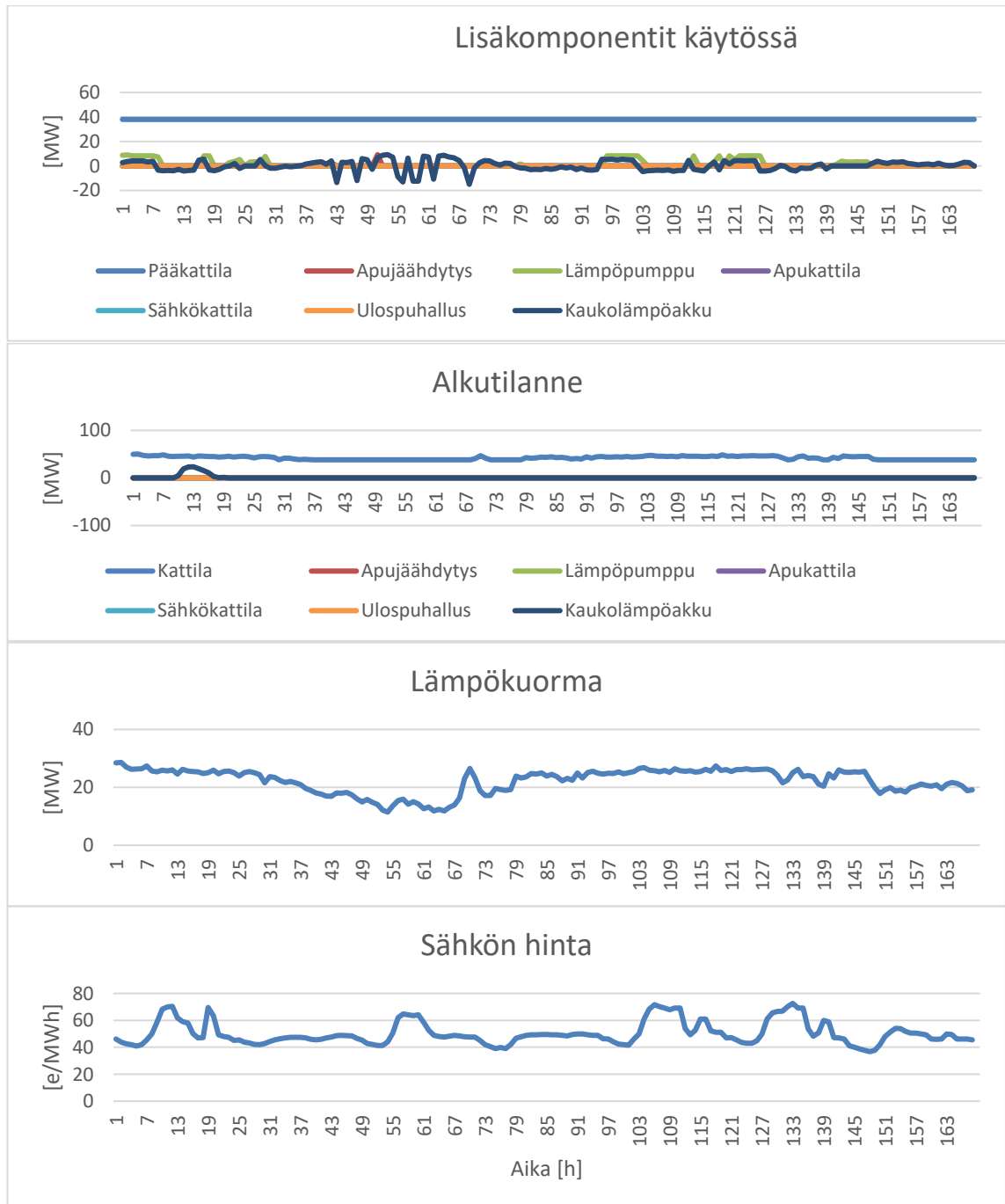


Kuva 21: Optimointimallin vaikutus lämmön tuotantokustannuksiin kuukausittaisesta

Kuvasta 21 nähdään, että lämpökuormalla on suuri vaikutus käyttökustannuksen muutokseen. Optimointimallin tuomat hyödyt käyttökustannuksen pienentämisessä tulevat esille kuukausina, jolloin lämpökuorma on hyvin pieni.

5.1.1 Matala kuorma

Lämpökuorma on matalalla kesäkuusta elokuuhun. Optimointimallin käyttäytymistä tarkastellaan tässä luvussa viikolla 24. Viikko 24 kuvastaa hyvin alueen lämmöntuotantoa matalalla kuormalla, ja kyseisellä viikolla näkee hyvin lisäkomponenttien tuoman lisähyödyn. Optimoinnit suoritetaan ajamalla ensin alkutilanne läpi optimointiohjelmassa, jonka jälkeen lisäkomponentit otetaan mallissa käyttöön ja vertaillaan saatuja tuloksia. Alkutilanteen simuloinneissa kaukolämpöakku ei ole käytössä optimointia suoritettaessa, vaan kaukolämpöakun käyttödata otetaan suoraan toteutuneesta käytöstä historiadatasta. Kuvan lämpökuorma on alueen lämmönkäyttäjien lämpökuormien summa, johon ei ole laskettu kaukolämpöakun käyttötehoa. Sähkön hinta on suomen spot-hinta viikolta 24/2018. Kuvassa 22 positiivinen kaukolämpöakun käyttö kuvastaa lataamista, eli käyttö lisää CHP-laitoksen kaukolämpökuormaa, ja negatiivinen akun purkamista.

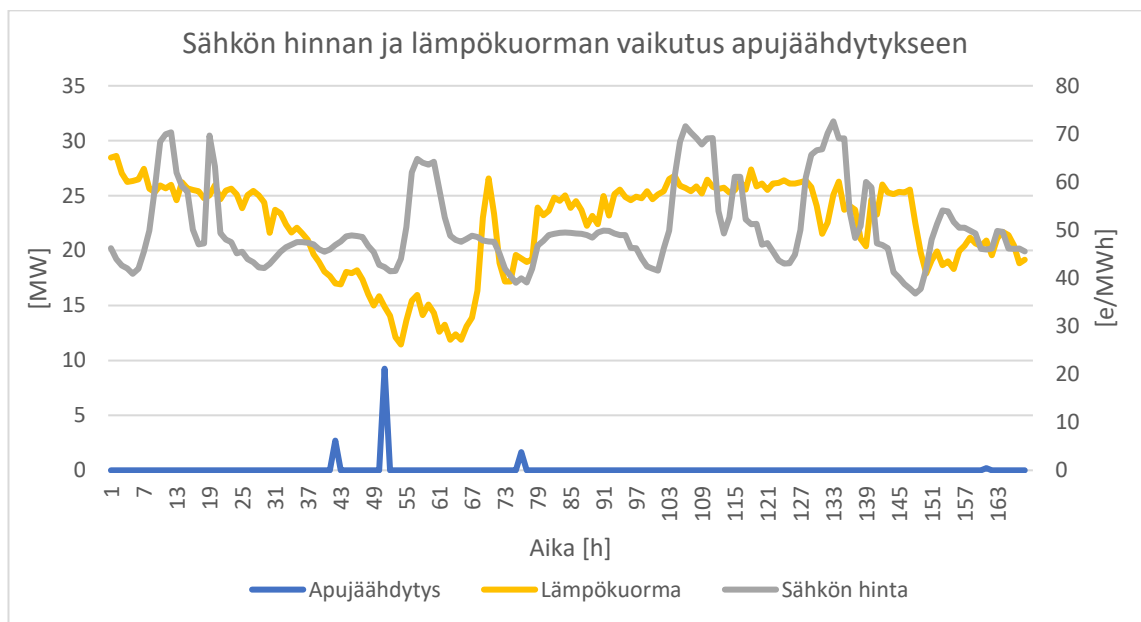


Kuva 22: Alkutilanteen ja lisäkomponenttien käyttö optimointiohjelmassa viikolla 24/2018

Kuvan 22 tulosten perusteella nähdään, että kaukolämpöakun käyttö on huomattavasti aggressiivisempaa lisäkomponenteilla optimoitaessa kuin perustilanteessa. Perustilanteessa kaukolämpöakku on käytetty käytännössä vain tunteina 10-19, kun lisäkomponenteilla optimoitu käyttö lataa ja purkaa akkua jatkuvasti sähkön hintaprofiilia mukaillen. Ero johtuu perustilanteen manuaalisesta ajosta, joka perustuu kolmannen osapuolen ohjeisiin. Kuvasta nähdään myös, että pääkattilan tuotanto on hyvin tasaista lisäkomponenteilla. Tämä johtuu sähkön hinnan tasaisuudesta, mikä ei kannusta mallia nostamaan kattilatehoa, sillä tehon heilahtelulle on mallissa määritetty kustannus. Kustannus on lisätty, jotta CHP-tuotanto ei nostaisi ja laskisi tehoaan liian nopeasti.

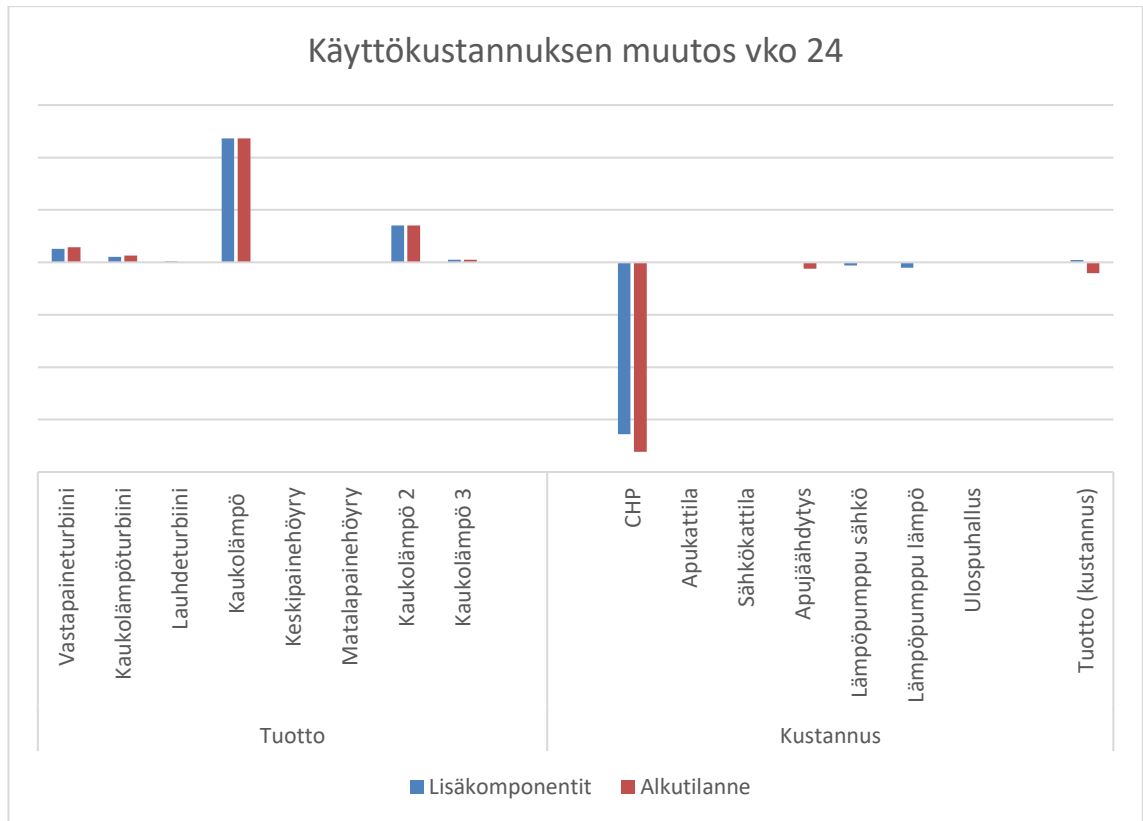
Lämpöpumppua malli hyödyntää sähkön hintaprofiilin ja lämpökuorman mukaisesti. Sähkön hinnan ollessa alhaalla esimerkiksi tunteina 97-103, on malli päättänyt siirtää lämmöntuotantoa lämpöpumpulle. Samoilla tunneilla havaitaan, että lämpökuorma kasvaa hieman, jolloin joko CHP-tuotantoa on nostettava tai lämpö on tuotettava muulla tavalla. Samalla kaukolämpöakku ladataan, jolloin kaukolämpöpiiri 1 tarvitsee kaukolämpöakkuun ladatun lämmön verran lämpöä muualta. Sähkön hinnan mukaan malli päätyi ratkaisuun, jossa on taloudellisesti kannattavampaa tuottaa lämpö lämpöpumpulla.

Erikoinen havainto lisäkomponenteilla simuloitaessa on, että malli on päätenyt muutamina tunteina käyttämään apujäähdytystä, kun alkutilanteessa apujäähdytystä ei ole käytetty lainkaan. Muutos selittyy osin mallin käyttämästä kaukolämpöakusta. Molemmissa tilanteissa CHP-tuotanto on minimikuormalla, mutta lisäkomponenteilla simuloitaessa malli pyrkii lataamaan kaukolämpöakku mahdollisimman tehokkaasti korkean sähkön hinnan aikaan, jopa lisäämällä apujäähdytystä. Tunneilla, jolloin apujäähdytystä on käytetty, on sähkön hinta lähtenyt nousuun, jolloin malli on päätenyt lisäämään sähkön tuotantoa. Samalla lämpökuorma on ollut matala, jolloin malli on katsonut kannattavammaksi käyttää apujäähdytystä kuorman nostamisessa. Kuvassa 23 on esitetty sähkön hinnan ja lämpökuorman vaikutus apujäähdytykseen.



Kuva 23: Sähkön hinnan ja lämpökuorman vaikutus apujäähdytykseen viikolla 24/2018

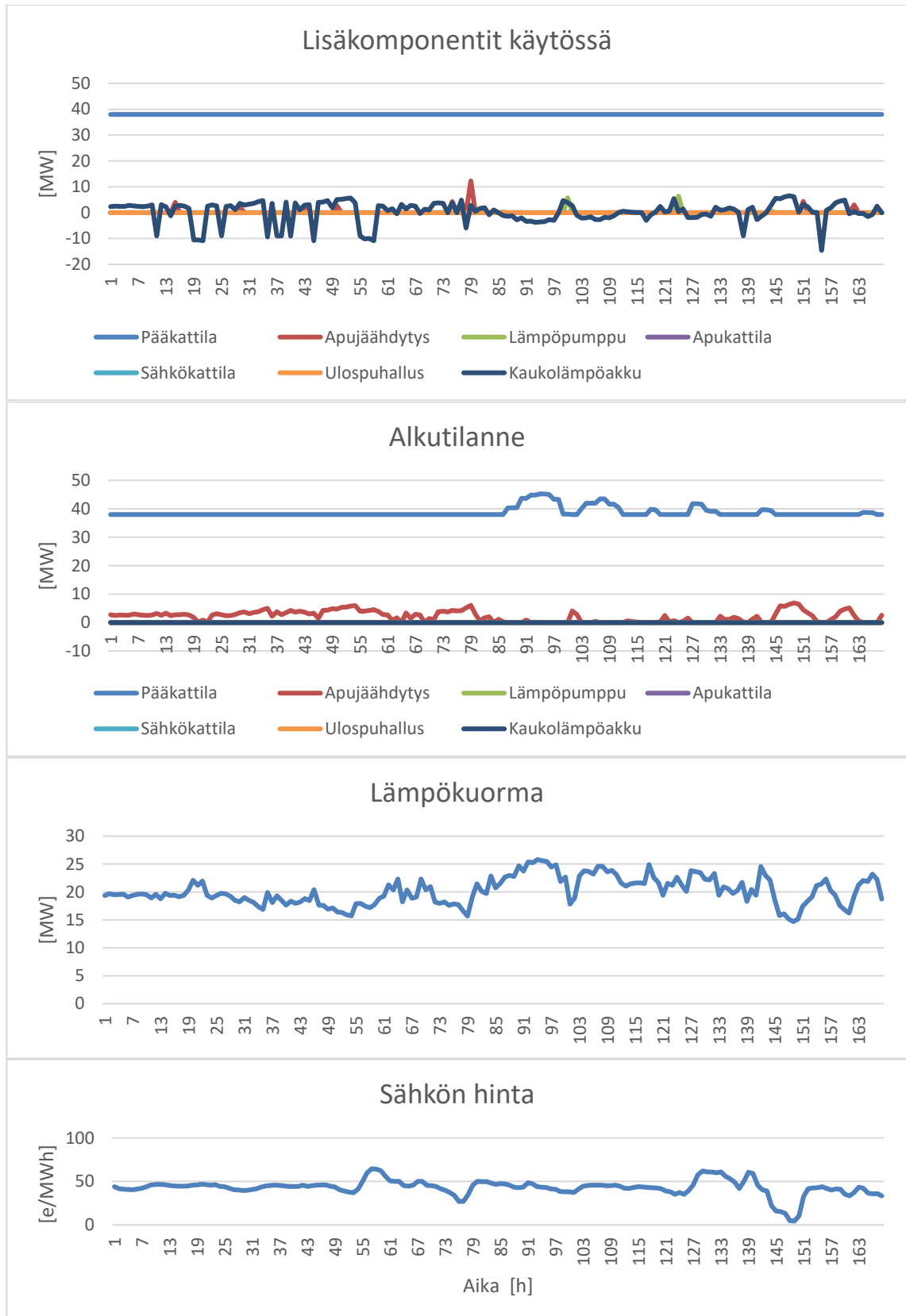
Viikon 24 käyttökustannuksen pienennys oli lisäkomponenteilla simuloitaessa 121,36 %. Muutos on merkittävä, ja muutti alkutilannetta siten, että kustannukset muuttuivat tappiosta tuotoksi. Käyttökustannuksen muutokseen vaikuttavat komponentit ovat esitettyinä kuvassa 24.



Kuva 24: Käyttökustannuksen muutos komponenteittain viikolla 24/2018

Kuvasta 24 nähdään, että lisäkomponenttien tuoma hyöty käyttökustannuksen pienentämisessä perustuu nimenomaan pääkattilan pienempään käyttöön ja lämmöntuotannon siirtäminen halvempiin tuotantomuotoihin, eli lämpöpumppuun tässä tapauksessa. Malli hyödyntää lämpöpumpua sähkökattilan sijaan, sillä lämpöpumppu käyttää huomattavasti pienemmän määrän sähköä nostaessaan hukkalämmön lämpötilaa, jolloin kynnyksessä se on pienempi. Sähkökattila tuottaa lämmön käytännössä sähkövastuksilla, jolloin sähkön käyttö lämmöntuotannossa on 100 prosenttia.

Matalan kuorman ajalta otettiin tarkasteluun vielä toinen viikko, jossa mallin toimivuus tulee paremmin esille. Viikon 25 tiedoilla simuloidut tulokset ovat esitetty kuvassa 25.

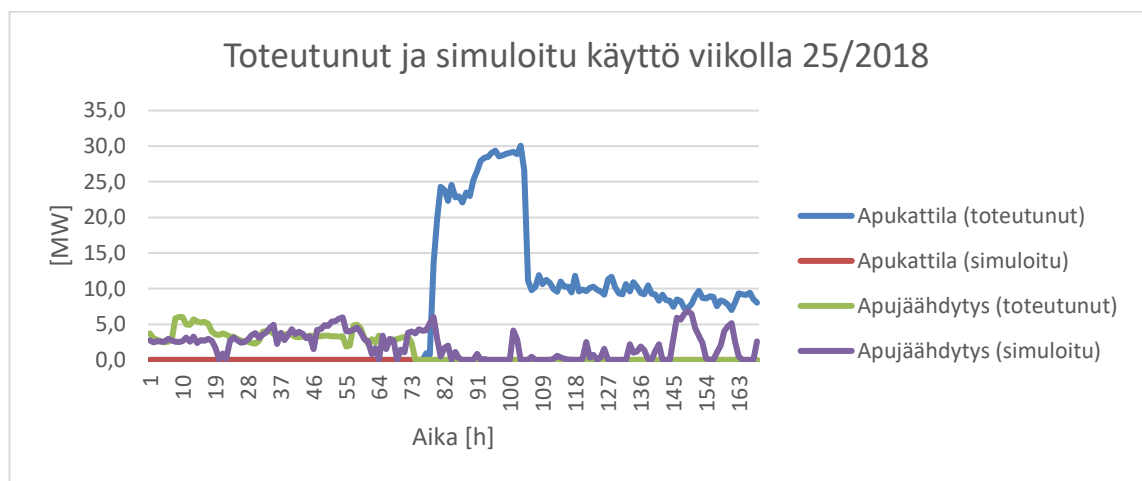


Kuva 25: Alkutilanteen ja lisäkomponenttien käyttö optimointiohjelmassa viikolla 25/2018

Kuvasta 25 nähdään, että viikolla 25 suoritetuissa simuloinneissa alkutilannetta simuloitaessa, optimointiohjelma on joutunut käyttämään huomattavasti enemmän apujäähdytystä verrattuna ti-

lanteeseen, missä kaikki lisäkomponentit ovat kiinni. Tämä on ehkä merkittävin hyöty, minkä lisäkomponenteilla, varsinkin kaukolämpöakulla, varustettu malli tuo nykyiseen ratkaisuun. Lisäkomponenteilla simuloitaessa malli on kuitenkin päätyntä käyttämään apujäähdytystä muutamina tunteina. Tämä johtuu lämpökuorma matalasta tasosta ja sähkön korkeasta hinnasta kyseisinä tunteina. Kaukolämpöakulla ja lämpöpumpulla malli pystyy reagoimaan kustannustehokkaammin muutoksiin sähkön hinnassa ja lämpökuormassa. Pelkästään viikolla 25 apujäähdytyksen käyttö pieneni uuden mallin myötä 88,65 %, mikä on merkittävä parannus entiseen. Käyttökustannuksia malli vähensi jopa 47,63 %, josta suurin osa oli apujäähdytyksen vähenemisen ansiota. Kuvasta 25 nähdään myös, että lämpökuorma on vain noin puolet kattilan tehosta. Tämä johtuu CHP-tuotannon ja turbiinin suurista häviöistä, jotka tapahtuvat matalilla kuormilla. Samoin kaukolämpöakun käyttötehoa ei ole laskettu mukaan lämpökuormaan.

Kun optimointimallin suorittamia simuloiteja alkutilanteessa verrataan toteutuneeseen apukattila ja -jäähdytystuotantoon, merkittävä huomio on, että optimointimalli ei päätyntä kertaakaan käyttämään apukattilaa. Toteutuneessa tuotantodatassa apukattilaa on jouduttu käyttämään melko paljonkin kyseisellä ajanjaksolla, kuten kuvasta 26 näkyy.



Kuva 26: Apukattilan ja apujäähdytyksen käyttö viikolla 25/2018

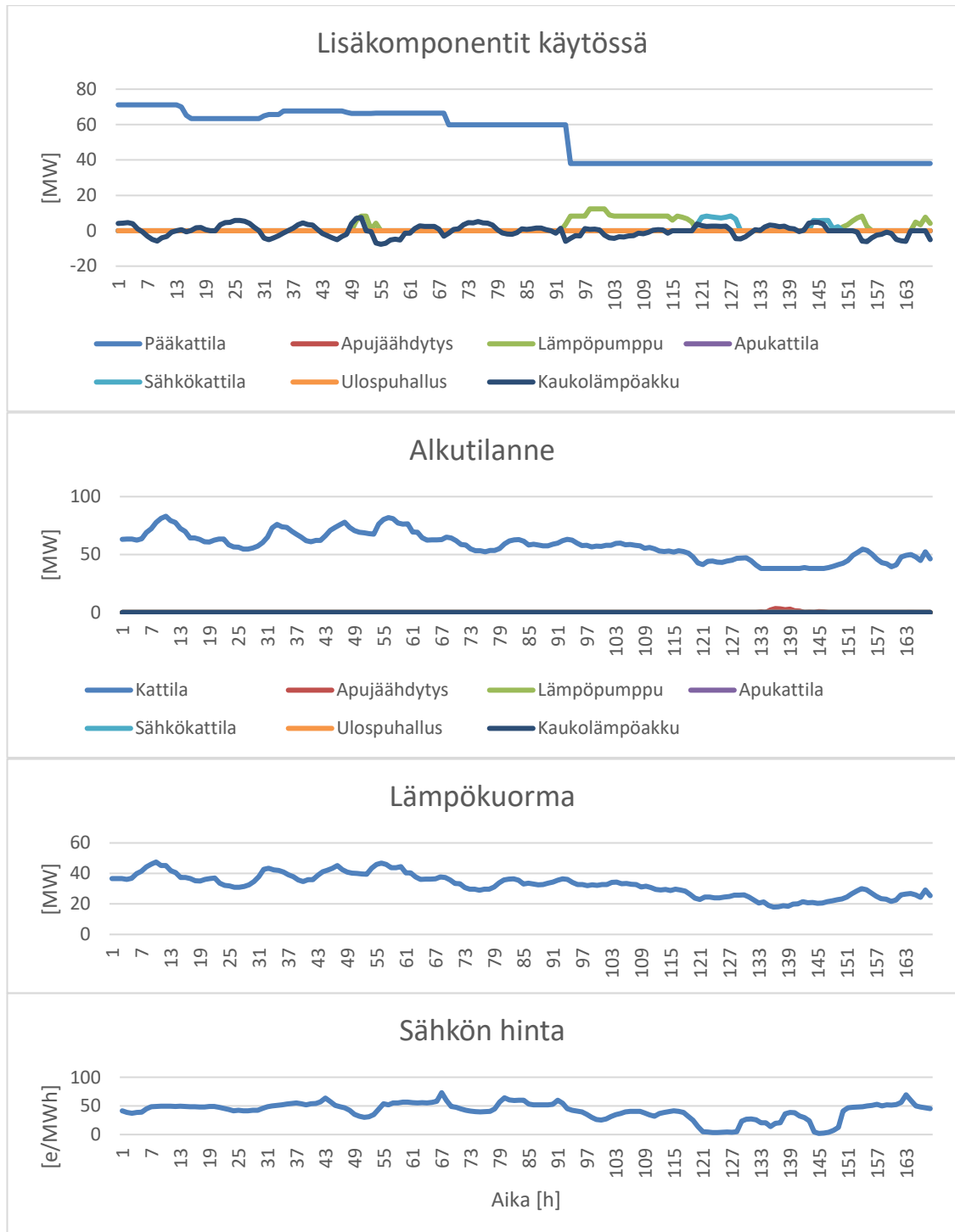
Kuvasta 26 nähdään, että simuloitujen tulokset vastaavat apujäähdytyksen osalta melko hyvin toteutunutta tuotantodataa tunteilla 0-75. Tunteilla 75-168 optimointiohjelma on kuitenkin päätyntä lisäämään CHP-tuotannon kuormaa apujäähdytystä käyttäen, eikä käyttämään apukattilaa, kuten toteutuneessa tuotannossa on tehty. Tämä päätös vähentää tuotantokustannuksia huomattavasti, sillä apukattilan käyttökustannukset ovat huomattavasti korkeammat kuin apujäähdytyksen. Se, miksi optimointimalli pystyy käyttämään apujäähdytystä apukattilan sijasta, johtuu kaukolämpöakun aktiivisemmasta käytöstä optimointimallissa. Toteutuneessa tuotannossa kaukolämpöakua ei olla käytetty kertaakaan ajanjakson aikana, jolloin olisi voitu välttyä kalliin apukattilan käytöltä.

Yhteenvedon voidaan todeta, että matalilla lämpökuormilla mallin tuomat hyödyt syntyvät apujäähdytyksen ja -kattilan käytön pienentämisestä ja niiden korvaamisesta muilla komponenteilla. Simuloitu alkutilanne parantaa nykyisen ajomallin tilannetta eliminoimalla apukattilan käytön kokonaan. Tämä vähentää sen käyttöä 1271 MWh, eli käytännössä poistaa öljykäyttöisen apukattilan käytön kokonaan. Lisäkomponenteilla simuloitaessa kaukolämpöakku, lämpöpumppu ja apujäähdytys ovat korvanneet apukattilan käytön kokonaan. Apujäähdytyksen käyttöön vaikuttaa toki lämpöennusteiden tarkkuus ja todellisessa ajotilanteessa inhimillisiä virheitä tapahtuu, mitkä saattavat vähentää esimerkiksi kaukolämpöakun käyttöä ja sitä kautta sähkön tuotantoa.

5.1.2 Keskisuuri kuorma

Vuoden 2018 datasta lokakuun lämpökuorma valikoitui parhaaksi kuukaudeksi kuvastamaan keskisuuria kuormia. Lokakuussa kuorma on noin 50 % maksimilämpökuormasta. Simuloinnit toteutetaan samalla tavalla kuin aikaisemmin, eli simuloidaan optimointiohjelmalla alkutilanne ilman lisäkomponentteja, jonka jälkeen lisäkomponentit lisätään malliin ja vertaillaan simuloitua tuloksia

keskenään. Lämpökuorman pysyessä paremmin CHP-tuotannon tehoalueella, on mallilla enemmän joustavuutta hyödyntää lisäkomponentteja. Lisäkomponenttien tuominen malliin ei kuitenkaan alueen lämmöntuotannon perusongelmaa poista, joka on lämpökuorman matala taso. Keski-suuren kuorman ajankohdaksi valittiin lokakuun viikko 41. Kuvassa 27 on vertailtu työssä tehdyn optimointimallin avulla simuloituja tuloksia alkutilanteessa ja lisäkomponenteilla.

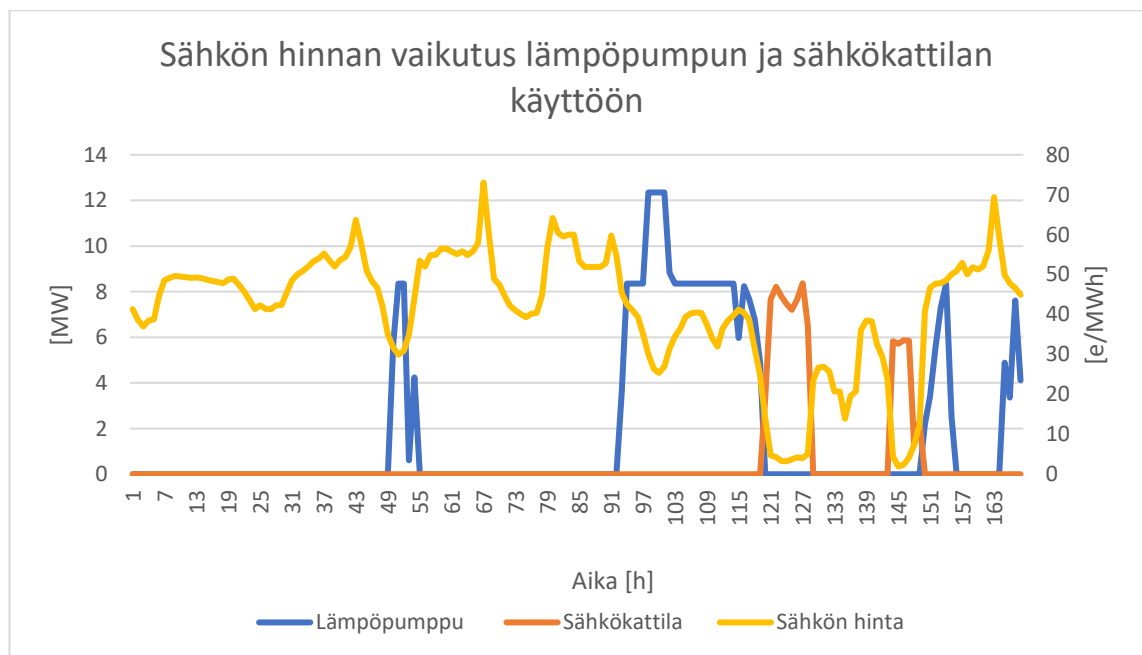


Kuva 27: Alkutilanteen ja lisäkomponenttien käyttö optimointiohjelmassa viikolla 41/2018

Kuvan 27 tuloksista nähdään, että CHP-laitoksen käytössä ei perustilanteen ja lisäkomponenttien välillä ole suurta eroa. Toki lisäkomponenteilla varustettu malli ajaa CHP-tuotantoa huomattavasti tasaisemmin, eikä reagoi yhtä paljoa sähkön hinnan muutoksiin. Suurin ero simuloinneissa tulee

kaukolämpöakun käytössä. Perustilanteessa operaattori ei ole käyttänyt kaukolämpöakua kertaakaan optimoitavalla viikolla, kun taas lisäkomponenteilla varustettu optimointiohjelma ajaa akkua hyvinkin aktiivisesti. Näin toimimalla hyödynnetään paremmin kaukolämpöakun mahdollis-
tama lisäsähkön tuotanto.

Sähkön hinta on hyvin alhaalla optimointihorisontin tunteilla 50-54, 93-128 ja 144-155. Näinä tunteina malli korvaa pääkattilan tuotantoa sähkökattilalla ja lämpöpumpulla. Malli hyödyntää lämpöpumpua herkemmin, koska sen tuotantokustannukset ovat alhaisemmat kuin sähkökattilan. Sähkökattila näyttäisi käynnistyvän mallissa tunteilla, jolloin sähkön hinta on alle 10 e/MWh. Malli käyttää sähkökattilaa mieluummin, sillä sähkökattilalla voidaan korvata CHP-laitoksen prosessi-
höyryn tuotantoa, mitä taas lämpöpumppu ei pysty korvaamaan. Lämpöpumppu on mallissa ky-
tettynä ainoastaan kaupungin kaukolämpöverkkoon, ja pystyy siis pelkästään säätämään kau-
kolämmöntuotantoa. Kuvassa 28 on esitetty sähkön hinnan vaikutus lämpöpumpun ja sähkökat-
tilan käyttöön.

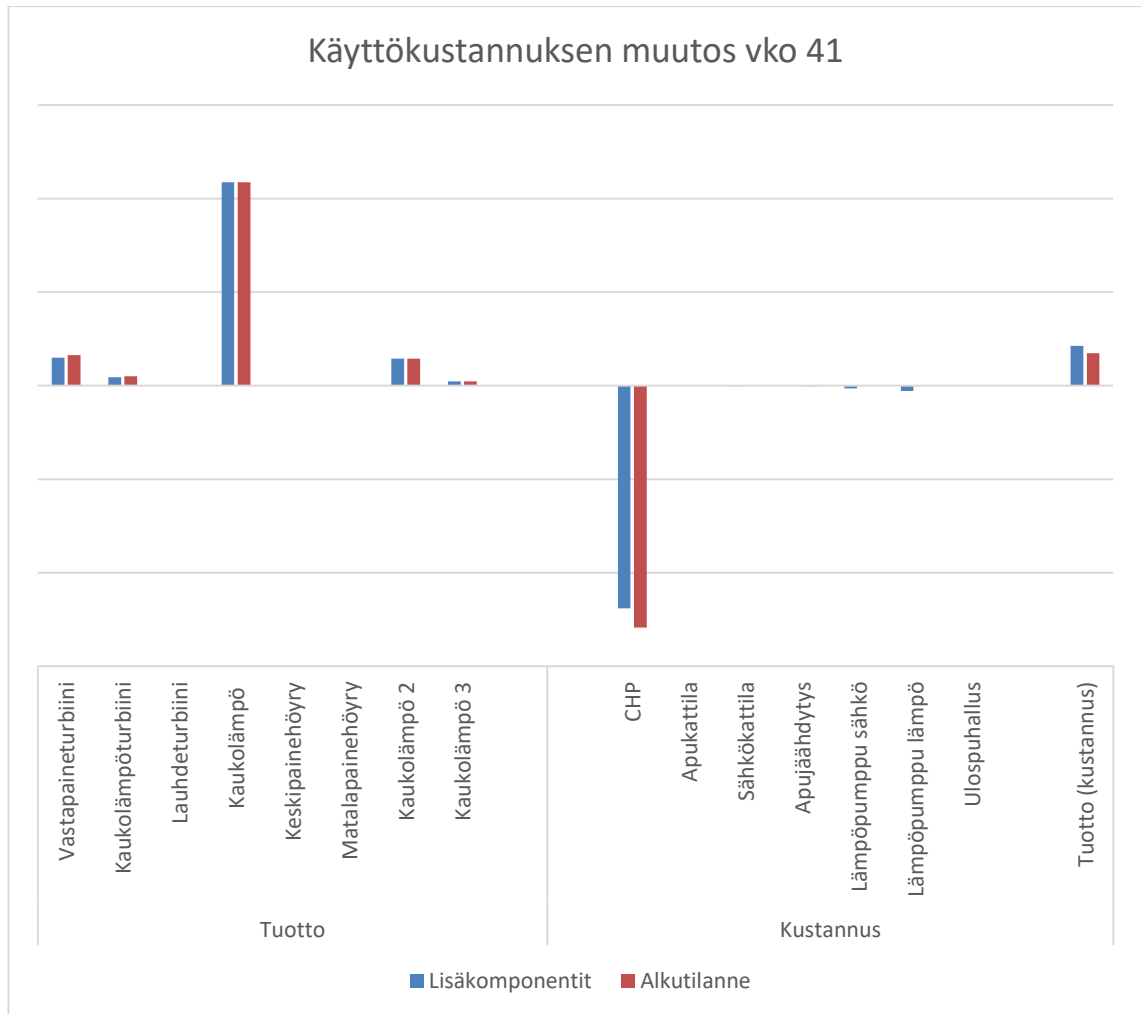


Kuva 28: Sähkön hinnan vaikutus komponenttien käyttöön viikolla 41/2018

Pääkattilalle asetettu kustannus tehon heilahtelulle näkyy lisäkomponenteilla ajetussa simuloinnissa, sillä sen tuotanto on huomattavasti tasaisempaa. Malli on päätenyt ajamaan pääkattilaa tasaisesti ja reagoimaan sähkön hinnan muutoksiin aktiivimalla lämpöpumppua ja sähkökattilaa halvan sähkön hinnan aikoihin. Samalla malli pystyy pienentämään polttoainekustannuksia ja reagoimaan muutoksiin lämpökuormassa muilla komponenteilla.

Alkutilanteessa apujäähdytystä on käytetty tunteilla 133-146, jolloin lämpökuorma on alhaisimmillaan. Tällöin lämpökuorma alittaa CHP-tuotannon minimikuorman, jolloin mallin on ajettava kustannuksen kanssa höyryä apujäähdyttimeen. Lisäkomponenteilla varustettu malli pystyy kasvattamaan kuormaa hetkellisesti ajamalla kaukolämpöakun täyteen, ja purkamalla sen kun lämpökuorma taas kasvaa. Tällä tavalla malli ajaa akkua koko optimointihorisontin ajan. Apujäähdytyksen väheneminen pienentää tuotantokustannuksia merkittävästi apujäähdytykseen sidotun kustannuksen poistuessa kokonaan ja sen korvautuessa sähkön myynnillä.

Viikolla 41 malli pienensi käyttökustannuksia 22,63 %. Parannus on huomattava, mutta mallin tuomat lisähyödyt vähenevät selvästi mitä suuremmille lämpökuormille siirrytään. Sähkön hinnalla on myös suuri vaikutus käyttökustannuksissa. Kun sähkö on halpaa, pystyy malli hyödyntämään lämpöpumppua ja sähkökattilaa tehokkaammin. Toisaalta sähkön hinnan ollessa hyvin korkea, pystyy malli hyödyntämään enemmän CHP-tuotantoa, jolloin sähkön myynti kasvaa ja käyttökustannukset pienenevät. Käyttökustannuksen muutos viikolla 41 on esitetty kuvassa 29.

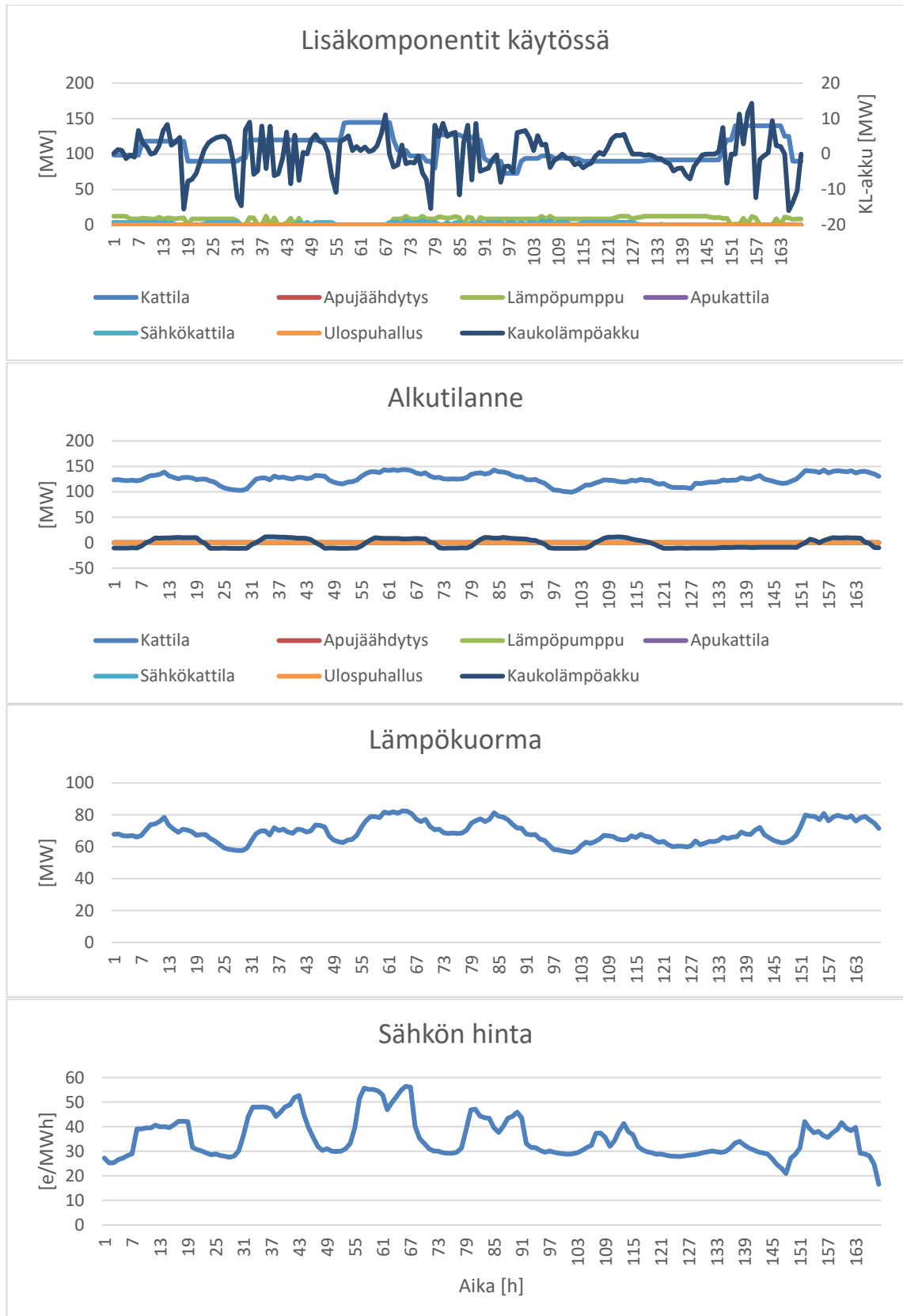


Kuva 29: Käyttökustannusten muutos komponenteittain viikolla 41/2018

Kuvasta 29 nähdään, että eniten käyttökustannusta pienentää pääkattilan pienempi käyttö, mikä parantaa tulosta. Pääkattilan kuormaa on lisäkomponenteilla simuloitaessa siirretty halvemman tuotantokustannuksen komponenteille, eli sähkökattilalle ja lämpöpumpulle. Pienemmän CHP-tuotannon takia lisäkomponenteilla varustettu malli tuottaa myös vähemmän sähköä, mutta säästö polttoainekustannuksissa voittaa sähkön myynnistä saadut tuotot. Lämmön myynnistä saadut tuotot eivät muutu, koska malli tuottaa aina lämpökuorman mukaisen määrän lämpöä.

5.1.3 Suuri kuorma

Optimointimallilla pystytään pienentämään lämmöntuotannon käyttökustannuksia parhaiten matalilla kuormilla, kuten kuvasta 21 voi nähdä. Korkealla lämpökuormalla CHP-laitos pystyy ope- roimaan jo melko korkeilla tehoilla, mutta lämpökuorma on silti liian alhainen nykyisellään. Tämän seurauksena hyödyt muista komponenteista jäävät pieniksi. Ainoastaan kaukolämpökalla pystytään ajoittamaan CHP-tuotantoa siten, että sähkön hinnan heilahtelut saadaan hyödynnettyä. Lämpökuorma alueella on korkeimmillaan tammikuusta helmikuuhun. Simulointeja varten valittiin tammikuun viikko 2, sillä lämpökuorma vaikuttaisi olevan korkein sillä viikolla.



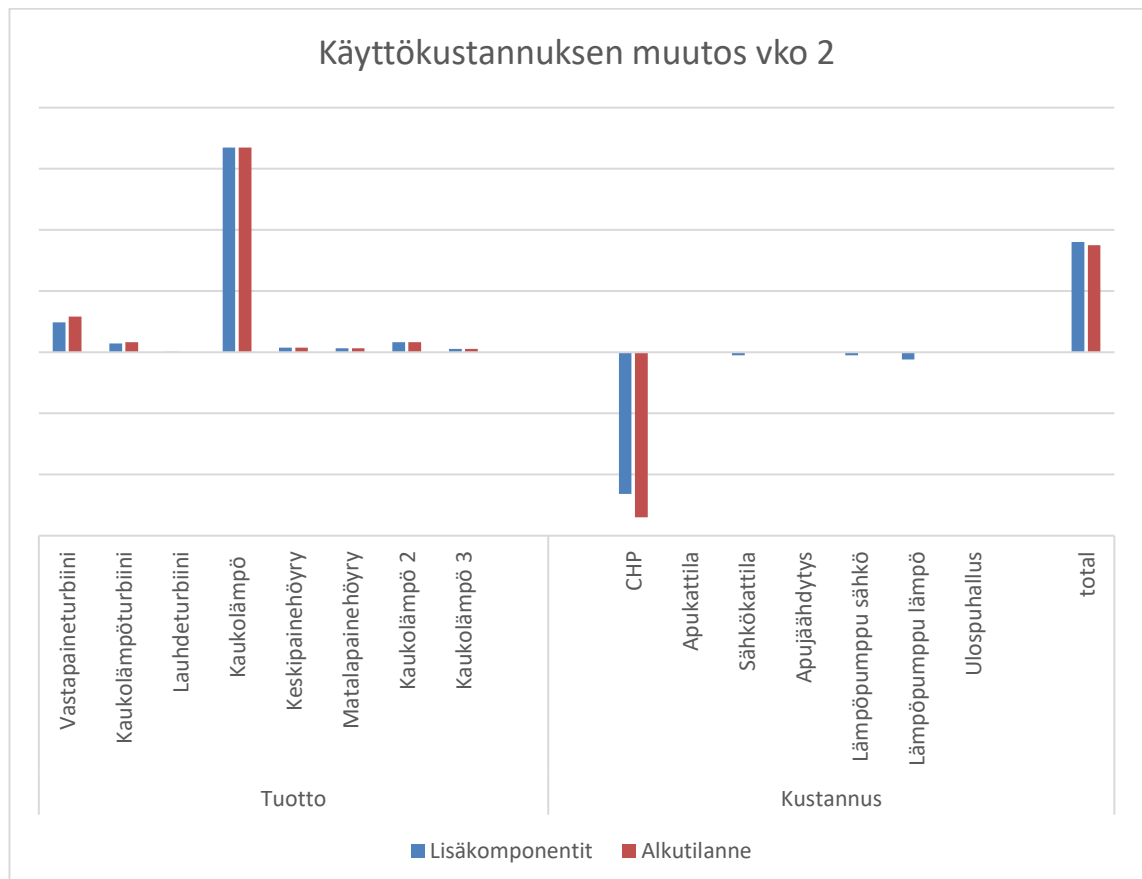
Kuva 30: Alkutilanteen ja lisäkomponenttien käyttö optimointiohjelmassa viikolla 2/2018

Kuvassa 30 on esitetty simuloitujen optimointimallien käyttö lisäkomponenteilla ja alkutilanteessa viikolta 2. Kuvassa 30 kaukolämpöakulle on lisätty oma asteikko oikeaan reunaan, jotta sen käyttäytyminen näkyisi paremmin kuvassa. Kuten aiemminkin, positiivinen kaukolämpöakun käyttö

kuvastaa lataamista ja negatiivinen purkamista. Molemmissa tilanteissa kaukolämpöakku on käytetty melko aktiivisesti sähkön hinnan mukaisesti. Kaukolämpöakku mahdollistaa suuremman lämpömäärän tuottamisen, kun sähkön hinta on korkea. Vastaavasti, kaukolämpöakku mahdollistaa CHP-tuotannon alhaisemman kuorman, kun sähkön hinta on alhainen, jolloin polttoainekustannukset pienenevät. Kummassakaan tapauksessa malli ei ole päätenyt käyttämään apujäähdytystä, sillä lämpökuorma on tarpeeksi korkea CHP-tuotannon pitämiseen peruskuormalla.

Lämpöpumppua optimointiohjelma on päätenyt käyttämään melko aktiivisesti. Lämpöpumppu käynnistyy aina, kun sähkön hinta on alhainen. Tällöin CHP-tuotannon polttoainekustannuksen ja sähkön myynnin erotus on korkeampi kuin lämpöpumpun sähkön ja hukkalämmön kustannus. Lämpöpumpun COP vaikuttaa suuresti mallin tuloksiin. Mallissa lämpöpumpun COP on 4, mikä tarkoittaa, että yhtä sähköyksikköä kohti pumppu tuottaa neljä yksikköä lämpöä. Toisin sanoen lämpöpumppu pystyy nostamaan hukkalämmön lämpötilaa melko pienelläkin sähkön määrällä. Alhaisen sähkön hinnan aikana malli on hyödyntänyt sähkökattilaa myös melko aktiivisesti.

Yhteenvedona voidaan todeta, että korkealla kuormalla lämpöpumppu ja kaukolämpöakku mahdollistavat parhaiten kustannusten pienentämisen ja energiatehokkuuden maksimoimisen. Kaukolämpöakulla pystytään myös paremmin reagoimaan muutoksiin sähkön hinnassa. Tilanne, jossa lisäkomponentit ovat käytössä, parantaa tulosta huomattavasti. Kustannusten pienentyminen ja energiatehokkuuden kasvu tulee CHP-tuotannon tehokkaammasta käytöstä. Lämpöpumppu mahdollistaa CHP-tuotannon kuorman alentamisen silloin kun myydystä sähköstä saadaan alhaisempi hinta, kuin mitä lämpöpumppu käyttää. Kaukolämpöakku tasaa yhdessä lämpöpumpun kanssa CHP-tuotantoa siten, että tuotanto pysyy mahdollisimman tasaisena ja tuotantokustannukset pidetään alhaisena. Kuvassa 31 on esitettyä käyttökustannuksen muutokseen vaikuttaneet komponentit viikolla 2.



Kuva 31: Käyttökustannuksen muutokseen vaikuttavat komponentit viikolla 2/2018

Kuten aiemminkin, käyttökustannuksen muutokseen optimoitavalla ajanjaksolla vaikuttaa eniten CHP-tuotannon pienentyminen ja sen korvaaminen tuotantokustannuksiltaan alhaisemmilla tuo-

tantomuodoilla. Pienempi CHP-tuotanto tarkoittaa pienempää sähkön myyntiä, mutta sähkön hintataso on optimoitavalla ajanjaksolla ollut niin alhainen, että lisäsähkön myynnistä ei olisi saatu parempaa tuottoa kuin siirtämällä tuotantoa muille komponenteille. Näillä muutoksilla mahdollistettiin 3,04 % käyttökustannuksen pienentäminen viikolla 2.

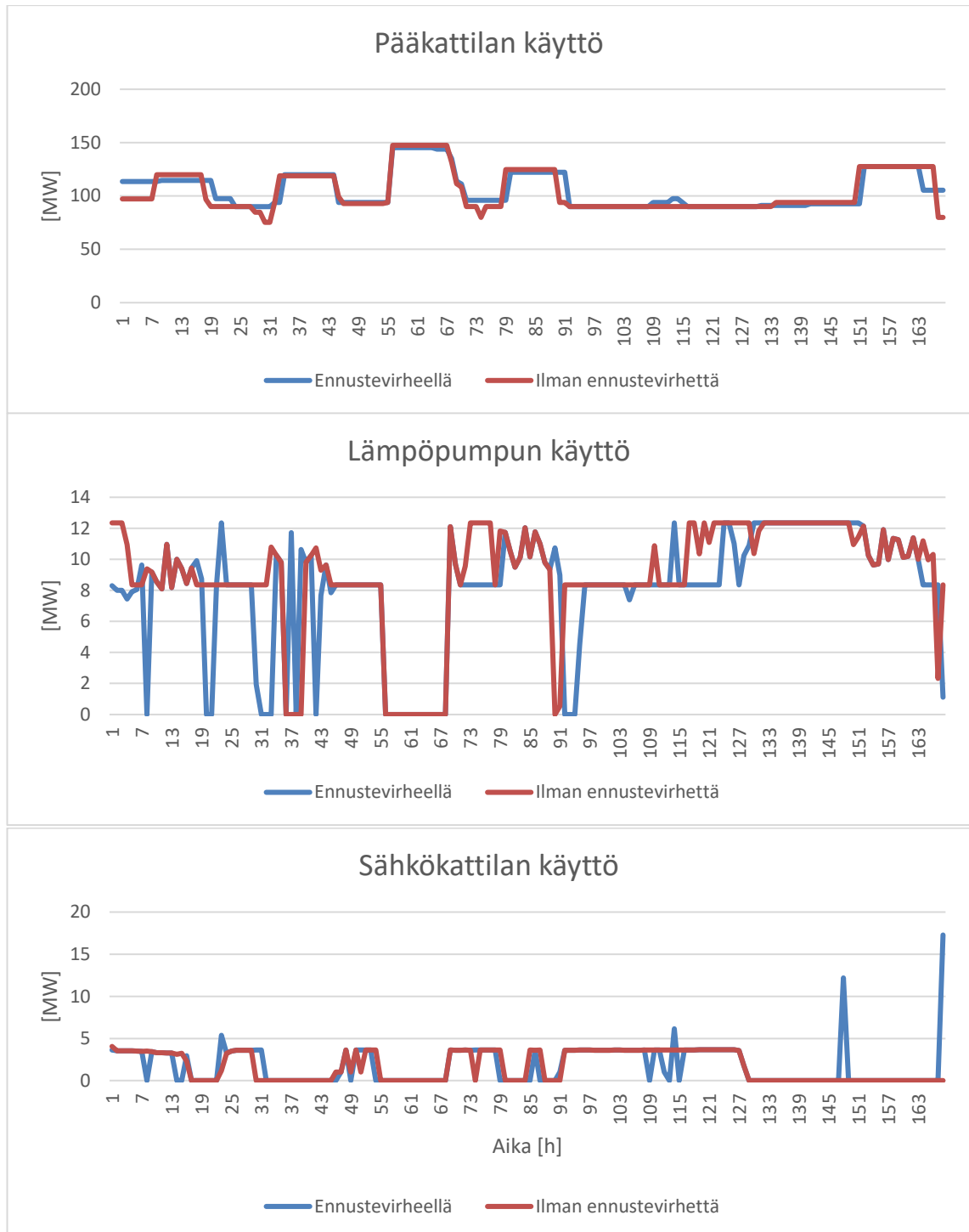
5.2 Ennustevirheen vaikutus mallin toimintaan

Tässä luvussa tarkastellaan mallin toimintaa, kun optimoinnissa käytettävän lämmöntuotantodatan ennustevirhe poistetaan ja käytetään toteutunutta lämpökuormaa mallissa. Aiemmissa ajoissa Kajaanin kaupungin kaukolämpökuorman tietoina on käytetty ennustetietoa. Ennustetiedon sijaan käytetään toteutunutta lämpökuormaa, jotta nähdään, miten herkkä malli on muutoksille lämpökuormassa ja kuinka muutos vaikuttaa eri komponenttien käyttöön. Käytännössä malliin sisäänmenoissa muuttuu Kajaanin kaukolämpöpiirin tiedot. Ennustevirhettä tarkastellaan tammikuulta, kesäkuulta ja lokakuulta yhden viikon ajalta. Sähkön hintana käytetään todellista toteutunutta sähkön hintaa, kuten edelläkin.

Taulukko 10: Ennustevirheen poistamisen vaikutus mallissa tarkasteluviikoilla

Vaikutus Kuukausi	Käyttökustannus (%)	Pääkattilan käyttö (%)	Sähkökattilan käyttö (%)	Lämpöpumpun käyttö (%)	Apujäähdytyksen käyttö (%)
Tammikuu	-1,46	-0,90	-4	8,73	0
Kesäkuu	-82,34	4,96	0	38,13	7,42
Lokakuu	-9,12	2,55	12,83	17,64	0

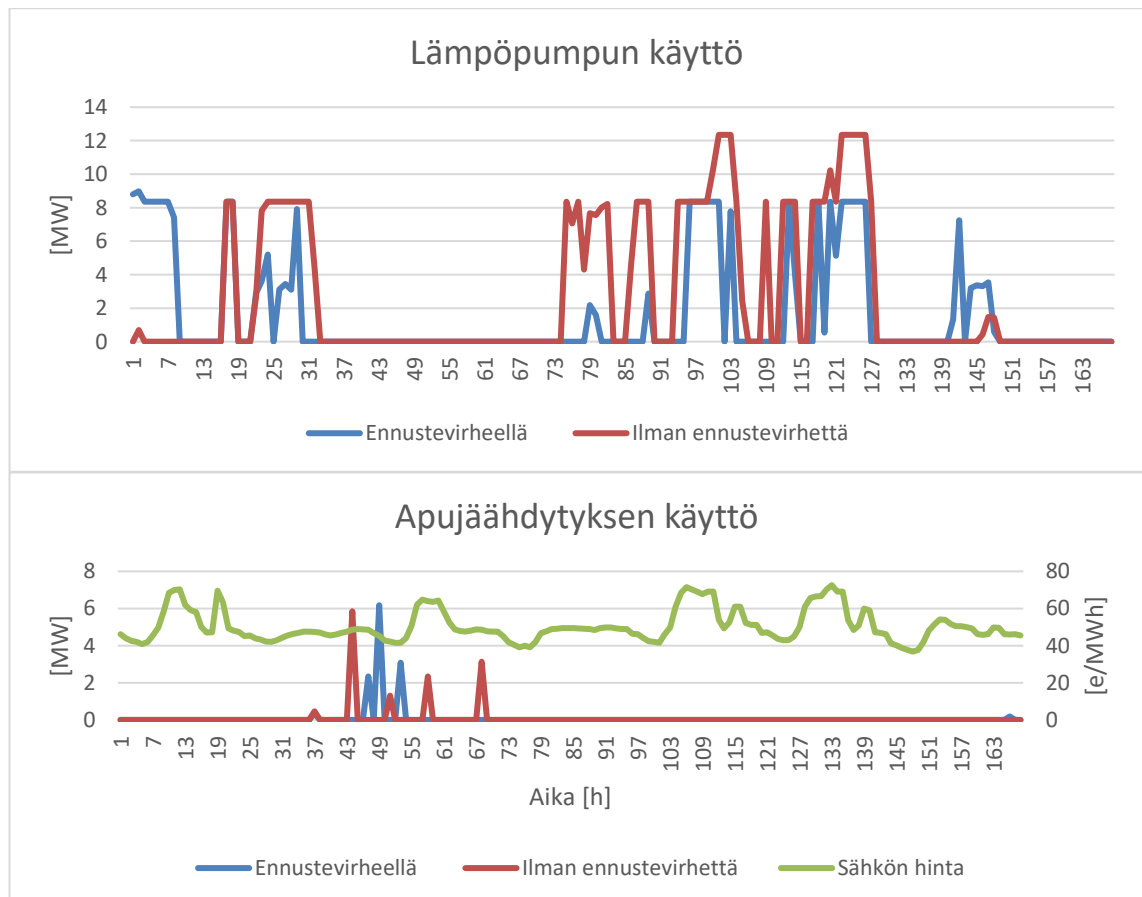
Tammikuun viikolla 2 käyttökustannuksen muutos on pieni, noin 1,46 %. Ennustevirhe on kyseisellä ajanjaksolla ainoastaan 0,87 %, mikä tarkoittaa, että ennustettu kuorma on melko hyvin toteutunut. Hyöty tällä ajanjaksolla tulee lämpöpumpun lisääntyneestä käytöstä. Lämpökuorma on tammikuussa korkea, mutta sähkön hinta on ollut melko matala. Tämä tarkoittaa, että mallin on ollut kannattavampaa siirtää tuotantoa lämpöpumpulle, joka käyttää vain vähän sähköä hukkalämmön lämpötilan nostamiseen. Kuvassa 32 on esitetty ennustevirheen sisältämän ja ennustevirheettömän optimointimallin suunnitteleman pääkattilan, lämpöpumpun sekä sähkökattilan käytön.



Kuva 32: Ennustevirheen poistamisen vaikutus viikon 2/2018 simulointiin

Kuvasta 32 nähdään, että ennustevirheen poistaminen tasaa tuotantoa ja poistaa turhat piikit lämmöntuotannossa. Pääkattila pystyy operoimaan tasaisemmin ja siirtämään lämmöntuotantoa paremmin lämpöpumpulle ja sähkökattilalle. Ennustevirheen poistaminen vaikuttaa eniten kaupungin kaukolämpöpiiriin, jolloin luonnollisesti lämpöpumpun tuotanto kasvaa, kun lämpökuorma kasvaa sen vaikutuspiirissä. Sähkökattilan käyttöön ennustevirheen poistaminen on vaikuttanut suotuisasti, sillä se on poistanut turhaa heilahtelua sähkökattilan lämmöntuotannossa. Ennustevirheen poistaminen on onnistunut myös vähentämään sähkökattilan käyttöä, jolloin turha apukattiloiden ajaminen korkean kuorman aikaan pienenee ja CHP-tuotannon tai lämpöpumpun osuus kasvaa.

Kesäkuussa viikolla 24 vaikutus käyttökustannukseen on todella iso, 82,34 %. Tämä johtuu pääasiassa siitä, että ennustettu lämpökuorma oli noin 15 % pienempi kuin toteutunut. Malli on korkeamman kuorman ansiosta pystynyt ajamaan pääkattilaa huomattavasti enemmän, jolloin sähköä on myös tuotettu ja myyty enemmän. Tämä nimenomaan osoittaa, kuinka herkkä malli on ennustevirheillä matalilla kuormilla. Lämpöpumppua malli on myös ajanut aktiivisesti kyseisen viikon halpojen sähkön hintojen seurauksena. Apujäähdytystä malli on päättänyt ajamaan enemmän kuin mallilla, jossa ennustevirheet olivat mukana. Tämä johtuu muutamista tunneista, jolloin sähkön hinta on ollut korkealla ja mallin on ollut kannattavaa siirtää lämmöntuotantoa lämpöpumpulta CHP-tuotannolle, vaikka tuotettu lisähöyry meneekin hukkaan lämpökuorman alhaisuuden takia. Kuvassa 33 on esitettyä ennustevirheen vaikutus lämpöpumpun ja apujäähdytyksen käyttöön viikolla 24.



Kuva 33: Ennustevirheen poistamisen vaikutus viikon 24/2018 simulointiin

Kuvasta 33 nähdään, että ennustevirheen eliminointi lisäisi hieman myös pääkattilan käyttöä apujäähdytyksen lisääntymisen kautta, mikä vastaa taulukon 9 tuloksia. Vaikka apujäähdytystä kasvatetaan hieman, paranee tulos huomattavasti koska pääkattilaa pystytään ajamaan hetkellisesti korkeammalla teholla ja lämpöpumppua hyödynnetään enemmän, jolloin kustannukset pienenevät.

Lokakuun viikolla 41 käyttökustannus on pienentynyt 9,12 %. Suurin hyöty ennustevirheen poistamisella näkyy CHP-tuotannossa. Pääkattila pystytään käyttämään huomattavasti enemmän, jolloin malli tuottaa sitä kautta enemmän sähköä, mikä parantaa mallin tulosta. Samoin sähkökattilan ja lämpöpumpun käyttö on lisääntynyt merkittävästi. Tämä johtuu alhaisista sähkön hinnoista ja kasvaneesta kuormasta, jolloin mallin on ollut kannattavaa siirtää tuotantoa kyseisille komponenteille.

Saatujen tuloksien perusteella voidaan todeta, että ennustevirheen poistamisella on huomattava vaikutus eri komponenttien käytön optimoinnin onnistumisessa. Ennustevirheen poistaminen osoittaa kuinka herkkää mallin toiminta on matalilla kuormilla. Matalilla kuormilla ennustevirheen poistaminen näkyy lämmöntuotannon käyttökustannuksen merkittävänä pienenenemisenä. Mikään

yksittäinen komponentti ei käyttökustannuksen pienemiseen vaikuta radikaalisti, mutta suurimpina tekijöinä ovat CHP-tuotannon ja sähköntuotannon lisääntynyt käyttö, kun ennustevirhe on ollut suuri. Pienillä ennustevirheillä käyttökustannus pienenee CHP-tuotannon korvaamisella halvan sähkön spot-hinnan aikoina lämpöpumpulla ja sähkökattilalla. Tuotettu sähkö pienenee, mutta tuotantokustannukset alenevat niin paljon, että se on kannattavampaa. Tulokset ovat linjassa aikaisemman kanssa, eli malli pienentää käyttökustannuksia eniten matalalla kuormalla ja vähiten korkealla kuormalla. Optimointimalli ei ota huomioon tasesähkön vaikutusta käyttökustannuksiin.

6. POHDINTA

Luvussa 5 esitetyt tulokset osoittavat, että eri komponenttien optimoinnilla ja automaattisella suunnittelulla voidaan saavuttaa merkittäviä hyötyjä lämmöntuotannon kannattavuuteen nyky menetelmään verrattuna. Työssä tehty optimointimalli kuvaa yksityiskohtaisesti Renforsin Rannan yritysalueen CHP-tuotannon, apukattilat, lämpöpumpun ja kaukolämpöakun siten, että sitä voidaan hyödyntää lämmönkäytön optimoinnissa tulevaisuudessa.

Optimointimallin todettiin toimivan alueen lämmönkäytön lyhyen ajan suunnittelussa sille annettujen tavoitteiden ja rajoitteiden puitteissa. Automaattista käyttöä mallilla ei vielä päästy testamaan, sillä ohjelmisto on vielä testivaiheessa. Mallin tulokset yksittäisille optimoinneille olivat hyviä. Hyödyt tulivat esille mallin siirtäessä lämmöntuotantoa sillä hetkellä alhaisimman tuotantokustannuksen omaavalle komponentille. Myös öljykäyttöisen apukattilan käyttö pystyttiin mallilla eliminoimaan käytännössä kokonaan, ja siirtämään sen tuotanto sähköiselle apukattilalle ja lämpöpumpulle.

Mallin kustannusfunktiolla pyrittiin minimoimaan lämmöntuotannon käyttökustannuksia tarkasteltavalla alueella. Optimointi pyrki lämpökuorman, sähkön hinnan ja polttoainehintojen perusteella reagoimaan muutoksiin sähkön hinnassa, ja siirtämään tuotantoa mahdollisimman halvalla lämmöntuotantokomponentille. Lämmöntuotantodatana käytettiin vuoden 2018 toteutunutta tuotantoa, kaupungin kaukolämpöpiiriä lukuun ottamatta, jossa käytettiin vuoden 2018 ennustetta. Ennustevirheiden ja esimerkiksi tasesähkön vaikutusta ei kuitenkaan otettu mallissa huomioon, muuta kuin tulosten tarkastelussa.

Optimointimallin todettiin parantavan lämmöntuotannon kannattavuutta, ja malli pienensikin joka kuukaudella käyttökustannusta nykykäytäntöön verrattuna. Optimointimallilla käyttökustannuksia pystytään vuositasolla pienentämään 5,63 % nykykäytäntöön verrattuna. Luku ei prosentuaalisesti vaikuta isolta, mutta numeroiksi muutettuna muutos on merkittävä. Parannus voisi olla huomattavasti parempikin, jos alueen lämpökuorma olisi suurempi kuin se nyt on. Tällöin CHP-tuotannon osuutta voitaisiin kasvattaa merkittävästi, jolloin tulos paranisi huomattavasti. Nykyisessä optimointimallissa ei oteta kuitenkaan huomioon investointi- tai kiinteitä kustannuksia. Kiinteitä kustannuksia ovat esimerkiksi lämpöhäviöt, pumppauskustannukset, sähkön siirron kustannukset sekä erilaiset kunnossapitokustannukset.

Luvun 5 tulosten perusteella suurin hyöty optimointimallista nykykäytäntöön verrattuna saadaan siirtämällä CHP-tuotantoa alhaisen sähkön hinnan aikoina komponenteille, jotka hyödyntävät sähköä lämmöntuotannossa. Nämä komponentit mallissa ovat sähkökattila ja lämpöpumppu, joita malli hyödynsikin aktiivisesti varsinkin matalan kuorman aikana. CHP-tuotannon siirtämisessä muille komponenteille on kuitenkin myöhemmissä tutkimuksissa otettava huomioon CHP-tuotannon huonompi hyötysuhde matalilla kuormilla. Tässä tutkimuksessa sitä ei otettu huomioon, joten tulos on parempi kuin se todellisuudessa olisi.

Erityisesti kaukolämpöakun ajoa optimointimalli paransi huomattavasti. Nykyisellään kaukolämpöakkuja käytetään manuaalisesti sähkön hinnan mukaan. Tämä ei ole tehokkain tapa hyödyntää kaukolämpöakkuja, jonka hyöty syntyy aktiivisesta lataamisesta ja purkamisesta. Optimointimalli käytti kaukolämpöakkuja aktiivisesti simuloinneissa, ja hyödynsi akun potentiaalin nostamalla ja laskemalla CHP-tuotannon kuormaa sähkön hinnan mukaisesti.

Simulointien perusteella voidaan todeta, että alueen lämmöntuotannon kannalta lämpöpumppu ja sähkökattila ovat hyviä vaihtoehtoja tuomaan joustoa alueen lämmöntuotantoon. Lämpöpumpulla pystyttäisiin hyödyntämään alueen hukkalämpö paremmin ja sähkökattilan avulla päästäisiin eroon kalliista ja ympäristölle haitallisesta öljystä. Molempien käynnistyskustannukset sekä käyttökustannukset ovat alhaiset. Lämpöpumpun käyttö optimointimallissa oli kuitenkin hyvin jaksottaista, mikä todellisuudessa saattaa lyhentää sen käyttöikä merkittävästi, kuten luvussa 2.1.4 mainittiin. Käyttökustannukset ovat suoraan riippuvaisia sähkön hinnasta, joten sähkön hinnan nousussa niiden kannattavuus laskisi.

Optimointimallissa käytetyt tiedot uusille komponenteille, eli lämpöpumpulle, hukkalämmölle ja sähkökattilalle, perustuvat täysin arvioihin, joten mallin antamia tuloksia voidaan hyödyntää vasta, kun oikeat käyttötekniset tiedot komponenteista saadaan. Todellisessa tuotannossa käytettynä ennustevirheiden vaikutus mallin toimintaan on todennäköisesti myös suuri. Optimointimalli tuottaa juuri sen, mitä lämpöennusteiden mukainen lämpökuorma on, eikä ota huomioon mahdollisia virheitä syötteissään. Ennustevirheet voivat lisätä esimerkiksi tasesähkökustannusta sekä apukattiloiden ja -jäähdytyksen käyttöä, jotka aiheuttavat merkittäviäkin lisäkustannuksia. Ennusteiden osuessa kohdalleen, tuottaa optimointimalli hyötyä nykykäytäntöön verrattuna merkittävästi.

Optimointimallin rakentaminen kaupallisella sovelluksella hankaloitti työn toteuttamista. Olemassa olevaan ohjelmaan ei muutoksia saa palautteen perusteella tehtyä yhden projektin aikana, joten komponentteja rakennettaessa oli sovellettava paljon, jotta ne saadaan sovitettua yhteen nykyisen ohjelman kanssa. Rajoitteiden rakentaminen malliin oli myös haastavaa juuri tästä syystä. Myös ohjelman käyttökoulutuksessa meni aikansa, koska se toteutettiin käytännössä täysin online-koulutuksina. Mallia olisi helppo jatkojalostaa tutkimalla esimerkiksi investointien kannattavuutta. Mallilla voitaisiin löytää optimaalisen kokoiset komponentit, jotka hyödyttävät juuri tutkittavan alueen lämmöntuotantoa parhaiten.

Enertop-optimointiohjelma mahdollistaa kuitenkin helpon tavan lisätä komponentteja olemassa olevaan sähkön- ja lämmöntuotannon kokonaisuuteen, ja testata, kuinka tilannetta voidaan parantaa. Varsinkin uusiutuvan energian lisääntyessä optimointityökalut ovat entistä tärkeämmässä roolissa energiantuotannossa. Mallia voisi nykyisestä parantaa esimerkiksi ottamalla paremmin huomioon koko lämpöjärjestelmä. Esimerkiksi lämpö- tai virtaushäviöitä ei mallissa tällä hetkellä oteta lainkaan huomioon, joiden avulla saatettaisiin päästä todellisempiin tuloksiin kuin nyt.

Työssä tehdyllä optimointimallilla on sovelluskohteita rajattomasti, sillä optimointiohjelman valmiisiin soluihin voidaan rakentaa lähes mikä tahansa energiaprosessi, jossa tapahtuu jokin muutos. Kyseistä ohjelmaa on hyödynnetty jo sellu- sekä terästeollisuudessa tuotannon optimoinnissa. Samanlaisen ohjelman toki voisi suunnitella avoimella lähdekoodilla, mutta kyseinen ratkaisu ei kuitenkaan isommissa kokonaisuuksissa ole kannattavaa, sillä mallista tulee helposti liian monimutkainen ja vaikea toteuttaa.

7. YHTEENVETO

Tässä tutkimuksessa tarkasteltiin mahdollisuuksia vähentää lämmöntuotannon käyttökustannuksia rakentamalla optimointimalli Renforsin Rannan yritysalueesta Kajaanissa. Lisäksi tutkittiin, millä tavoin lämmöntuotannon joustomahdollisuuksia voidaan parantaa. Tavoitteena oli selvittää, kuinka paljon nykykäytäntöä pystytään parantamaan optimoinnin avulla. Optimoinnin suorittamiseksi alueen lämmöntuotantorakenne mallinnettiin MILP ongelmaksi N-siden Enertop-optimiohjelmiaan. Lämmöntuotanto mallinnettiin yksityiskohtaisesti, ja siihen kuului CHP-tuotanto, apukattila sekä kaukolämpöakku. Myöhemmin malliin lisättiin hukkalämmön lähde, lämpöpumppu sekä sähkökattila, ja tarkasteltiin, kuinka se vaikuttaa alueen lämmöntuotantoon.

Optimointi suoritettiin yhden vuoden ajalta, keskittyen tuloksissa muutamaan viikkoon vuodesta, jolloin kuorma oli korkea, keskimääräinen ja matala. Tuloksia verrattiin toteutuneeseen käyttöön, sekä simuloituun alkutilanteeseen. Simuloitua alkutilannetta käytettiin, sillä mallin toiminta muokattiin siten, että se vastasi todellista tuotantoa. Simuloituun toteutuneeseen tuotantoon verrattuna optimointimalli madalsi käyttökustannuksia 5,68 % vuodessa, mitä voidaan pitää jo merkittävänä parannuksena. Säästö saavutettiin siirtämällä CHP-tuotantoa halvemmille tuotantomuodoille sähkön hinnan muutosten perusteella, ajoittamalla sähköntuotantoa paremmin sekä vähentämällä apukattilan ja -jäähdytyksen käyttöä. Suurimmat hyödyt mallilla saavutettiin lämpimään aikaan, jolloin lämpökuorma on matala. Säästöt riippuivat kuitenkin suurelta osin siitä, kuinka erikaisia sähkön ja lämmön kysyntäkäyrät ovat, sekä myös ennusteiden tarkkuudesta.

Lämmöntuotannon ennustevirheen poistamisen vaikutusta tutkittiin tuloksissa. Simuloinneissa käytettiin vuoden 2018 ennustettuja tietoja, mutta ennustevirhetarkastelua varten virhe poistettiin ja käytettiin toteutunutta tuotantoa. Ennustevirheen poistamisen vaikutus optimointimallissa näkyi sen herkkyytenä kuorman muutoksille, varsinkin matalalla kuormalla. Suurimmillaan ennustevirhe oli matalalla kuormalla noin 15 %, jolloin tulos parani jopa yli 82 %. Ennustevirheen poistaminen vähensi apujäähdytyksen ja -kattilan käyttöä merkittävästi sekä lisäsi CHP-tuotantoa, mikä vähensi käyttökustannuksia.

Työn merkittävimmät tulokset olivat suuri säästö käyttökustannuksessa, jos alueen lämmöntuotantorakenteeseen tuotaisiin lämpöpumppu ja sähkökattila, sekä parannettaisiin kaukolämpöakun toimintaa. CHP-tuotantoa voitaisiin järkevöittää tuottamalla lämpö halvan sähkön hinnan aikaan lämpöpumpulla ja sähkökattilalla, ja korkean sähkön hinnan aikaan hyödyntää CHP-tuotantoa maksimaalisesti. Alkutilanteeseen verrattuna malli parantaa huomattavasti kaukolämpöakun käyttöä korvaamalla manuaalisen käytön ainakin osittain optimiohjelman suunnitelmalla ajolla. Myös apukattilan ja -jäähdytyksen käytön määrää pystyttiin vähentämään merkittävästi.

Optimointimallia voitaisiin kehittää vielä merkittävästi. Malliin voisi esimerkiksi sisällyttää kiinteitä kustannuksia, kuten lämpöhäviöitä tai sähkön siirtokustannuksia. Näin kokonaiskustannukset voitaisiin ottaa tarkemmin huomioon, jolloin saatu tuloskin olisi realistisempi. Samoin CHP-laitoksen tarkempi mallinnus olisi jatkotutkimuksessa järkevää. Tässä tutkimuksessa CHP-laitoksen matalien kuormien huonoa hyötysuhdetta ei otettu huomioon tuloksia tarkasteltaessa, mikä parantaa tulosta. Itse optimiohjelmalla voisi kehittää lisää, jotta se toimisi paremmin lämpöverkon optimoinnissa. Esimerkiksi rajoitteiden lisääminen ohjelmaan on vielä tällä hetkellä hankalaa, ja lämpövarastosolu vaatisi enemmän toiminnallisuuksia toimiakseen realistisemmin.

Työtä voisi merkittävästi kehittää ottamalla laskuihin mukaan investointikustannukset, jolloin malliin lisättyjen lämmöntuotantokomponenttien todellinen kannattavuus saataisiin selville. Tässä tutkimuksessa komponentit luotiin malliin ilman mitään kustannuksia, mikä ei vastaa todellisuutta. Tulevaisuudessa linkittämällä malli pilvipalvelussa sijaitsevaan lämpöennustedataan, saadaan optimointimallin toiminta automatisoitua, ja hitaasta manuaalikäytöstä päästään eroon. Tehty malli todettiin kuitenkin toimivaksi ratkaisuksi lämmöntuotannon muuttuvien kustannusten alentamisessa ja eri investointivaihtoehtojen tarkastelussa.

LÄHTEET

Ahonen, T. (2018). Sähkökattilan investoinnin esiselvitys. Opinnäytetyö. Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Viitattu (9.4.2019).

Badyda, K., Bujalski, W., Niewiński, G. & Warchoń, M. (2011). Selected issues related to heat storage tank modelling and optimisation aimed at forecasting its operation. Archives of Thermodynamics, vol. 32, no. 3, s. 3-31. Viitattu (25.4.2019). Saatavissa: <https://search-proquest-com.libproxy.tuni.fi/docview/1321134441?pq-origsite=summon>

Bianchi, M. & De Pascale, A. (2012). Emission Calculation Methodologies for CHP Plants, Energy Procedia, vol 14, s. 1323-1330. Viitattu (25.3.2019)

Böttger, D., Götz, M., Lehr, N., Kondziella, H. & Bruckner, T. (2014). Potential of the Power-to-Heat Technology in District Heating Grids in Germany. Energy Procedia, vol. 46, s. 246-253. Viitattu (11.4.2019). Saatavissa: <https://www.sciencedirect-com.libproxy.tuni.fi/science/article/pii/S1876610214001957>

Carpaneto, E., Lazzeroni, P. & Repetto, M. (2015). Optimal integration of solar energy in a district heating network. Renewable Energy, vol. 75, s. 714-721. Viitattu (29.3.2019)

da Graça Carvalho, M. (2012) EU energy and climate change strategy. Energy, vol. 40, no. 1, s. 19-22. Viitattu (19.3.2019). Saatavissa: <https://www.sciencedirect-com.libproxy.tuni.fi/science/article/pii/S0360544212000175>

Davies, G.F., Maidment, G.G. & Tozer, R.M. (2016). Using data centres for combined heating and cooling: An investigation for London. Applied Thermal Engineering, vol. 94, s. 296-304. Viitattu (2.4.2019). Saatavissa: <https://www.sciencedirect-com.libproxy.tuni.fi/science/article/pii/S1359431115010388>

Depoorter, V., Oró, E. & Salom, J. (2015). The location as an energy efficiency and renewable energy supply measure for data centres in Europe. Applied Energy, vol. 140, s. 338-349. Viitattu (2.4.2019). Saatavissa: <https://www.sciencedirect-com/science/article/pii/S0306261914012367?via%3Dihub>

Dincer, I. & Rosen, MA. (2010). Thermal Energy Storage: Systems and Applications, John Wiley & Sons, Incorporated, Hoboken. Viitattu (4.4.2019). Saatavissa: <https://ebookcentral-proquest-com/lib/tampere/reader.action?docID=589273>

Energiateollisuus. (2019a). Kaukolämpöverkkoja lähes 15 000 km, Verkkosivu, Viitattu (18.3.19), Saatavissa: https://energia.fi/perustietoa_energia-alasta/energiaverkot/kaukolampoverkot

Energiateollisuus. (2019b). Lämmön ja sähkön yhteistuotanto on energiatehokasta, Verkkosivu, Viitattu (18.4.19), Saatavissa: https://energia.fi/perustietoa_energia-alasta/energiantuotanto/yhteistuotanto

Energiateollisuus. (2011). Kaukolämpöverkon pumppausjärjestelyt. Viitattu (16.7.2019). Saatavissa: https://energia.fi/files/673/SuositusL10_2011_Pumppaus.pdf

Fang, T. & Lahdelma, R. (2015). Optimization of combined heat and power production with heat storage based on sliding time window method. Applied Energy, vol. 162, s. 723-732. Viitattu (ei käytetty). Saatavissa: <https://www.sciencedirect-com.libproxy.tuni.fi/science/article/pii/S030626191501377X>

Fingrid. (2019a). Verkkosivu. Viitattu (8.5.2019). Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/#reserviveloitteet-ja-hankintakanavat>

Fingrid, (2019b), Verkkosivu, Viitattu (8.5.2019). Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/sahkomarkkinoiden-tulevaisuus/varttitase/>

Giuntoli, M. & Poli, D. (2013). Optimized Thermal and Electrical Scheduling of a Large Scale Virtual Power Plant in the Presence of Energy Storages. IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 4, no. 2, s. 942-955. Viitattu (29.3.2019). Saatavissa: <https://ieeexplore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6421000>

Gu, C., Xie, D., Sun, J., Wang, X. & Ai, Q. 2015, "Optimal operation of combined heat and power system based on forecasted energy prices in real-time markets", Energies, vol. 8, no. 12, s. 14330-14345. Viitattu (8.5.2019). Saatavissa: <https://doaj.org/article/d809f331945440e987715d991c86dd3d>

Huhtinen M., Kettunen A., Nurminen P., Pakkanen H. (2004). Höyrykattilateknikka. Helsinki. 379 s. Viitattu (1.11.2019)

Hynynen, H. (2018). Menolämpötilan alentaminen kaukolämpöverkon kehitystyössä, Aalto yliopisto, Diplomityö. Viitattu (26.3.2019).

International Energy Agency, (2018), Energy Policies of IEA Countries: Finland 2018. International Energy Agency, Paris. Viitattu (27.3.2019). Saatavissa: https://www-oecd-ilibrary-org.libproxy.tuni.fi/energy/energy-policies-of-iea-countries-finland-2018_9789264308220-en

Kainuun Voima Oy. (2019). Verkkosivu. Viitattu (14.3.2019). Saatavissa: <http://voimaa.kainuun-voima.fi/>

Kauranne, H., Kajaste, J., & Vilenius, M. (2013). Hydrauliteknikka. Sanoma Pro, Helsinki. Viitattu (1.11.2019)

Lahdelma, R. (2017). Process Integration and Energy Optimization: luentokalvot, Aalto yliopisto, Helsinki. Viitattu (20.9.2019)

Levihn, F. (2017). CHP and heat pumps to balance renewable power production: Lessons from the district heating network in Stockholm, Industriell ekonomi och organisation (Inst.), Hållbarhet och industriell dynamik, Skolan för industriell teknik och management (ITM) & KTH. Energy, vol. 137, s. 670-678. Viitattu (26.3.2019)

Lund, H., Werner, S., Wiltshire, R., Svendsen, S., Thorsen, J.E., Hvelplund, F., Mathiesen, B.V., (2014). 4th Generation District Heating (4GDH). Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems, Bio- och miljösystemforskning (BLESS), Akademin för ekonomi, teknik och naturvetenskap, Energiteknik & Högskolan i Halmstad. Energy, vol. 68, s. 1-11. Viitattu (29.3.2019). Saatavissa: <https://www-sciencedirect-com.libproxy.tuni.fi/science/article/pii/S0360544214002369>

Majanne, Y. & Vázquez Seisdedos, L. (2012). Sliding Back Pressure Control in Industrial CHP Plants. IFAC Proceedings Volumes, vol. 45, no. 21, s. 639-644. Viitattu (15.7.2019). Saatavissa: <https://www-sciencedirect-com.libproxy.tuni.fi/science/article/pii/S1474667016320444>

MathWorks. MATLAB. Viitattu (9.4.2019). Saatavissa: <https://se.mathworks.com/help/optim/ug/intlinprog.html>

Motiva. (2011). Energiatohokas tietokonesali. Viitattu (14.3.2019), Saatavissa: http://www.motiva.fi/files/4828/Energiatohokas_konesali.pdf

Paardekooper, S., Lund, R.S., Mathiesen, B.V., Chang, M., Petersen, U.R., Grundahl, L., David, A., Dahlbæk, J., Kapetanakis, I.A., Lund, H., Bertelsen, N., Hansen, K., Drysdale, D.W. & Persson, U. (2018). Heat Roadmap Europe 4: Quantifying the Impact of Low-Carbon Heating and Cooling Roadmaps. Aalborg Universitetsforlag. Viitattu (18.3.2019). Saatavissa: <https://vbn.aau.dk/en/publications/heat-roadmap-europe-4-quantifying-the-impact-of-low-carbon-heatin>

- Pariisin ilmastopöytäkirja, HE 200/2016 vp, (2016). Viitattu: (8.4.2019). Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/esitykset/he/2016/20160200.pdf>
- Phetteplace, G.E. (2013). District heating guide. Books24x7, I. & American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, ASHRAE, Atlanta, Ga. Viitattu (4.4.2019). Saatavissa: https://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpDHG00003/viewerType:toc//root_slug:district-heating-guide/url_slug:district-h-thermal-storage?=undefined&issue_id=kpDHG00003
- Pääkkönen, A., Joronen, T. (2019). Revisiting the feasibility of biomass-fueled CHP in future energy systems – Case study of the Åland Islands, Viitattu (26.3.2019)
- Raiko, R. (2007). Energiatalous: luentomoniste, TTY, Tampere. Viitattu (18.3.19)
- Raiko, R., Kirvelä, K., Tolvanen, H., Pääkkönen, A. (2006), Energiatekniikan perusteet: luentomoniste, TTY, Tampere. Viitattu (25.4.2019).
- Raiko M. & Mäki-Mantila E. (2005). Lämpöpumput ja niiden vaikutus sähköntuotantoon. Enprima. Viitattu (15.7.2019).
- Rong, A., Hakonen, H. & Lahdelma, R. (2009). A dynamic regrouping based sequential dynamic programming algorithm for unit commitment of combined heat and power systems. Energy Conversion and Management, vol. 50, no. 4, s. 1108-1115. Viitattu (1.8.2019). Saatavissa: <https://www.sciencedirect-com.libproxy.tuni.fi/science/article/pii/S0196890408004706>
- Rämä, M. & Mohammadi, S. (2017). Comparison of distributed and centralised integration of solar heat in a district heating system. Energy, vol. 137, s. 649-660. Viitattu (29.3.2019). Saatavissa: <https://www.sciencedirect-com.libproxy.tuni.fi/science/article/pii/S0360544217305078>
- Stenberg, S-Å. (2015). Tietokonesalien hukkalämmön hyödyntämismahdollisuuksien teknis-taloudellinen optimointi, Aalto-yliopisto, Diplomityö. (Viitattu 25.3.2019). Saatavissa: <https://aalto-doc.aalto.fi/handle/123456789/19242>
- Valor Partners Oy. (2016). Suuret lämpöpumput kaukolämpöjärjestelmässä. Energiateollisuus. Viitattu (14.3.2019). Saatavissa: https://energia.fi/ajankohtaista_ja_materiaalipankki/materiaalipankki/suuret_lampopumput_kaukolampojarjestelmassa_tutkimushanke.html
- Wahlroos, M., Pärssinen, M., Manner, J. & Syri, S. (2017). Utilizing data center waste heat in district heating – Impacts on energy efficiency and prospects for low-temperature district heating networks. Energy, vol. 140, s. 1228-1238. Viitattu (26.3.2019). Saatavissa: <https://www-science-direct-com.libproxy.tuni.fi/science/article/pii/S0360544217314548>
- Wahlroos, M., Pärssinen, M., Rinne, S., Syri, S. & Manner, J. (2018). Future views on waste heat utilization – Case of data centers in Northern Europe, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 82, s. 1749-1764. Viitattu (26.3.2019). Saatavissa: <https://www-science-direct-com.libproxy.tuni.fi/science/article/pii/S1364032117314314>
- Wang, H., Yin, W., Abdollahi, E., Lahdelma, R. & Jiao, W. (2015) Modelling and optimization of CHP based district heating system with renewable energy production and energy storage. Applied Energy, vol. 159, s. 401-421. Viitattu (29.3.2019). Saatavissa: <https://www-science-direct-com.libproxy.tuni.fi/science/article/pii/S0306261915010909>
- Wiltshire, R. (2015). Advanced District Heating and Cooling (DHC) Systems. Viitattu (9.5.2019). Saatavissa: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/tampere/reader.action?docID=2197877>
- XEMS13, Politecnico Di Torino, CADEMA Research Group. Verkkosivu. Viitattu (9.4.2019). Saatavissa: <http://www.cadema.polito.it/software>

Xydis, G. (2015). Wind energy integration through district heating. A wind resource based approach. Resources, vol. 4, no. 1, s. 110-127. Viitattu (11.4.2019). Saatavissa: <https://search-proquest-com.libproxy.tuni.fi/docview/1672868959?pq-origsite=summon>