



KAUKOLÄMPÖAKKUJEN JA -VARASTOJEN SÄÄTÖRATKAISUT SÄHKÖN- JA LÄMMÖNTUOTANNON OPTIMOIMISEKSI

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Energiatekniikan diplomityö

2023

Santeri Vainio

Tarkastajat: Professori Esa Vakkilainen

Tutkijatohtori Jussi Saari

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Energiajärjestelmät

Energiatekniikka

Santeri Vainio

Kaukolämpöakkujen ja -varastojen säätöratkaisut sähkön- ja lämmöntuotannon optimoimiseksi

Energiatekniikan diplomityö

2023

84 sivua, 25 kuvaa ja 4 taulukkoa

Tarkastajat: Professori Esa Vakkilainen ja Tutkijatohtori Jussi Saari

Avainsanat: kaukolämpö, kaukolämpöakku, lämpövarasto, säätöratkaisut

Diplomityö on tehty suunnittelu- ja konsultointiyhtiö AFRY Finland Oy:lle. Energiamurroksen myötä sähkön ja lämmön yhteistuotannon reaaliaikaisesta optimoinnista on tullut entistä tärkeämpää. Kaukolämpöjärjestelmän ja sitä tukevan kaukolämpöakun säätöratkaisulla on merkittävä vaikutus yhteistuotantolaitoksen toiminnan hallintaan. Työn tavoitteena on havainnollistaa AFRYn voimalaitosprosessien hallintaan kehitetyn Balance+ -tasesäätökonseptin ratkaisuiden toiminnallisuutta sähkön ja lämmön yhteistuotannossa. Työn säätöratkaisuiden tarkastelu keskittyy kaukolämpöjärjestelmän ja etenkin kaukolämpöakun säätöihin prosessin tehotasapainon kannalta.

Säätöratkaisuiden tarkastelu toteutetaan Simatic PCS7- prosessinohjausjärjestelmällä, jolla mallinnetaan yksinkertaistettu energia- ja massataseisiin perustuva yhteistuotantolaitoksen kaukolämpöjärjestelmän simulaattori. Säätöratkaisuiden toiminnallisuutta havainnollistetaan simuloimalla erilaisia yhteistuotantolaitoksen ajotilanteita ja tutkimalla prosessin olennaisimpien parametrien käyttäytymistä.

Työn tuloksena havaittiin, että luodulla simulaattorilla pystytään hyvin havainnollistamaan säätöjen ja prosessin toimintaa eri tilanteissa. Tuloksista havaittiin säätöjen reagoivan halutulla tavalla ja todellisen prosessin mukaisesti. Taselaskenta ja määritetyt rajoitukset ohjaavat kaukolämpökomponenttien toimintaa riittävän nopeasti ja tarkasti, jolloin prosessi pysyy suhteellisen stabiilina ja kaukolämpöjärjestelmään saadaan toimitettua riittävästi lämpöenergiaa. Lisäksi työssä havaittiin, että lämmön varastoinnin sovelluksilla saavutetaan merkittäviä hyötyjä yhteistuotantolaitoksen reaaliaikaisessa optimoinnissa. Vaikka todelliset kaukolämpöjärjestelmät ovat aina toisistaan eroavia sekä yksinkertaistettua simulaattoria monimutkaisempia, voidaan laadittua simulaattoria pitää toimivana säätöratkaisuiden demonstrointiin.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

School of Energy Systems

Energy Technology

Santeri Vainio

Control solutions for thermal energy storages to optimize electricity and heat generation

Master's thesis

2023

84 pages, 25 figures and 4 tables

Examiners: Professor Esa Vakkilainen and Post-doctoral researcher Jussi Saari

Keywords: district heating, thermal energy storage, control solutions

This thesis is made for an engineering and consulting company AFRY Finland Oy. Real-time optimization of the cogeneration of heat and electricity has turned out to be particularly important as the energy sector has faced changes. The control solutions of the district heating system and the thermal energy storage have a significant effect on the operation of the cogeneration plant. The main aim of the thesis is to demonstrate the functionality of controls based on Balance+ control concept developed by AFRY. The concept is developed for control of power plant processes, and it is based on balance calculations. The study focuses on the controls of the district heating system and the thermal energy storage regarding to the power balance of the system.

The study is carried out with the Simatic PCS7 process control system, which is used to model the simplified simulator of the cogeneration plant's district heating system based on the energy and mass balances. The functionality of the control solutions is demonstrated by simulating different operating situations of the cogeneration plant and analyzing the behavior of the most relevant parameters of the process.

As a result of the thesis, it was found that the simulator can be used to properly demonstrate the functioning of the controls and the process in different situations. Also, it was found that the controls react in the desired way and as in the real process. The balance calculation and defined limits control the components of the system accurately and quickly. The process remains relatively stable, and sufficient heat load can be supplied to the system. In addition, it was found out that with the applications of thermal energy storage, significant benefits in the real-time optimization of cogeneration can be achieved. Although the real district heating systems are always different from each other and more complex than a simplified simulator, the developed simulator can be considered functional for demonstrating of control solutions.

KIITOKSET

Tämä diplomityö on tehty AFRY Finland Oy:n toimeksiantona Tampereella syksyn 2022 ja kevään 2023 välillä.

Ensiksi haluan kiittää Antti Toivosta ja Jari Viitasta, jotka antoivat minulle mahdollisuuden diplomityön tekemiseen. Aihe oli haastava, mutta erittäin mieleinen. Uskon, että sain työn tekemisestä tärkeää kokemusta tulevaisuutta ajatellen.

Haluan myös esittää suuret kiitokset työn ohjaajalle Tomi Mönkköselle, jolta olen saanut tarvittavaa ohjausta työn tekemiseen ja arvokasta perehdytystä säätötekniikasta ja voimailtosprosesseista. Lisäksi haluan kiittää muita työkavereita, jotka ovat auttaneet tämän projektin parissa.

Koulun puolelta haluan kiittää professori Esa Vakkilaista työni tarkastamisesta sekä kurssien aikana kertyneistä opeista.

Erityiskiitokset opiskeluajan aikaisesta tuesta ja kannustuksesta Elinalle ja perheenjäsenille. Iso kiitos kuuluu myös opiskelukavereille. Opiskeluajasta jää tutkinnon lisäksi käteen paljon hyviä muistoja.

Tampereella 31.3.2023

Santeri Vainio

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset

c_p	ominaislämpökapasiteetti	[kJ/kg°C]
h	entalpia	[kJ/kg]
H	pumpun nostokorkeus	[m]
m	massa	[kg]
p	paine	[bar, Pa]
P	teho	[W]
q_m	massavirta	[kg/s]
q_v	tilavuusvirta	[m ³ /s]
Q	lämpöenergia	[J]
t	aika	[s, h]
T	lämpötila	[°C]
V	tilavuus	[m ³]

Kreikkalaiset

η	hyötysuhde	[-]
ϕ	lämpöteho	[W]
σ	rakennusaste	[-]
ρ	tiheys	[kg/m ³]

Vakiot

g	painovoimakiihtyvyys	9,81 m/s
-----	----------------------	----------

Alaindeksit

1	sisäänvirtaus
2	ulosvirtaus
akku	kaukolämpöakku
apuj	apujäähdytys
av	kaukolämpöakun vesi
h	höyry
k	kuluttajat
kl	kaukolämpö
KLV1	vastapainelämmönvaihdin
KLV2	väliottolämmönvaihdin
KLV3	reduktiolämmönvaihdin
kriit	veden kriittinen piste
kaukolämpövesi	
lv	lämmönvaihdin
meno	kaukolämmön menovesi
p	pumppu
pa	polttoaine
paluu	kaukolämmön paluuvesi
sys	systemi
t	turbiini
vo	väliotto
vp	vastapaine

Lyhenteet

aFRR	automaattinen taajuuden palautusreservi (Automatic Frequency Restoration Reserve)
CFC	Continuous Function Chart
CHP	sähkön ja lämmön yhteistuotanto (Combined Heat and Power)
EU	Euroopan unioni
FCR	taajuuden vakautusreservi (Frequency Containment Reserve)
HOB	lämpökeskus (Heat Only Boiler)
LHS	latenttilämmön varasto (Latent Heat Storage)
mFRR	manuaalinen taajuuden palautusreservi (Manual Frequency Restoration Reserve)
NPSH	pumpun vaatima imukorkeus (Net Positive Suction Head)
SHS	tuntuvan lämmön varasto (Sensible Heat Storage)
TCES	termokemiallinen energiavarasto (Thermochemical Energy Storage)
TES	lämpöenergiavarasto (Thermal Energy Storage)
VTT	Teknologian tutkimuskeskus

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Kiitokset

Symboli- ja lyhenneluettelo

1	Johdanto.....	10
1.1	Työn tausta	10
1.2	Työn tavoitteet, rajaukset ja toteutus	11
1.3	Työn sisältö ja rakenne.....	12
2	Energiamurros	13
2.1	Muutokset sähkön- ja lämmöntuotannossa	14
2.2	Energiamarkkinat	16
2.2.1	Lämpömarkkinat	17
2.2.2	Sähkömarkkinat	18
3	Kaukolämpöjärjestelmä	22
3.1	Kaukolämpö Suomessa	23
3.2	Kaukolämmön tuotanto.....	25
3.2.1	Lämpökeskukset	27
3.2.2	Yhteistuotantolaitokset	28
3.2.3	Muut tuottajat.....	32
3.3	Kaukolämpöjärjestelmän komponentit	34
3.3.1	Lämmönvaihtimet	34
3.3.2	Pumput ja verkon paine	36
3.3.3	Kaukolämpöakku	40
3.3.4	Reduktio.....	43
3.3.5	Apujäähdytys	44
3.4	Kaukolämpöverkosto ja jakelu.....	46
3.4.1	Kaukolämpöverkon meno- ja paluuveden lämpötila	47
3.5	Lämmön varastoinnin sovellukset kaukolämpöverkon hallinnassa	49
3.5.1	Lämmön varastointi kaukolämpöverkkoon	49

3.5.2	Lämmön varastointi kaukolämpöakkuun.....	51
4	Voimalaitosprosessien tasesäätökonsepti	52
4.1	Balance+	52
4.2	Säätöratkaisut	54
4.2.1	Kaukolämmön menoveden lämpötilasäätö	54
4.2.2	Kaukolämpöakun säädöt.....	54
5	Kaukolämpöjärjestelmän säätöratkaisuiden simulointi	56
5.1	Simatic PCS 7	56
5.2	Mallinnettava prosessi.....	58
5.3	Mallin toteutus	61
5.4	Simuloinnit ja tulosten tarkastelu	64
5.4.1	Turbiinin hätäpysäytys.....	65
5.4.2	Kaukolämpöakun lataus.....	67
5.4.3	Lämmöntuotannon kasvu.....	70
5.4.4	Sähköverkon taajuudentuenta	72
5.4.5	Lämmönkulutuksen kasvu ja verkon akkumulointi.....	74
6	Johtopäätökset	77
	Lähteet	80

1 Johdanto

Tämä diplomityö on tehty AFRY Finland Oy:n (myöh. AFRY) toimeksiantona. AFRY on Euroopan johtavia suunnittelu- ja konsultointiyhtiöitä muun muassa teollisuuden ja energian eri aloilla. Tässä työssä tutkitaan kaukolämpöjärjestelmän ja etenkin kaukolämpöakun säätöratkaisuja sähkön ja lämmön yhteistuotantolaitoksessa (CHP, Combined Heat and Power). Energiamurroksen myötä CHP-laitosten tuotannon reaaliaikainen optimointi on noussut entistä merkittävämpään rooliin. Tuotannon reaaliaikaisen optimoinnin ja kaukolämpöakun hyödyntämisen ansioista voidaan saavuttaa lukuisia hyötyjä esimerkiksi taloudellisuuden, toimintavarmuuden ja ympäristöystävällisyyden kannalta. Kehittyneet ja oikeanlaiset säätöratkaisut ovat järjestelmän optimaalisen toiminnan kannalta välttämättömiä. Tässä luvussa käsitellään työn taustaa, tutkimuksen tavoitteita, rajauksia ja toteutusta sekä työn sisältöä ja rakennetta.

1.1 Työn tausta

Energiasektorilla tapahtuneet muutokset ovat vaikuttaneet ensisijaisesti energian tuotantorakenteeseen sekä energiamarkkinoihin. CHP-laitoksen sähköntuotanto riippuu laitoksen rakennusasteen mukaisesti lämmöntuotannosta. Laitos toimii sekä sähkö- että lämpömarkkinoilla, jolloin tuotannon optimointi on ajoittain haastavaa. Kaukolämpöverkossa peruskuormalaitoksena toimivan laitoksen yksi tärkeimmistä tehtävistä on varmistaa riittävä lämmöntoimitus kaukolämpöasiakkaille. CHP-laitoksen omistavan energiayhtiön mieltymys on kuitenkin usein ajaa laitosta sähköntuotannon ehdoilla riippuen eri sähkömarkkinoiden teki- jöistä. Tällöin kaukolämpöjärjestelmään aiheutuu erilaisia häiriöitä, jotka johtuvat muun muassa epävakaasta lämmöntuotannosta. Sähkön- ja lämmöntuotannon välistä riippuvuutta saadaan kuitenkin vähennettyä lämmön varastoinnin sovelluksilla eli esimerkiksi kaukolämpöakulla. Kaukolämpöakun avulla saadaan myös nostettua lämmön toimitusvarmuutta.

Energiamurroksen myötä kaukolämpöjärjestelmän tehokkuudella ja toimivuudella on yhä merkittävämpi vaikutus. Kaukolämpöjärjestelmän säätöön lukeutuu kuitenkin monenlaisia haasteita. Lisäksi kaukolämpöakun integrointi osaksi järjestelmää vaatii siihen soveltuvia säätöratkaisuja. Kaukolämpöjärjestelmä sisältää epälineaarisuutta, hidasta dynamiikkaa ja

pitkiä viiveitä, jotka johtuvat verkon ja tuotantoprosessin laajuudesta. Nämä eri tekijät vaikeuttavat järjestelmän hallintaa. Kaukolämpöjärjestelmässä ensisijaisen tärkeää on tehotasapainon ylläpitäminen ja verkon paineen hallinta. Sääätöteknisesti on oleellista vastata prosessin muutoksiin tarpeeksi nopeasti, mutta välttää yliohejuukset ja suuret heilahtelut. Hyvin toimivat säädöt mahdollistavat CHP-laitoksen tuotannon tarkan ohjaamisen, jolloin halutut toiminta-arvot voidaan saavuttaa myös haastavissa tilanteissa. Lisäksi prosessin stabiili käyttäytyminen vähentää komponentteihin kohdistuvaa rasitusta ja pidentää toimilaitteiden huoltoväliä.

Energiatoteellisuudessa useat yritykset tarjoavat säätöratkaisuja voimalaitosprosessien hallintaan. Näihin sovelletaan sekä perinteisiä että monia erilaisia kehittyneitä säätömenetelmiä, joita ovat muun muassa malliprediktiiivinen säätö ja adaptiivinen säätö. Kehittyneiden säätömenetelmien avulla pystytään paremmin huomioimaan esimerkiksi prosessin pitkät viiveet ja ristikkäisvaikutukset. Tyypillisesti projektit ovat kertaluonteisia eikä säätöratkaisuja ole varsinaisesti tuotteistettu. Voimalaitokset myös eroavat prosessiteknisesti toisistaan, joten säätöratkaisut täytyy suunnitella aina tapauskohtaisesti. Tämän takia säätömenetelmien ja niiden sovellusten toimivuuden vertailu on haasteellista. Lisäksi CHP-tuotannon optimointiin on kehitetty erilaisia ohjelmistoja, jotka muun muassa ennustavat lämmönkulutusta, sähköntuotantoa sekä sähkön hintaa ja ohjaavat tuotantoa taloudellisemmaksi näiden perusteella. Nämä ohjelmistot eivät kuitenkaan tarjoa ratkaisua tuotannon reaaliaikaiselle optimoinnille, joka mahdollistetaan toimivien säätöratkaisuiden avulla.

AFRY on kehittänyt voimalaitosprosessien hallintaan Balance+ -säätökonseptin, jonka säätöratkaisut perustuvat taselaskentaan, adaptiivisiin prosessimalleihin ja malleja korjaaviin PI-säätimiin. Säätöratkaisuja on sovellettu menestyksekkäästi voimalaitoksilla erityisesti höyrykattilaprosesseihin. Säätökonseptin ratkaisuja on myöhemmin alettu hyödyntämään myös kaukolämpöjärjestelmän hallinnassa.

1.2 Työn tavoitteet, rajaukset ja toteutus

Tämän työn tavoitteena on tutkia ja havainnollistaa Balance+ -konseptin tasesäätöratkaisuiden toiminnallisuutta CHP-laitoksen kaukolämpöjärjestelmässä, jossa on kaukolämpöakku. Säätöratkaisuiden tarkastelussa keskitytään erityisesti kaukolämpöakun säätöihin. Tutkimusta varten tavoitteena on kehittää energia- ja massataseisiin perustuva CHP-laitoksen

kaukolämpöjärjestelmän simulaattori ja prosessin säätöpiiri Simatic PCS 7 -prosessinohjausjärjestelmällä. Diplomityön rajallisen laajuuden takia työssä tarkastellaan vain kaukolämpöjärjestelmän tehotasapainoon liittyviä säätöratkaisuja. Täten simulaattoriin sisällytetään vain ne komponentit, joilla on merkittävä vaikutus järjestelmän energiataseeseen. Simulaattoriin ei siis mallinneta kaukolämpöjärjestelmän painetasoon liittyviä komponentteja, kuten pumppuja, venttiilejä tai paisuntasäiliötä, jolloin säätöratkaisujakaan ei voida tutkia pumpun tai painetasojen osalta.

Laadittavan simulaattorin avulla mallinnetaan dynaamisesti erilaisia CHP-laitoksen ajotilanteita, jotka ovat joko usein toistuvia tai järjestelmän säädöille tyypillisesti haastavia. Tällaisia ovat esimerkiksi äkilliset häiriöt sekä lämmöntuotannon ja -kulutuksen muutokset. Simuloinneissa tarkastellaan olennaisimpien parametrien, kuten kaukolämmön menoveden lämpötilan, käyttäytymistä ajotilanteiden aikana. Simulointien avulla pyritään demonstroimaan säätöratkaisuiden toimintaa ja vaikutuksia laadittavan mallin prosessiin. Lisäksi havainnollistetaan lämmön varastoinnin merkitystä kaukolämpöjärjestelmän hallinnassa.

1.3 Työn sisältö ja rakenne

Työ koostuu kirjallisuusosuudesta sekä kokeellisesta osuudesta. Luvussa 2 johdatellaan työn aiheeseen käsittelemällä energiasektorilla tapahtuneita muutoksia, jotka osaltaan vaikuttavat kaukolämpöakun hyödyntämiseen ja säätöratkaisuiden merkittävyyteen kaukolämpöjärjestelmässä. Luvussa 3 käsitellään laajemmin aiheen toimintaympäristöä eli kaukolämpöjärjestelmää Suomessa, kaukolämmön tuotantoa, CHP-laitoksen kaukolämpökomponentteja, kaukolämpöverkoston sekä lämmön varastointia. Luvussa 4 esitellään lyhyesti Balance+ -konseptin toimintaperiaate ja simulaattorissa sovellettavat säätöratkaisut. Työn rajauksen takia säätötekniikan teoriaa ei käsitellä laajemmin. Luvussa 5 esitellään simulaattorin toteutusta sekä tarkastellaan ja analysoidaan simulointituloksia. Lopuksi tiivistetään työn tulokset sekä kerrotaan miten tutkimus vastasi sille asetettuihin tavoitteisiin. Lisäksi pohditaan mahdollisia jatkotutkimusaiheita.

2 Energiamurros

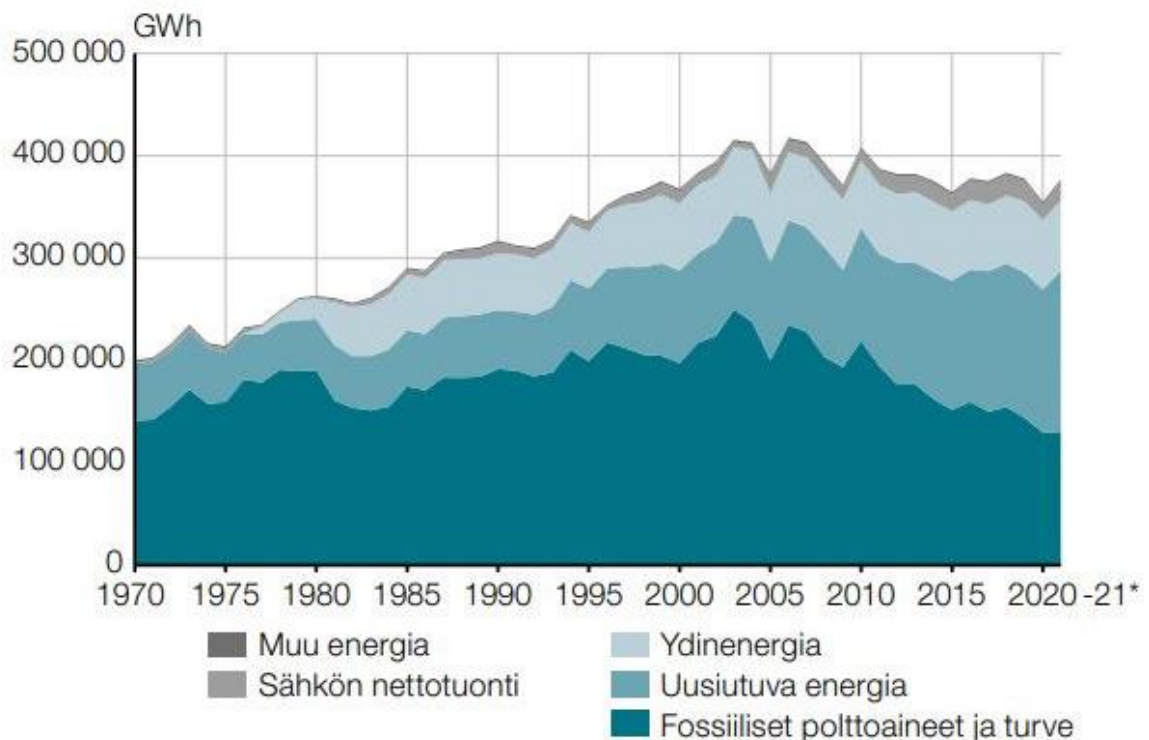
Tässä luvussa johdatellaan työn aiheeseen käsittelemällä yleisesti energiasektorilla tapahtuneita muutoksia ja niiden vaikutuksia sähkö- ja kaukolämpömarkkinoihin. Lisäksi pohjustetaan aihetta käsittelemällä energiamarkkinoiden tekijöitä, jotka vaikuttavat kaukolämpöäkin hyödyntämiseen sähkön- ja lämmöntuotannossa.

Energiasektori on voimakkaassa muutoksessa niin globaalisti kuin Suomessakin. Kasvihuonekaasujen aiheuttama ilmastonmuutos on asettanut haasteen energijärjestelmille. Ilmastonmuutoksen vastaisen työ on johtanut kansainvälisiin ilmastopöimuksiin, joista merkittävimpiin lukeutuu vuonna 2015 solmittu Pariisin sopimus, jonka tavoitteena on pitää maapallon keskilämpötilan nousu selvästi alle kahdessa asteessa suhteessa esiteolliseen aikaan (World Wide Fund for Nature 2022). Suomen energijärjestelmän toimintaa ohjaa pääasiallisesti Euroopan unionin (EU) ilmastopoliittikka, joka koostuu ensisijaisesti EU:n energiapaketista, päästökaupasta, uusiutuvan energian lisäämisestä ja sopeutumisstrategiasta. EU:n jäsenmaat päättävät omasta energiantuotantopalestiaan, mutta tuotantoon ja kulutukseen on kuitenkin asetettu sekä yhteisiä että kansallisia tavoitteita. Suomen merkittävimpiä tavoitteita on olla hiilineutraali vuonna 2035 (Valtioneuvosto 2022). Näiden päämäärien saavuttaminen vaatii poliittisten toimien ohella riittävää rahoitusta, yritysten ja kuluttajien ympäristöystävällisiä valintoja sekä muutokseen sopeutuvaa teknologiaa.

Pitkään valloilla ollut poliittisten päätösten vauhdittama ilmastonmuutoksen vastainen työ heijastuu erityisesti muuttuneena tuotantorakenteena energiasektorilla. Enimmäkseen fossiilisiin polttoaineisiin perustuvaa energiantuotantoa korvataan hiilineutraaleilla tuotantomuodoilla, jolloin energijärjestelmä siirtyy entistä hajautetumpaan sekä joustavampaan muotoon. Tätä siirtymäkautta, joka koostuu fossiilisten polttoaineiden luopumisesta, energiasektorin digitalisoitumisesta, tuotantorakenteen muutoksesta ja perinteisten liiketoimintamallien uudistamisesta, kutsutaan energiamurrokseksi. Merkittävään rooliin nousevat esimerkiksi energian toimitus- ja huoltovarmuus, kysyntäjousto, akkumineraalit, lämmitysmuodot, liikenneatkaisut ja varastointitekniikat. (Heiskanen et al. 2021, 124; Energiateollisuus 2022a.)

2.1 Muutokset sähkön- ja lämmöntuotannossa

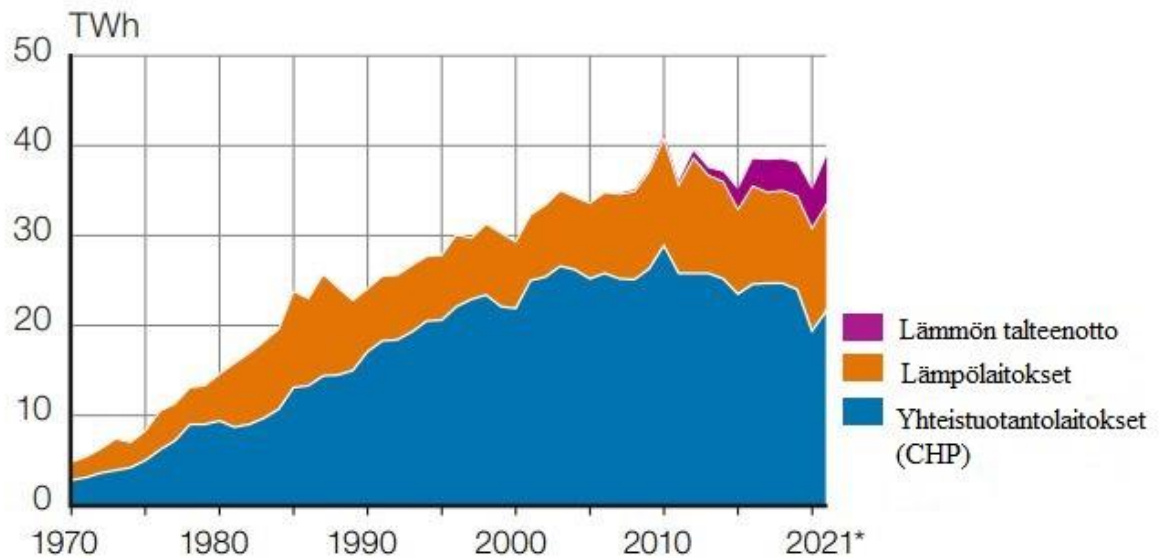
Energiasektorin muutokset vaikuttavat erityisesti eri energialähteiden hyödyntämiseen. Energialähteiden kulutusjakaumassa on havaittavissa selkeä muutos viimeisen vuosikymmenen aikana. EU:ssa uusiutuvien energialähteiden osuus on tasaisesti kasvanut vuoden 2004 9,6 prosentista hieman yli 20 prosenttiin. Suomessa uusiutuvan energian osuus viime vuonna oli 42 prosenttia, joka on näin ollen EU:n keskiarvoa selvästi suurempi. Kuvassa 1 on esitetty vuoden 2021 energian kokonaiskulutuksen jakautuminen energialähteittäin. Siitä voidaan havaita, että uusiutuvien energialähteiden osuus on kasvanut samalla, kun fossiilisten polttoaineiden osuus on merkittävästi pienentynyt. Sähkön- ja lämmöntuotannossa fossiilisista polttoaineista on merkittävässä määrin jo luovuttu, mutta kokonaiskulutuksen tilastoa heikentää liikenteen kulutus rakenne, jossa fossiiliset polttoaineet kattavat vielä suuren osan. Ydinenergian ja sähkön nettotuonnin osuudet kokonaiskulutuksesta ovat pysyneet melko samansuuruisina viime vuosikymmenen aikana. (Eurostat 2022; Tilastokeskus 2022, 42.)



Kuva 1: Energian kokonaiskulutus energialähteittäin Suomessa vuosina 1970–2021 (Tilastokeskus 2022).

Sähkön kulutus kasvaa jatkuvasti samalla, kun tavoitteet edellyttävät entistä hajautetumpaa energiajärjestelmää ja merkittäviä investointeja energiainfrastruktuuriin. Merkittävimmät tekijät kulutuksen kasvun taustalla ovat digitalisoitumisen edellyttämän datakeskuskapasiteetin kasvu, sekä liikenteen ja teollisuuden prosessien sähköistyminen. Perinteisesti sähkön tuotanto on toteutettu suuritehoisissa voimalaitoksissa, joista sähkö siirtyy kuluttajille pitkienkin etäisyyksien päähän. Energiamurroksen myötä tuotanto on muuttunut kohti hajautettua mallia, jossa useat suhteellisen pienitehoisetkin tuottajat ovat hajautettuna ympäri siirtoverkkoa. Tällöin lukuisien eri toimijoiden yhteensovittaminen verkon tasapainon säilyttämiseksi tuottaa haasteita. Lisäksi jatkuvasti lisääntyvät, sääriippuvaliset aurinko- ja tuuli-voima, luovat omat haasteensa, koska nykytekniikalla sähköä ei kyetä varastoimaan suuressa mittakaavassa. Toimiakseen sähköjärjestelmä tarvitsee riittävästi ennustettavaa sähköntuotantoa. (Energiateollisuus, 2022b.)

Pohjoisilla leveysasteilla on sähkön lisäksi runsaasti tarvetta myös lämmitykselle, joka on siten luonnollisesti iso osa suomalaista energiajärjestelmää. Yleisin lämmitysmuoto Suomessa on kaukolämpö, jota tuotetaan lähellä kuluttajia yleensä polttolaitoksissa joko yhdessä sähkön kanssa tai pelkästään lämpönä. Fingridin (2022a) sähköjärjestelmävision mukaan sähkön rooli tulee kuitenkin kasvamaan myös lämmityksessä. Kuten kuvasta 2 voidaan havaita, viime vuosina kaukolämmön tuotantotapoina ovat yleistyneet erilaiset lämpöpumput ja hybridiratkaisut, joissa vähintään osa lämmöstä tuotetaan ratkaisuilla, jotka eivät perustu polttoon. Lisäksi tuotannon kehityssuuntina kiinnostavat muun muassa aurinkolämpö ja kaksisuuntainen kaukolämpö, jossa asiakas toimii lämmöntuottajana. Esimerkiksi teollisuudesta, datakeskuksista ja jätevedestä saadaan hukkalämpöä, jota voidaan hyödyntää kaukolämpönä. Muussa tapauksessa häviöksi menevän lämmön hyödyntäminen on energiatehokkuuden ja taloudellisuuden lisäksi tärkeää myös ilmastonmuutoksen vastaisessa työssä. (Energiateollisuus 2022d.)



Kuva 2: Kaukolämmön tuotanto Suomessa vuosina 1970–2021. Laadittu lähteestä Statistic Finland (2022).

Kun lämmitysjärjestelmien tehostamismahdollisuuksia on tarkasteltu laajemmin viime aikoina, on oleelliseksi keinoiksi havaittu muun muassa kaukolämpöverkon lämpötilan laskeminen sekä lämmön varastointi. Esimerkiksi hukkalämpöjä saadaan paremmin hyödynnettyä, kun kaukolämpöverkon lämpötila on perinteistä matalampi. Lämmön varastointia hyödyntämällä voidaan puolestaan muun muassa pienentää huippukattiloiden ja kalliiden tuotantomuotojen tarvetta suuren kulutuksen aikana. Luvussa 3 käsitellään tarkemmin kaukolämpöjärjestelmää sekä lämmön varastointia ja sen hyötyjä. (Työ- ja elinkeinoministeriö 2022b.)

2.2 Energiamarkkinat

Energiamurros vaikuttaa oleellisesti myös energiemarkkinoihin, jotka voidaan karkeasti jakaa lämpö- ja sähkömarkkinoihin. Näihin Energiaviraston valvomiin markkinoihin sisältyy pääsääntöisesti polttoainekauppa sekä energian tuotantoon ja siirtoon liittyvä liiketoiminta. Tyypillisesti kaukolämpömarkkinat ovat paikallisia ja rajoittuvat alueelliseen kaukolämpöjärjestelmään, jolloin hinnoittelukin on aluekohtaista ja kiinteää. Sen sijaan sähkömarkkinat, jotka ovat kansainvälisiä, avattiin Suomessa asteittain kilpailulle vuonna 1995 voimaan tulleella sähkömarkkinalailla. Suomi toimii osana pohjoismaisia tukkusähkömarkkinoita,

joihin lukeutuu lisäksi Baltian maat. Tulevaisuudessa sähkömarkkinat ovat kuitenkin laajentumassa yhä enemmän eurooppalaisiksi. Muun muassa toimintavarmuuden edistämiseksi EU:n tavoitteena on kehittää eurooppalaiset sähkön sisämarkkinat, jota koskeva direktiivi sääntelee keskeisesti myös Suomen sähkömarkkinalainsäädäntöä. (Työ- ja elinkeinoministeriö 2022a; Työ- ja elinkeinoministeriö 2022b.)

2.2.1 Lämpömarkkinat

Suomessa lämpömarkkinat ovat sääntelemättömät sekä kilpaillut, jolloin kuluttajalla on mahdollisuus valita käyttämänsä lämmitysmuoto. Suomessa ei ole lämmitysmuotojen hinnoittelua koskevaa lainsäädäntöä. Markkinoilla saatavilla olevia lämmitysmuotoja ovat kaukolämmön lisäksi sähköön perustuvat kiinteistökohtaiset järjestelmät, joita ovat sähkölämmitys ja erilaiset lämpöpumput, sekä fossiilisiin ja uusiutuviin polttoaineisiin pohjautuvat kiinteistökohtaiset ratkaisut. Eri lämmitysratkaisuiden houkuttelevuuteen vaikutetaan monilla poliittisilla keinoilla, kuten veroilla, tuilla ja päästönohjauksella. (Energiateollisuus 2022e.)

Kilpailu lämmitysmuotojen välillä on kiristynyt viime vuosina. Pitkään suosituimpana lämmitysmuotona toiminut kaukolämpö on saanut kilpailijoita johtuen eri tuotantomuotojen teknologisesta kehityksestä, polttoainevalikoiman rajoittumisesta ja päästöoikeuksien hinnan voimakkaasta noususta. Lisäksi asiakkaita on enenevässä määrin alkanut kiinnostamaan oma hiilineutraali tuotanto sekä kustannusten ennustettavuus. (Työ- ja elinkeinoministeriö 2022b.)

Tuoreen AFRYn tekemän kaukolämpöselvityksen (2022) mukaan suomalainen tiheillä kaupunkialueilla jo olemassa oleva kaukolämpöjärjestelmä osoittautuu kuitenkin yhteiskunnan kannalta halvimmaksi ja tehokkaimmaksi keinoksi, jotta hiilineutraalisuustavoitteet saavutettaisiin. Kaukolämmön merkittävänä etuina ovat erilaisten energiavirtojen hyödyntäminen, mahdollisuus energian varastointiin ja potentiaali nettonegatiivisiin päästöihin, jos biomassan poltossa vapautuva hiilidioksidi otetaan talteen. Lisäksi sähkön ja lämmön yhteistuotanto tukee samalla myös sähköjärjestelmää. Sen sijaan kiinteistökohtaiset lämmitysmuodot lisäävät sähkönkulutusta etenkin hetkinä, jolloin sähkönkulutus on jo ennestään suurta. Näiden yleistyminen kasvattaa jo olemassa olevaa huolta sähkön riittävydestä. Laajempi

siirtymä kiinteistökohtaisiin ratkaisuihin olisi myös vaikea peruuttaa, koska kaukolämmön kustannustehokkuus perustuu pääasiassa asiakkaiden suureen volyymiin. (AFRY 2022.)

Nykymallina Suomessa on enimmäkseen käytössä niin kutsuttu integroitu kaukolämpöyhtiörakenne, jossa tuotanto, jakelu ja myynti ovat keskitettyinä samaan yhtiöön. Näin ollen kaukolämmön hinnan määrää paikallinen toimija, jolla on verkkonsa alueella luonnollinen monopoli. Myös kolmannet osapuolet voivat tuottaa lämpöä kaukolämpöverkkoon, mikäli he täyttävät liittymisehdot ja pääsevät sopimukseen kaukolämpöyhtiön kanssa. Lähes kaikki kaukolämpöyritykset ovatkin valmiita ostamaan lämpöä osapuolilta, joilla on tarjolla erilaisia hukkalämpöjä. Perinteisesti kaukolämmön toimitusvarmuus, joka on tärkeä markkinatekijä, on ollut erittäin hyvä. Kaukolämpöyhtiöiden näkökulmasta se on oleellista säilyttää, vaikka tuotantorakenne muuttuisi. (Ramboll 2021.)

2.2.2 Sähkömarkkinat

Suomen sähköjärjestelmä, joka toimii osana pohjoismaista yhteiskäyttäjärjestelmää, koostuu voimalaitoksista, kantaverkosta, suurjännitteisistä jakeluverkoista, jakelu- ja alueverkoista sekä kuluttajista. Yhteispohjoismainen järjestelmä on lisäksi kytketty tasasähköyhteyksillä Keski-Euroopan järjestelmään. Suomessa kantaverkkoa ylläpitää Fingrid Oyj, jonka vastuulla on myös käytön suunnittelu, tasepalvelu, kantaverkon valvonta, rakentaminen ja kehittäminen sekä sähkömarkkinoiden toiminnan edistäminen. Suurjännitteiset jakeluverkonhaltijat, joita on Suomessa vajaa 10, yhdistävät jakeluverkot kantaverkkoon. Jakeluverkkojen ylläpidosta vastaa yhteensä noin 80 sähköverkkoyhtiötä. (Fingrid 2022b.)

Pohjoismaiset sähkömarkkinat koostuvat useista toisiinsa kytköksissä olevista markkinoista, jotka jakautuvat tukku- ja vähittäismarkkinoihin. Yksityiset pienkuluttajat ostavat sähköä myyjiltä ja välittäjiltä vähittäismarkkinoilta. Sähkön tukkumarkkinoilla sen sijaan kauppaa käyvät sähkön tuottajat ja sähkön suuret kuluttaja- ja välittäjäyhtiöt. Pohjoismaissa sähkön tukkumarkkinat ovat keskittyneet Nord Pool -sähköpörssiin, jossa kauppaa käydään useilla eri markkinoilla. Keskeisimpänä näistä ovat Elspot-vuorokausimarkkinat, jossa päivittäin kaupataan tulevan vuorokauden jokaiselle tunnille tarvittava sähköntuotanto kattamaan kysynnän tarpeet. Tarjousten perusteella Nord Pool laskee aggregoidut kysyntä- ja tarjontakäyrät, joiden leikkauspiste määrää sähkön spot-hinnan. Päivänsisäiset Elbas-markkinat täydentävät kysynnän ja tarjonnan tasapainoon tuntikohtaisesti, jos näissä on muutoksia

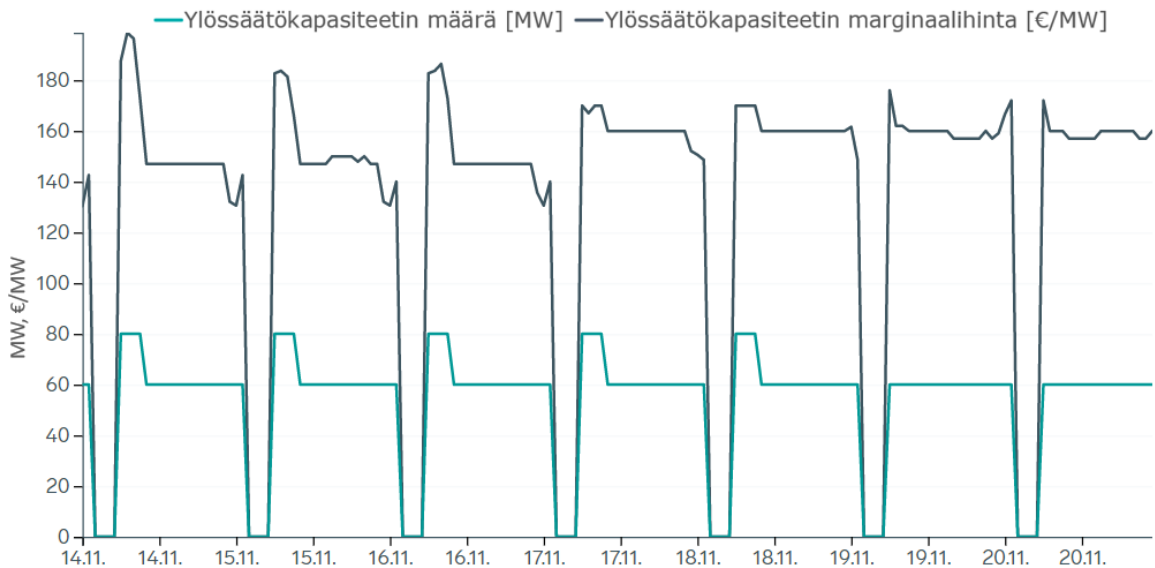
aiempiin määriin. Fyysisten sähkötuotteiden lisäksi kauppaa käydään myös johdannaismarkkinoilla erilaisilla finanssituotteilla, kuten futuureilla, termiineillä ja optioilla. Tarve näille syntyy markkinatoimijoiden riskienhallinnasta sähkön hintavaihteluiden suhteen. Johdannaistuotteiden toimitukseen ei sisälly fyysistä sähköä, mikä mahdollistaa erilaisten spekulatiivisten toimijoiden osallistumisen kyseisille markkinoille. (Haakana et al. 2017, 409; Nord Pool 2022.)

Elspot- ja Elbas-markkinoiden tukena ovat vielä kantaverkkoyhtiöiden hallinnoimat säätösähkö- ja reservimarkkinat. Sähköverkon on oltava jatkuvasti tasapainossa, joten tuotannon täytyy joka hetki vastata kulutusta. Tuotannon ja kulutuksen suhteesta kertoo sähköverkon taajuus, joka pyritään pitämään 50,0 Hz:n tasapainotilassa. Tehotasapainon ylläpidon keinot ovat keskittyneet säätösähkö- ja reservimarkkinoille, joiden kautta voidaan hallita taajuuden primääri- ja sekundäärisäätöä. Fingrid hankkii ylläpitämiltään markkinoilta reservejä, joita vaaditaan käyttötunnin aikaisten poikkeamien hillitsemiseen. Reservit ovat voimalaitoksia, kulutuskohteita ja energiavarastoja, jotka kykenevät muuttamaan tehoaan tarpeen mukaan (Fingrid 2022c.)

Taajuusohjattu käyttö- ja häiriöreservi (FCR-tuotteet) ovat taajuudenmuutoksista aktivoituvia vakautusreservejä taajuuden primäärisäätöön. Taajuusohjatun käyttöreservin on kyettävä symmetrisesti sekä ylös- että alassäätöön. Ylössäätö tarkoittaa sähkön kulutuksen vähentämistä tai tuotannon lisäämistä. Alassäädöllä puolestaan tarkoitetaan sähkön kulutuksen lisäämistä tai tuotannon vähentämistä. Häiriöreservi on jaettu erillisiin tuotteisiin, joissa riittää mahdollisuus vain toispuoleiseen säätöön. Taajuusohjattu käyttöreservi pyrkii pitämään taajuuden normaalialueella 49,9–50,1 Hz. Mikäli taajuus poikkeaa normaalialueeltaan, taajuusohjattu häiriöreservi pyrkii pitämään poikkeaman tasapainotilasta korkeintaan 0,5 Hz:n suuruisena. Sähköverkon taajuuden sekundäärisäätöön käytetään automaattista (aFRR) ja manuaalista (mFRR) taajuuden palautusreserviä. Automaattisen taajuuden palautusreservin aktivointi perustuu keskitetysti pohjoismaisen synkronialueen taajuuspoikkeamaan ja toteutuu kantaverkkoyhtiön lähettämän tehonmuutossignaalin perusteella 10 sekunnin välein. Manuaalinen taajuuden palautusreservi aktivoidaan nimensä mukaisesti manuaalisesti. (Fingrid 2022c.)

Fingrid edellyttää reservien ylläpitoon osallistuvilta toimijoilta tuotteesta riippuen tiettyjä teknisiä vaatimuksia, jotka tulee osoittaa erilaisilla säätökokeilla. Voimalaitosyksikön lukuisilla säätöratkaisuilla on merkittävä vaikutus teknisten vaatimusten täyttymiseen.

Vaatimukset liittyvät muun muassa säädön kokoon ja aktivoitumisaikaan. Esimerkiksi aFRR-tuotteen vähimmäiskoko on 1 MW ja aktivoitumisaika enintään 5 minuuttia. Reservitoimittajat antavat tuntimarkkinoille tarjouksiaan, joista he saavat kapasiteettikorvauksen lisäksi erillisen energiakorvauksen toteutuneiden säätöjen mukaisesti. Luonnollisesti voimalaitosten taloudellisesta näkökulmasta on oleellista kyetä osallistumaan reservi- ja säätösähkömarkkinoille. Kuvassa 3 on esitetty automaattisen taajuuden palautusreservin ylössäätökapasiteetin määrä ja marginaalihinta viikolla 46 vuonna 2022. Kuten kuvaajasta havaitaan, ylössäätökapasiteetin määrä ja hinta tippuu öisin ja tekee piikin jälleen aamulla, jolloin sähkökulutuskin kasvaa. (Fingrid 2021, 6.)



Kuva 3: aFRR ylössäätökapasiteetin määrä ja marginaalihinta ajanjaksolla 14.11.2022–20.11.2022. Laadittu lähteestä Fingrid (2022e).

Sähkömarkkinamalli on muutoksen edessä. Perinteisen säätökykyisen tuotannon määrä vähenee samalla, kun säästä riippuva sähköntuotanto kasvaa. Energian tuotannon ja kulutuksen tasapainotuksen tulee toimia luotettavasti markkinahintojen ohjaamana. Tämän vuoksi Suomessa ja koko Euroopassa ollaan siirtymässä lyhyempään taseselvitysjaksoon ja samalla kohti reaaliaikaisempia sähkömarkkinoita. Perinteisestä tunnin pituisesta taseesta siirrytään niin kutsuttuun varttitaseeseen eli 15 minuutin taseselvitysjaksoon. Suomessa Fingrid edistää tätä hanketta yhdessä toimialan kanssa, jotta siirtymässä löydettäisiin mahdollisimman

kustannustehokkaat ratkaisut. Suomen markkinoilla varttitase otetaan käyttöön vuoden 2023 toisen kvartaalin loppupuolella. (Fingrid 2022f.)

Siirtyminen varttitaseeseen tuo esille sellaiset tasepoikkeamat ja niiden kustannukset, jotka tämänhetkisessä tunnin ajanjaksossa kumoavat toisensa, mutta ovat järjestelmän tasapainon vuoksi olennaisia. Tämä toimii kannustimena markkinatoimijoille hallita tasettaan tarkemmin, joten nykyisiin toimintoihin voi ilmetä muutostarpeita. Markkinatoimijoiden tulee suunnitella tuotantoa ja kulutusta 15 minuutin resoluutiolla, joten tarve laitosten nopeammalle vasteelle kasvaa. Varttitaseeseen siirtymisen jälkeen kaupankäynti-ikkunoita on vuorokaudessa 96 aikaisemman 24:n sijaan eli ansaintamahdollisuuksia tulee lisää, kun sähkön enimmäistuotanto ajoitetaan korkeaan pörssihintaan. Kun tuotantoa optimoidaan reaaliajassa, pikaisiin muutoksiin markkinoilla pystytään reagoimaan nopeasti. (Fingrid 2022f.)

3 Kaukolämpöjärjestelmä

Tässä luvussa käsitellään kaukolämmön perusteita sekä kaukolämmön tuotannon ja jakelun teoriaa Suomessa. Lisäksi luvussa käsitellään lämmön varastointia sekä kaukolämpökomponenttien soveltamista järjestelmän hallinnassa.

Kaukolämmitys on keskitetty alueellinen lämmöntuotanto- ja jakelujärjestelmä, joka voidaan karkeasti jakaa lämmöntuottajiin, jakeluverkostoon ja lämmönkuluttajiin. Lämpöenergiaa tuotetaan yhteistuotantolaitoksissa, lämpölaitoksissa tai erilaisilla lämmön talteenottoratkaisuilla ja jaetaan kaukolämpöverkoston avulla kuluttajille, joita ovat tyypillisesti kotitaloudet, teollisuus, liikekiinteistöt ja julkiset rakennukset. Verkotot voivat koostua kokonaisista kaupungeista, niiden osista tai useiden rakennusten muodostamista ryhmistä. Aikoinaan lämpöenergiaa siirrettiin höyryn muodossa, mutta nykyaikaiset eurooppalaiset järjestelmät pohjautuvat kuuman veden hyödyntämiseen siirron väliaineena. Kuumaa kaukolämpöä siirretään verkostoissa pumppauksen välityksellä kuluttajille. Kaukolämpö on käytäjälleen luotettava, helppo ja tehokas ratkaisu, jossa lämmityksen huolehtiminen on ulkoistettu periaatteessa täysin toisin kuin kiinteistökohtaisissa lämmitysratkaisuissa. Usein kaukolämmöllä katetaan kaikki kuluttajan lämmitystarpeet, kuten käyttöveden, tilojen ja ilmanvaihdon lämmitys. (Mäkelä et al. 2015, 11–12; Phetteplace 2013, 1.)

Kaukolämmityksen merkittävimmät hyödyt voidaan ytimekkäästi ilmaista neljällä määritelmällä (Phetteplace 2013, 1):

- energiatehokkuus
- ympäristöystävällisyys
- kokonaistaloudellisuus
- toimintavarmuus

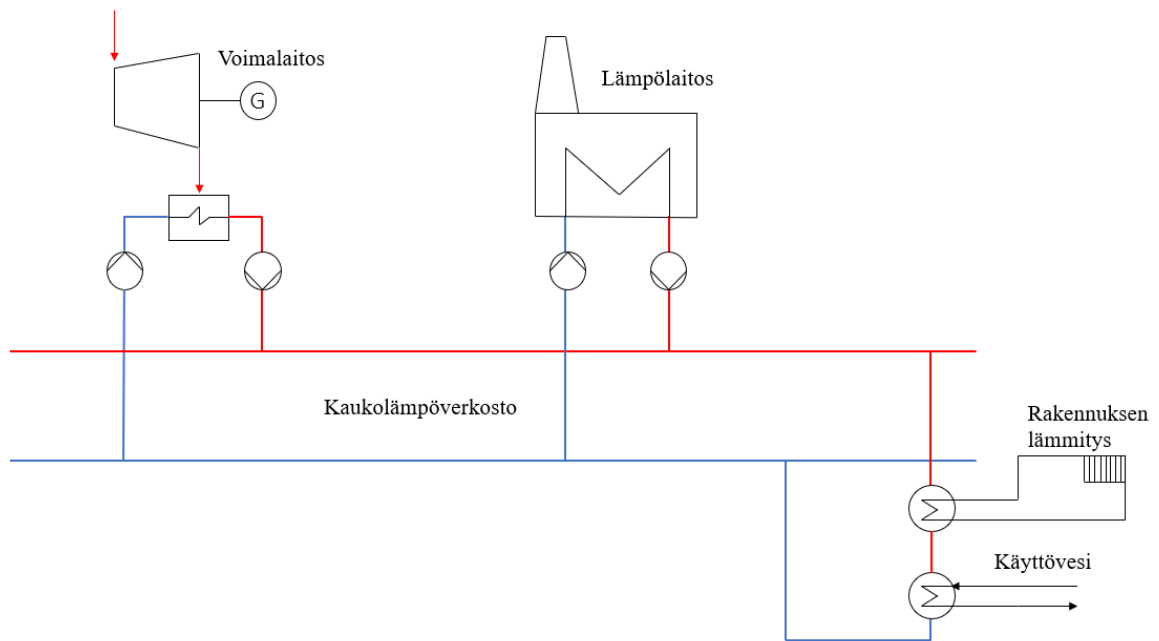
Etenkin lämmön talteenottoratkaisut sekä sähkön- ja lämmön yhteistuotanto, jossa hyötysuhde on lauhdevoimalaitokseen verrattuna korkea, ovat huomattavia energiatehokkuutta ja ympäristöystävällisyyttä edistäviä teknisiä ratkaisuja. Keskitetyllä suuren kokoluokan toiminnalla on kuitenkin myös haittoja. Esimerkiksi häiriöt lämmöntuotannossa tai -siirrossa heijastuvat jokaiseen verkon kuluttajaan. Lisäksi kaukolämpöjärjestelmän vaatimat

investoinnit ovat usein suuria sekä riskinä on myös epätietoisuus toiminnan jatkuvuudesta alueella.

3.1 Kaukolämpö Suomessa

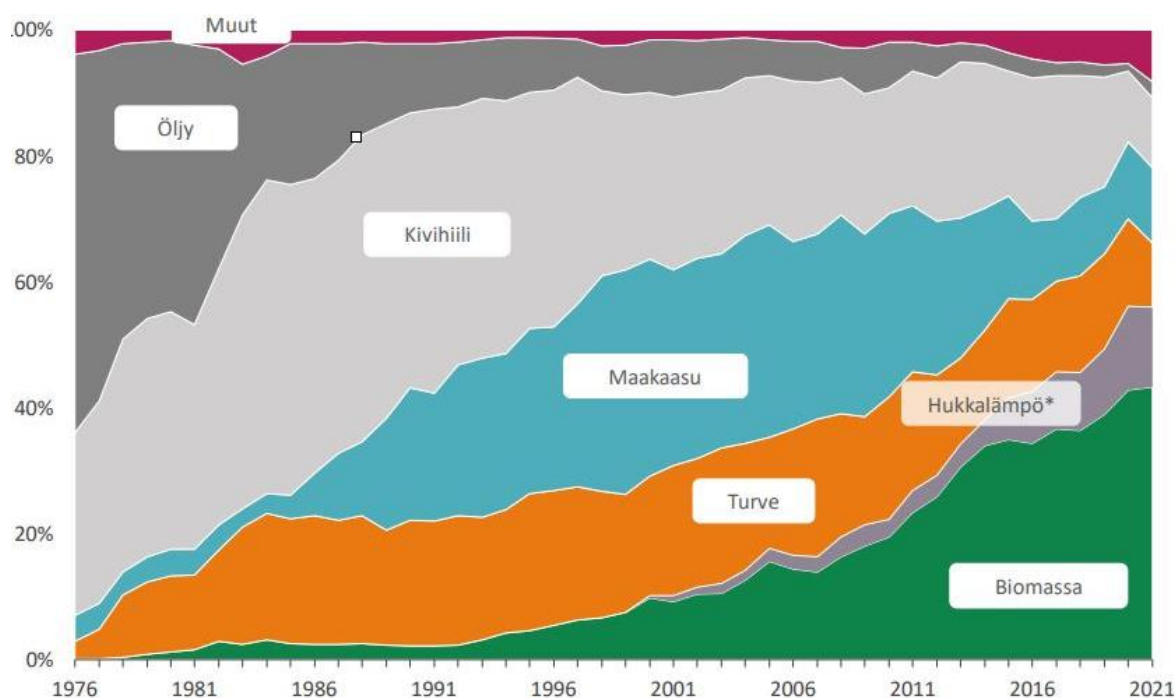
Kaukolämpö on toiminut suomalaisten taajamien lämmitysmuotona jo 1950-luvulta lähtien, ja tänä päivänä noin 2,7 miljoonaa suomalaista eli 45 prosenttia väestöstä asuu kaukolämpöä käyttävässä talossa. Suomi on kansainvälisesti saanut tunnustusta kaukolämpöalan teknisistä ratkaisuistaan ja kaukolämmön tuotanto onkin väkilukuun suhteutettuna Pohjoismaiden suurinta. Suosion kasvu alkoi 1970-luvulla ja on sittemmin tasaantunut 2010-luvun aikana, mikä havaitaan kuluttajien ja liittymistehojen kasvun hidastumisena. Kaukolämpö on saatavilla kaikkiaan yli 200 kunnassa ja erityisesti kaupunkialueilla tarvittava lämpötehon tiheys pinta-alaa kohden on suuri. Tiheästi rakennettu alue ja isot rakennuskoot mahdollistavat kaukolämmön käytön taloudellisuuden. (Energiateollisuus 2022f.)

Kaukolämpöverkkojen yhteenlaskettu pituus maanlaajuisesti on noin 16 000 km ja vuosittainen siirretty lämpöenergia on noin 35 TWh. Suomessa on käytössä suljettu kaksiputkinen järjestelmä, jossa menoputkessa kiertävä vesi luovuttaa lämpöä kuluttajan suljettuun piiriin lämmönsiirtimessä, jonka kautta kaukolämpövesi virtaa paluuputkeen. Perinteinen Suomessa käytetty kaukolämpöjärjestelmä on yksinkertaistettuna havainnollistettu kuvassa 4. Muualla maailmalla on käytössä myös avoimia kaukolämpöjärjestelmiä, joissa kaukolämpöä käytetään lämpimänä käyttövetenä. (Energiateollisuus 2022f.)



Kuva 4: Suomalaisen kaukolämpöjärjestelmän periaatekuva. Laadittu lähteestä Koskelainen et al. (2006, 43).

Kaukolämmön kehityksen alusta alkaen Suomessa on keskitytty hyödyntämään sähkön tuotannossa lauhteena hukkaan menevää lämpöä. Kaukolämmön tuotannossa käytettävä polttoaine riippuu esimerkiksi tuotantolaitostyyppistä sekä sen sijainnista ja tehosta. Etenkin suurissa tuotantoyksiköissä voidaan käyttää useita eri polttoaineita. Polttoainevalinnan määrävänä tekijänä on usein hinta, mutta varsinkin nykyisin myös ympäristökysymykset vaikuttavat valintaan. Kuvasta 5 voidaan havaita, että fossiilisten polttoaineiden käyttö oli pitkään suosiossa, mutta viime vuosikymmenen aikana biopolttoaineet ja hukkalämpö ovat korvanneet fossiilisia polttoaineita kaukolämmön tuotannossa. Etenkin kivihiilen, maakaasun sekä turpeen käyttö ovat merkittävästi vähentyneet. Kaukolämpöä hyödyntävistä kunnista jopa 75 prosenttia tuottaa lämmön pääasiassa uusiutuvilla polttoaineilla tai hukkalämmöllä. Näin ollen myös päästöjen pitkän aikavälin trendi on ollut selvästi laskeva. (Energiateollisuus 2022c).



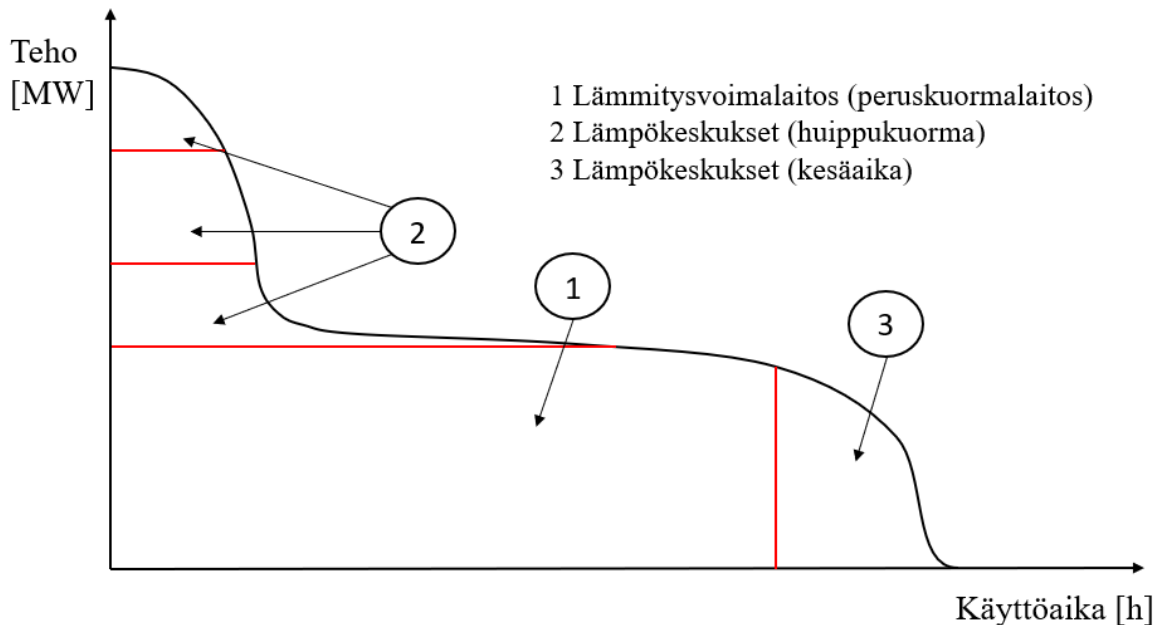
Kuva 5: Kaukolämmön tuotanto polttoaineittain Suomessa vuosina 1976–2021. Hukkalämmön osuus sisältää kaikki lämpöpumput. (Energiateollisuus 2022c.)

3.2 Kaukolämmön tuotanto

Kaukolämpö on lämmönlähteiden suhteen joustava järjestelmä ja tuotanto usein perustuukin erilaisten tuotantomuotojen yhdistelmään. Peruskuormalaitoksina käytetään pääasiassa polttotekniikalla toimivia CHP-laitoksia sekä lämpökeskuksia, jotka yhdessä kattavat valtaosan lämmöntarpeesta. Loput katetaan mahdollisilla sähkökattiloilla sekä erilaisilla lämpöpumpuilla ja hukkalämmöillä. Tuotantomuotojen väliseen käyttöön vaikuttavat kuluttajien tehotarve, verkoston siirtokapasiteetti sekä hintasuhteet. Tarkoituksena on optimoida tuotantokustannukset sekä tuotannon ja jakelun luotettavuus. Vaikuttavia tekijöitä ovat esimerkiksi sähkön hinta ja ennustettu markkinatilanne, sähkön- ja lämmöntarve sekä niiden ennustettu muutos. Eri tuotantolaitosten ajojärjestykseen vaikuttavat lisäksi laitosten käynnistys- ja pysäytysajat, minimi- ja maksimikuormien suhde sekä säädettävyys, käytettävät polttoaineet ja niiden hinta sekä laitoksen sijainti ja toimitusvarmuus verkossa. (Mäkelä et al. 2015, 31.)

Energiantuotannon jakautumista eri tuotantoyksiköiden kesken voidaan kuvata lämmöntuotannon pysyvyyskäyrällä (Kuva 6). Pysyvyyskäyrällä esitetään teho ajan funktiona ja se on

uudelleen järjestettynä jokaisen vuoden tunnin tehontarve. Jokainen järjestelmä on omanlaisensa, mutta yleisesti ottaen optimaalisesti mitoitettu peruskuormalaitos kattaa noin 50 prosenttia kaukolämmön huipputehosta, jolloin saavutetaan noin 80 prosentin osuus lämmön vuosituotannosta sekä samalla noin 70 prosentin osuus kaupungin sähkön tuotannosta. (Mäkelä et al. 2015, 31.)



Kuva 6: Periaate lämmöntuotannon pysyvyyskäyrästä sekä tuotantolaitosten käytöstä. Laadittu lähteestä Mäkelä et al. (2015, 31).

Kaukolämmön tehontarpeen määrää rakennusten lämmitystarve, lämpimän käyttöveden kulutus sekä teollisuusprosessien lämmöntarve. Usein kulutuskäyttäytyminen voidaan osittain ennustaa asiakastyypin perusteella ja etenkin teollisuuden prosessien lämmöntarve pysyy lähes vakiona. Kulutuksessa on huomattavia vaihteluja vuodenajan mukaan, koska luonnollisesti talvella lämmitystarve on selvästi suurempi. Keskimäärin suomalaisen kaupungin kaukolämmön tehontarve on kesällä vain noin 10 prosenttia talven huippukulutuksesta. Päivä- ja tuntikohtaiset vaihtelut kulutuksessa selittyvät lähinnä ihmisten luontaisesta rytmistä, milloin puhutaan niin sanotusta sosiaalisesta kuormasta. Kulutuspiikit ajoittuvat aamuun ihmisten herätessä ja iltapäivään heidän tullessa kotiin. Lisäksi viikonlopun kulutus eroaa arkipäivistä. (Mäkelä et al. 2015, 31.)

Kaukolämpöjärjestelmä pyritään aina mitoittamaan kuluttajien tarpeiden mukaiseksi. Suurimmissa järjestelmissä lämmityslaitoksia on useampia samassa verkostossa, kun taas

pienemmissä voi olla yksittäinen kiinteän polttoaineen lämpökeskus. Kuten kuvasta 6 voidaan havaita, molemmissa järjestelmissä tarvitaan kuitenkin myös huippu- ja varatehoa silloin, kun kulutus ylittää peruskuormalaitoksen tehon. Mitoituksessa on lisäksi otettava huomioon peruskuormalaitoksen seisokit ja mahdolliset häiriötilanteet lämmöntoimituksessa. Kulutushuippujen eriaikaisuudesta johtuen koko verkoston huippukulutus on pienempi kuin yksittäisten kuluttajien kulutushuippujen summa (Mäkelä et al. 2015, 28.)

3.2.1 Lämpökeskukset

Lämpökeskukset (HOB, Heat Only Boiler) ovat teollisen mittakaavan lämmitykseen tarkoitettuja laitoksia, joissa tuotetaan kuumaa vettä kaukolämpökuluttajien tarpeisiin. Lämpökeskukset voivat toimia joko peruskuormalaitoksina, huippukuormalaitoksina tai varalaitoksina ja ovat teholtaan tyypillisesti yksittäisistä megawateista muutamiin kymmeneen megawattiin. Lämpökeskuksessa kuuma kaukolämpövesi tuotetaan yhdessä tai useammassa kuumavesikattilassa polttotekniikalla. Kattilatyypit voidaan jakaa kiinteisiin ja siirrettäviin yksiköihin. Yleensä siirrettävät lämpökeskukset ovat tehoiltaan pieniä ja väliaikaisia tuotantolaitoksia. Niitä voidaan hyödyntää esimerkiksi uusilla kaukolämpöalueilla toiminnan alkuvaiheessa ennen kuin verkosto on saatu alueelle rakennettua. (Mäkelä et al. 2015, 25–27.)

Lämpökeskuksen pääkomponentit ovat (Mäkelä et al. 2015, 25–27):

- kuumavesikattila(t)
- polttoaineen käsittelylaitteet
- kaukolämpöveden pumppauslaitteet
- paisunta- ja paineen ylläpitolaitteet
- vedenkäsittelylaitteet
- automaatio- ja instrumentointilaitteet
- mittauslaitteet

Lämpökeskuksissa voidaan käyttää monenlaisia polttoaineita. Kiinteiden polttoaineiden, kuten hiilen, hakkeen ja pelletin polttoon soveltuu muun muassa perinteinen, arinalla varustettu vesiputkikattila. Sen sijaan öljy- ja kaasupolttoaineita käytetään tyypillisesti tulitorvi-

tuliputkikattilassa, joka on rakenteeltaan kompakti verrattuna kiinteän polttoaineen kattiloihin. Lämpöä tuotetaan, kun polttoainetta poltetaan tulipesässä olevassa tulitorvessa, mikä lämmittää putkien vaippapuolella olevaa vettä. Savukaasut johdetaan putkien ja kääntökammoiden välityksellä savupiippuun. Lämpökeskuksissa polttoaineen energiasisällöstä saadaan hyödynnettyä kaukolämpövedeen noin 85–93 prosenttia riippuen polttoaineesta, poltoteknikasta sekä kattilan ja kuorman mitoituksista. Eniten lämpöenergiaa karkaa savukaasujen mukana häviöksi. (Mäkelä et al. 2015, 25–27.)

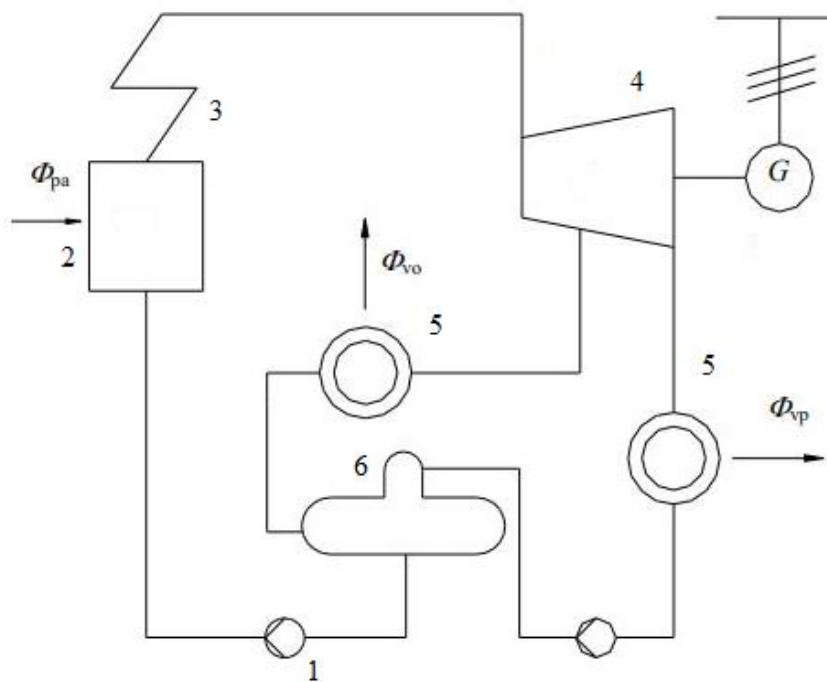
Lämpökeskusta voidaan ajaa joko osateholla tai sykleissä riippuen vuoden- tai vuorokaudenajasta sekä saman verkoston muusta tuotannosta. Usein lämpökeskukset toimivat peruskuormalaitoksen tukena, jolloin niiden rooli korostuu peruskuormalaitoksen seisokin tai yllättävän alasajon sekä korkean lämmönkulutuksen aikana. Lisäksi etenkin suuressa verkossa lämpökeskukset tukevat lämmöntoimitusta myös peruskuormalaitoksesta etäisille kuluttajille. Lämpökeskuksilla on myös lyhyempi käynnistys- ja pysäytysaika kuin CHP-laitoksella, mikä on olennaista verkon optimoinnin kannalta. Lämmöntuotantolaitosten yhteiskäytön periaatteena on, että vain yhden tuotantolaitoksen tehoa säädetään tehontarpeen mukaisesti ja muilla ajetaan kiinteällä kuormalla. Tyypillisesti suuritehoisin tuotantolaitos vastaa tehonsäädöstä, jotta säädettävä tehoalue tehontarpeen vaihteluihin olisi mahdollisimman suuri. (Mäkelä et al. 2015, 32; Pesola et al. 2011, 10.)

3.2.2 Yhteistuotantolaitokset

Yhteistuotanto- eli CHP-laitokset toimivat pääasiassa kaukolämmön peruskuormalaitoksina Suomessa. CHP on tuotantomuoto, jossa tuotetaan sähkön lisäksi lämpöä samassa prosessissa. Yhteistuotannolla hyötysuhde nousee erillistuotantoa korkeammaksi, sillä prosessin lämpö saadaan tehokkaasti talteen, ja täten polttoaineen energiasisällöstä saadaan hyödynnettyä jopa 90 prosenttia, kun taas pelkkään sähköntuotantoon keskittyneen lauhdevoimalaitoksen hyötysuhde jää parhaimmillaankin alle 45 prosenttiin. Kuten edellisessä luvussa esitettiin, erillisen lämmöntuotannon hyötysuhde on kuitenkin suhteellisen korkea. CHP-laitokset voidaan tehonsa mukaan jakaa kolmeen eri kokoluokkaan, joita ovat mikro-CHP (<50 kW), pien-CHP (<10 MW) ja suuren kokoluokan CHP-laitokset (>10 MW). Suomessa merkittävin käytetty teknologia yhteistuotantoon on höyryvoimalaitos, jonka lisäksi CHP-tuotanto on mahdollista myös kaasuturbiineissa, kombivoimalaitoksissa,

moottorivoimalaitoksissa (kaasumoottorit) sekä hajautetussa pientuotannossa, johon lukeutuu esimerkiksi ORC, mikroturbiinit ja mäntäkoneet. Tässä luvussa perehdytään tarkemmin höyryvoimalaitoksen toimintaan. (Frangopoulos 2017, 329; Saari 2022a, 5.)

Höyryvoimalaitos perustuu Clausius-Rankine-prosessiin, joka on ideaalinen kiertoprosessi. Prosessi on suljettu ja sen työaineena toimii vesi. Pääkomponentit ovat kattila, turbiini, lauhdutin, esilämmittimet ja pumput. Sähköä ja lämpöä tuottavan höyryvoimalaitoksen periaatekaavio on esitetty kuvassa 7. (Saari 2022b, 1; Tynjälä 2013, 91.)



Kuva 7: Yksinkertaistetun CHP-laitoksen periaatekaavio. Laadittu lähteestä Tynjälä (2013, 91).

Yksinkertaistettuna vesi-höyrykierron toimintaperiaate on seuraavanlainen:

- 1) Paineistettua syöttövettä pumpataan kattilaan
- 2) Kattilassa polttoaineen palamisessa vapautuva lämpö höyrystää kattilan seinissä sijaitsevien höyrystinputkien sisällä kulkevan veden
- 3) Höyry kulkeutuu tulistimeen, jossa lämpöä siirtyy höyryyn sekä tulipesästä säteilemällä että savukaasuista konvektiolla

- 4) Tulistettu höyry kulkeutuu turbiiniin, jonka tehtävänä on muuttaa höyryn sisältämä lämpöenergia mekaaniseksi energiaksi, joka muutetaan generaattorin välityksellä sähköksi
- 5) Laitostyyppistä riippuen tuleva höyry voidaan ohjata kaukolämmönvaihtimelle, jossa se luovuttaa lämpöenergiaa kaukolämpöveteen
- 6) Lauhduttimessa höyry lauhtuu takaisin nesteeksi, joka johdetaan syöttövesisäiliöön

Todellisuudessa höyryvoimalaitosten prosessit ovat monimutkaisempia, koska niissä on useampia vaiheita prosessin tehostamiseksi. Usein turbiini sisältää erilliset matala-, keski- ja korkeapaineturbiinit ja höyrylle on välitulistuksia sekä väliottoja turbiinin vaiheiden välillä. Lisäksi kattilatyyppi vaikuttaa oleellisesti vesihöyrypiirin rakenteeseen. Kattilatyyppit voidaan jakaa läpivirtauskattiloihin sekä kiertokattiloihin. Oleellinen ero näiden välillä on lieriön puuttuminen läpivirtauskattilassa. Lieriössä kylläinen vesi erotetaan kylläisestä vesihöyrystä. Kiertokattilat jaetaan vielä luonnonkierto- ja pakkokierto-kattiloihin. Luonnonkiertokattilassa paine on riittävän pieni (<160 bar), jotta kylläisen lieriöveden ja höyrystimessä kiehuvan veden välillä on riittävä tiheusero kierron aikaansaamiseksi. Pakkokierto-kattilassa paine voi olla suurempi (>160 bar), koska kierto toteutetaan pumppauksen avulla. Läpivirtauskattila on ainoa mahdollinen ratkaisu, mikäli paine ylittää veden kriittisen pisteen paineen ($p > p_{\text{kriit}}$, 221 bar), koska tällöin höyry- ja nestefaasit eivät ole erotettavissa. (Saari 2022b, 3–4.)

Lämmöntuotanto höyrylaitoksissa voidaan toteuttaa joko vastapaineella tai väliottolauhteella. Vastapainetuotannossa höyryn paisunta turbiinissa jää suureen paineeseen riippuen halutusta kaukolämmön menoveden lämpötilasta. Höyry johdetaan kaukolämmönvaihtimelle, joka siirtää lämpöenergian kaukolämpöveteen. Väliotossa turbiinista otetaan osa höyrystä suuremmassa paineessa prosessi- tai kaukolämpötarpeisiin ja loppu höyry paisuu lauhdutinpaineeseen. Usein käytössä on näiden yhdistelmä, jolloin höyryä saadaan monella eri painetasolla. Taulukossa 1 esitellään tekniikoiden eroja. (Saari 2022a, 6.)

Taulukko 1: Merkittävimmät eroavaisuudet CHP-höyryvoimalaitoksessa vastapaine- ja väliottotuotannon välillä. Laadittu lähteestä Saari (2022a, 8).

	Vastapaine	Väliotto
Hyötysuhde	CHP hyötysuhde suurempi – lämmön tehokas hyödyntäminen Sähköntuotannon hyötysuhde pienempi – suuri lämmönpoistolämpötila	CHP hyötysuhde pienempi – lämpöhäviö lauhduttimessa Sähköntuotannon hyötysuhde suurempi – lämmönpoistosta vain osa suuressa lämpötilassa
Hinta	Pienempi – ei lauhdutinta, ei kallista turbiinin matalapaineosaa	Suurempi – vaatii enemmän komponentteja: turbiinin matalapaineosa, lauhdutin, jäähdytysvesijärjestelmä
Sähkön-tuotanto	Pienempi – lämpökuorma määrää turbiinin höyryvirran ja siten sähköntuotannon määrän	Suurempi – lämpökuorma ei määrää turbiinin höyryvirtaa

CHP-laitoksen sähkön- ja lämmöntuotannon kokonaishyötysuhde määritetään tuotetun nettosähkötehon ja prosessi- tai kaukolämpötehon sekä polttoaineen lämpötehon mukaan yhtälöllä 1 (Tynjälä 2013, 91).

$$\eta_{CHP} = \frac{P_t + \phi_{vo} + \phi_{vp}}{\phi_{pa}} \quad (1)$$

missä

η_{CHP}	CHP-laitoksen hyötysuhde	[-]
P_t	turbiinilta saatava akseliteho	[MW]
ϕ_{vo}	väliottohöyrystä saatava lämpöteho	[MW]
ϕ_{vp}	vastapainehöyrystä saatava lämpöteho	[MW]
ϕ_{pa}	polttoaineen lämpöteho	[MW]

Sähkön- ja lämmöntuotannon suhteesta käytetään nimitystä rakennusaste, joka on yksi keskeisimmistä CHP-laitoksen parametreista. Rakennusasteeseen vaikuttavat muun muassa laitoksen käyttötarkoitus sekä sähköntuotannon määrä. Teollisuuden CHP-laitoksissa prosessihöyryn tarve on usein suuri, jolloin sähköntuotanto on vähäisempää ja rakennusaste on matala. Pääasiassa kaukolämmön tuotantoon keskittyneessä CHP-laitoksessa rakennusaste tyypillisesti vaihtelee 0,3 ja 0,6 välillä. Rakennusastetta on kuitenkin mahdollista säätää laitoksen ajotilaa muuttamalla. (Tynjälä 2013, 91.)

Rakennusaste saadaan määritettyä yhtälöllä 2 (Tynjälä 2013, 91).

$$\sigma = \frac{P_t}{\phi_{vo} + \phi_{vp}} \quad (2)$$

missä

σ rakennusaste [-]

CHP-laitoksen tuottama sähköteho saadaan laskettua yhtälöllä 3 (Tynjälä 2013, 91).

$$P_t = q_{m,h} \eta_t (h_{1,h} - h_{2,h}) \quad (3)$$

missä

$q_{m,h}$	höyryn massavirta	[kg/s]
η_t	turbiinin hyötysuhde	[MW]
$h_{1,h}$	höyryn entalpia ennen turbiinia	[kJ/kg]
$h_{2,h}$	höyryn entalpia turbiinin jälkeen	[kJ/kg]

3.2.3 Muut tuottajat

Kuten luvussa 2.1 esitettiin, viime vuosina kaukolämmön tuotannossa ovat yleistyneet lämmön talteenottoratkaisut, joilla voidaan hyödyntää hukkalämpöjä erilaisista lämmönlähteistä ja parantaa energiatehokkuutta. Hukkalämmönlähteet voidaan alkuperänsä mukaan ryhmitellä viiteen eri pääluokkaan, joita ovat energiantuotanto, teollisuus, julkinen- ja palvelusektori, kotitaloudet sekä maatalous. Suuruusluokaltaan merkittävimmät hukkalämmönlähteet ovat pääasiassa energiantuotannossa ja teollisuuden prosesseissa. Suomessa suurin potentiaali onkin metsäteollisuuden hukkalämmön hyödyntämisessä, mutta usein ongelmaksi muodostuu niiden liian kaukainen sijainti kaukolämpöverkosta, jolloin ei ole kannattavaa siirtää lämpöä pitkien etäisyyksien päähän. Sen sijaan esimerkiksi kaupunkialueella sijaitsevien datakeskusten ja jätevesipuhdistamojen hukkalämmön hyödyntämisessä on suuri potentiaali, jota jo hyödynnetäänkin useassa kaukolämpöverkossa. Lisäksi etenkin suuritehoiset teollisuusprosessit ovat monimutkaisia, jolloin vaadittavat muutokset ja investoinnit hukkalämmön hyödyntämiseen eivät välttämättä ole teollisuusyritysten näkökulmasta mielekkäitä.

Teollisuusyrityksille tuotannon toimivuus on kuitenkin prioriteetti, joten toiminnan monimutkaistaminen olisi riski pääprosessille. (Pöyry 2019, 32; VTT 2020, 10.)

Hukkalämmön hyödyntämiselle kaukolämpöverkossa on seuraavia teknisiä ja taloudellisia edellytyksiä (Pöyry 2019, 30):

- hukkalämmön tulee olla saatavilla kaukolämpöverkkoon sopivalla paineella ja sopivassa lämpötilassa
- hukkalämmön volyymin tulee olla riittävä, jotta sen käyttämisen vaatimat investoinnit ovat mahdollisia
- lämmön siirtoetäisyyden tulee olla kohtuullisen lyhyt

Lämpöä voidaan siirtää kaukolämpöverkkoon suoraan lämmönvaihtimella tai hyödyntämällä lämpöpumppuja riippuen hukkalämmön lämpötilasta. Suurin osa hukkalämmönlähteistä esiintyy matalassa lämpötilatasossa, joten niiden hyödyntäminen vaatii lämpöpumpun, mikä lisää investoinnin kustannuksia. Tyypillisesti suurten lämpöpumppujen lämmönlähteinä ovat teollisuuden prosessit, datakeskukset, puhdistettu jätevesi ja kaukojäähdytysverkko. Pieniä lämpöpumppuja puolestaan käytetään esimerkiksi kylmälaitteiden ja rakennusten hukkalämpöjen hyödyntämisessä. Usein pienimmissä kohteissa tuotettu lämpö käytetään itse kohteessa, mutta se voi tuottaa lämpöä myös kaukolämpöverkon tarpeisiin. (VTT 2020, 21–22.)

Hukkalämpöjen integrointi osaksi kaukolämpöjärjestelmää on toisinaan haasteellista. Kaukolämpöyhtiön preferenssi on hankkia ennustettava määrä lämpöä, jotta oman tuotannon suunnittelu olisi helpompaa. Kuitenkin esimerkiksi teollisuudesta hukkalämpöä on tarjolla tietenkin vain silloin, kun tuotanto on toiminnassa. Epävarmuutta aiheuttavat yllättävät tuotannon seisokit sekä mahdollinen toiminnan loppuminen kokonaan, minkä takia kaukolämpöyhtiö joutuu joka tapauksessa ylläpitämään omaa varakapasiteettia. Lämpökuorman määrä ei myöskään ole kaukolämpöyhtiön ohjattavissa, mutta se on teollisuuden prosessien luonteesta johtuen kuitenkin melko tasaista. Lisäksi alhaisen lämmöntarpeen aikana kaukolämpöyhtiöllä on yleensä riittävästi tai jopa liikaa omaa lämmöntuotantoa, jolloin hukkalämmön ostaminen vähentäisi CHP-laitoksissa myös sähköntuotantoa. Tällainen tilanne voitaisiin ainakin osittain ratkaista varastoimalla lämpöä esimerkiksi kaukolämpöakkuun. (Pöyry 2019, 31.)

VTT:n ja LUT-yliopiston tekemän ydinkaukolämpöselvityksen (2022) mukaan tulevaisuudessa myös ydinenergia, ja varsinkin pienydinreaktorit, voisivat olla soveltuvia paikalliseen kaukolämmön tuotantoon. Pienydinreaktorit tarjoavat muille vähähiilisille teknologioille rinnakkaisen vaihtoehdon, jossa tuotanto ei riipu sähkön hintavaihteluista tai biopolttoaineiden saatavuudesta. Lämmön tuottaminen kuluttajille pienydinreaktorissa ei kuluttaisi sähköä, jonka riittävydestä on viime aikoina ollut runsaasti epävarmuutta. Lisäksi kyseinen teknologia säästäisi biotuoteteollisuuden raaka-aineita muihin tärkeisiin käyttökohteisiin. Teknologian haasteiksi todetaan kokemuksen puute, tulevan sääntelyn epävarmuus ja soveltuvan teknologian matala kypsyysaste. Selvityksen mukaan tarve nykyisten laitosten kapasiteetin korvaukselle kasvaa useassa kunnassa jo 2030-luvulla, mikä asettaa kunnianhimoisen aikataulun pilottiprojektille, jotta ydinenergia olisi varteenotettava vaihtoehto kaukolämmön tuotannossa. (VTT 2022, 4–16.)

3.3 Kaukolämpöjärjestelmän komponentit

Tässä luvussa käsitellään kaukolämpöjärjestelmän pääkomponentteja, joista myös muodostuu tämän työn simulaattori. Lisäksi luvussa esitellään keskeisimmät yhtälöt, joita hyödynnetään kaukolämpöjärjestelmän mallintamisessa.

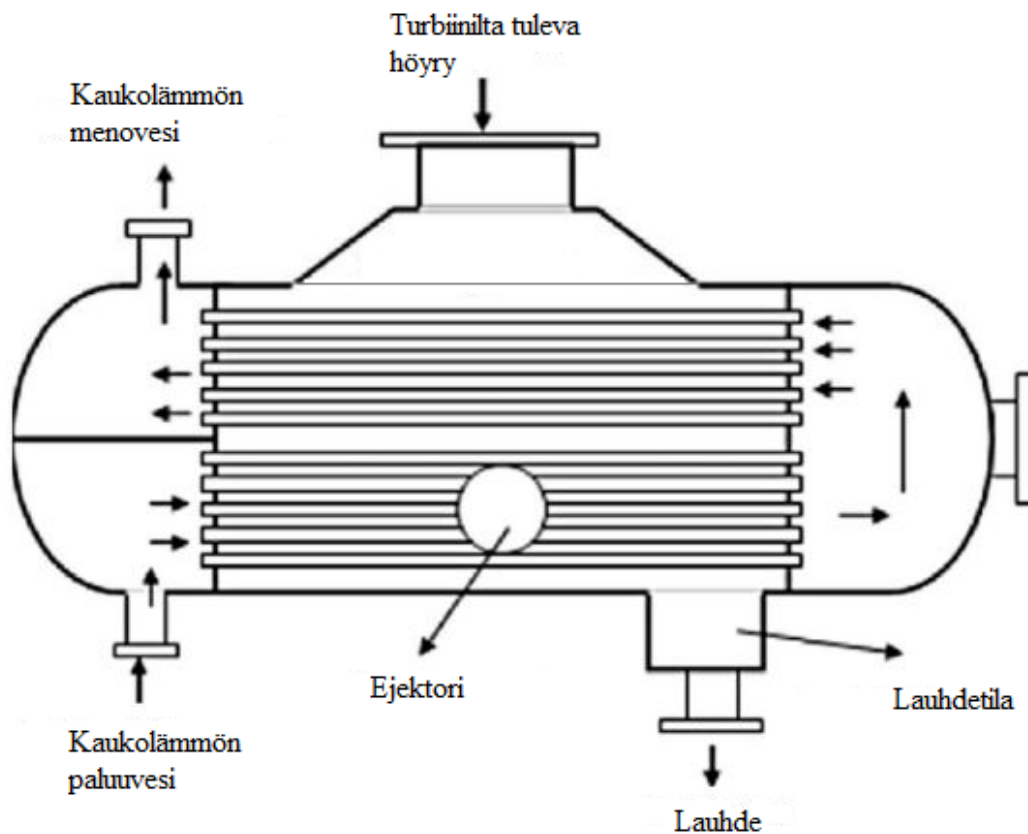
3.3.1 Lämmönvaihtimet

Kaukolämpöä tuottavissa höyryvoimalaitoksissa turbiinilta tulevan höyryn lämpöenergia siirretään kaukolämpövedeen lämmönvaihtimien välityksellä. Kuten luvussa 3.2.2 esitetään, usein käytössä on niin kutsuttu kaksivaiheinen kaukolämmöntuotanto, jossa höyryä hyödynnetään kahdella eri painetasolla. Tällöin kaukolämmönvaihtimia on kaksi, jotka molemmat siirtävät lämpöä kaukolämpöverkossa kiertävään veteen. Kyseinen tekniikka mahdollistaa pienemmän vastapaineen turbiinille, jolloin samalla lämpöteholla saadaan enemmän sähkötehoa. (Vepsäläinen et al. 2013, 187.)

Tyypillisesti kaukolämmönvaihtimina käytetään erillisillä lauhdetiloilla varustettuja vaippaputkilämmönsiirtimiä, jotka luokitellaan rekuperatiivisiin lämmönsiirtimiin. Tällöin fluideja, eli turbiinilta tulevaa höyryä ja kaukolämpöverkossa kiertävää vettä, erottaa lämmönsiirtopinta, johon lämpö syklisesti varastoituu kuumasta virtauksesta ja vapautuu tästä

lämmitettävään fluidiin. Kaukolämpövesi kiertää lämmönvaihtimen putkissa ja höyry sen sijaan on lämmönvaihtimen vaippapuolella. (Vepsäläinen et al. 2013, 187.)

Prosessissa höyry lauhtuu vedeksi, joten kaukolämmönvaihtimia kutsutaan usein myös kaukolämpölahduttimiksi. Lauhtumisaine määräytyy kaukolämpöveden lämpötilojen mukaan. Mitä alhaisempi on lämpötila, sitä pienemmäksi muodostuu myös lauhtumisaine. Lauhtumisaineella puolestaan on vaikutus turbiinissa vallitsevaan entalpiaeroon, joka nousee, kun lauhtumisaine laskee. Näin ollen maksimaalisen sähköntuotannon kannalta on suotuisaa, jos lauhtumisaine ja -lämpötila ovat mahdollisimman alhaisia. Lauhtumispinnankorkeutta ohjataan lauhdepumpuilla. Kuvassa 8 on esitetty kaukolämpövaihtimen toiminnallinen periaatekuva. (Koskelainen et al. 2006, 29; Vepsäläinen et al. 2013, 187.)



Kuva 8: Kaukolämmönvaihtimen toiminnallinen periaatekuva. Laadittu lähteestä Giri (2012, 1004).

Kaukolämmönvaihtimen teho saadaan laskettua fluidin massavirran, ominaislämpökapasiteetin ja lämmönvaihtimen yli tapahtuvan lämpötilamuutoksen avulla yhtälön 4 mukaisesti (Mäkelä et al. 2015, 45).

$$\phi_{lv} = q_{m,kv} c_{p,kv} \Delta T \quad (4)$$

missä

ϕ_{lv}	kaukolämmönvaihtimen lämpöteho	[W]
$q_{m,kv}$	kaukolämpöveden massavirta	[kg/s]
$c_{p,kv}$	kaukolämpöveden ominaislämpökapasiteetti	[kJ/kg°C]
ΔT	lämpötilaero	[°C]

Lämmönvaihtimessa höyry luovuttaa yhtä paljon lämpötehoa kuin kaukolämpövesi vastaanottaa. Täten lämmönvaihtimen energiataseeksi saadaan (Uusitalo 2022, 15):

$$\phi_{lv} = q_{m,kv}(h_{2,kv} - h_{1,kv}) = q_{m,h}(h_{1,h} - h_{2,h}) \quad (5)$$

missä

$q_{m,kv}$	kaukolämpöveden massavirta	[kg/s]
$h_{2,kv}$	kaukolämpöveden entalpia lämmönvaihtimen jälkeen	[kJ/kg]
$h_{1,kv}$	kaukolämpöveden entalpia ennen lämmönvaihdinta	[kJ/kg]
$q_{m,h}$	höyryn massavirta	[kg/s]
$h_{1,h}$	höyryn entalpia ennen lämmönvaihdinta	[kJ/kg]
$h_{2,h}$	höyryn entalpia lämmönvaihtimen jälkeen	[kJ/kg]

3.3.2 Pumput ja verkon paine

Kaukolämpöpumppuina käytetään tyypillisesti keskipakopumppuja, jotka soveltuvat kierto-veden pumppaukseen, järjestelmän paineenpitoon ja lisäveden pumppaukseen. Kaukolämpöveden pumppaus toteutetaan lämmöntuotantolaitoksilta ja mahdollisilta välipumppaamoilta. Yleisesti ottaen verkon paine kannattaa pitää mahdollisimman alhaisena, jotta vältetään turhalla sähkönkulutukselta pumppuissa. Optimaalisesti pumppaus säädetään siten, että

kaikille kuluttajille saadaan toimitettua riittävästi lämpöenergiaa mahdollisimman pienillä kustannuksilla. Tällöin verkostosta riippuen osa pumppauksesta kannattaa toteuttaa tuotantolaitoksen lisäksi välipumppaamoilta, jotka sijoitetaan mahdollisimman hyvin soveltuvaan kohtaan. Tällainen on esimerkiksi paine-eron suhteen kriittinen haara, jonne paine nostetaan erillisellä pumppauksella sen sijaan, että kasvatetaan koko verkon painetta. (Energiateollisuus 2011, 8; Koskelainen et al. 2006, 170.)

Yhtälöstä 6 havaitaan, että pumpun tehontarve on riippuvainen tilavuusvirrasta, paine-erosta ja pumpun hyötysuhteesta (Koskelainen et al. 2006, 17).

$$P_p = \frac{q_{m,kv} g H_p}{n_p} = \frac{\rho_{kv} q_{v,kv} g H_p}{n_p} = \frac{q_{v,kv} \Delta p_p}{n_p} \quad (6)$$

missä

P_p	pumpun tehontarve	[W]
g	putoamiskiihtyvyyys	[m/s ²]
H_p	pumpun nostokorkeus	[m]
n_p	pumpun hyötysuhde	[-]
ρ_{kv}	kaukolämpöveden tiheys	[kg/m ³]
$q_{v,kv}$	kaukolämpöveden tilavuusvirta	[m ³ /s]
Δp_p	pumpun paine-ero	[Pa]

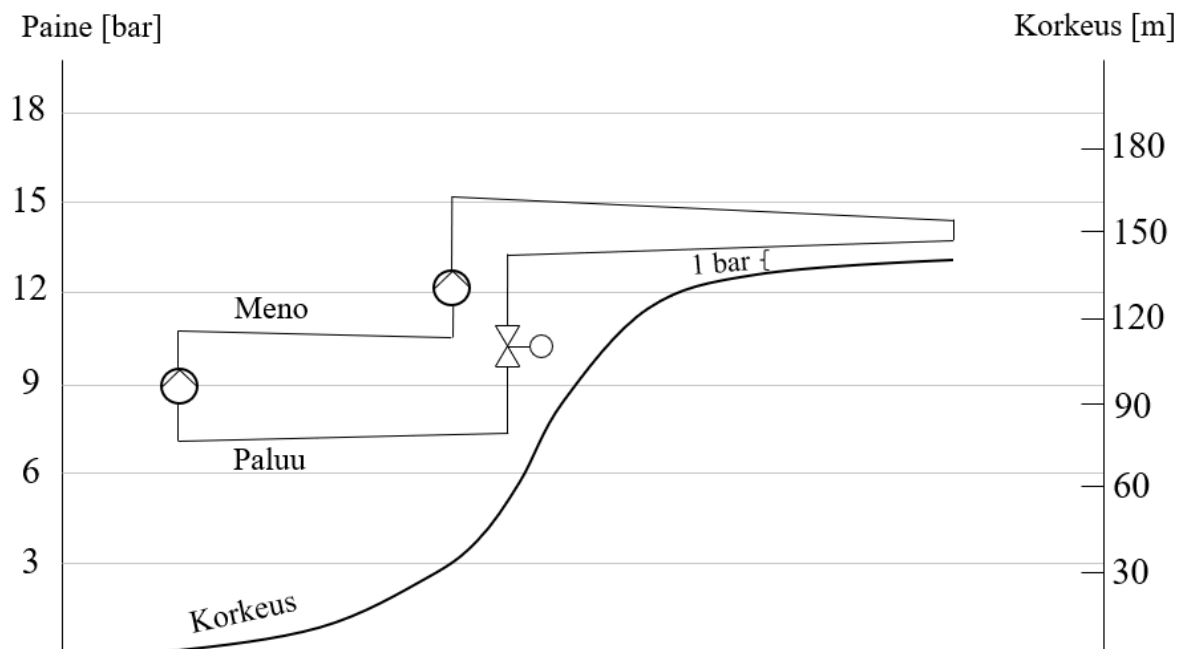
Kaukolämpöpumpuille on asetettu seuraavia vaatimuksia (Mäkelä et al. 2015, 45):

- asiakkaan kaukolämpölaitteissa paine-eron oltava vähintään 0,6 bar
- verkon paineluokasta riippuen sallittua suunnittelupainetta ei tule ylittää (yleensä 16 bar)
- painetason kaukolämpöpumppujen imupuolella tulee olla riittävän korkea, jotta pumput eivät kavitoi (vähintään 0,5–0,8 bar)
- sallittua suunnittelulämpötilaa ei tule ylittää (yleensä 120 °C)

Kaukolämpöverkossa on tyypillisesti useita eri paine-eron mittauspisteitä. Kuormituksen muuttuessa verkon alin paine-ero voi siirtyä eri puolelle verkkoa. Usein paine-eron suhteen kriittiset asiakkaat sijaitsevat verkoston ääripäissä kaukana pumppaamoista, maastollisesti

korkeissa kohdissa tai esimerkiksi ahtaiden kaukolämpöputkien päässä. Verkoston korkeimmat paineet puolestaan esiintyvät menoputkissa lähellä lämmön tuotantolaitoksia ja välipumppaamoja sekä maastollisesti alhaisissa kohdissa. Asiakkaiden kaukolämpölaitteissa paine-ero ei saa kuitenkaan nousta liian korkeaksi (>5bar), koska liian suuri paine-ero aiheuttaa muun muassa meluongelmia lämmönjakokeskuksen säätöventtiileissä, jotka joutuvat kuristamaan virtausta. Kyseisissä tapauksissa asiakkaiden lämmönjakokeskukset voidaan varustaa paineenalennusventtiileillä, mikäli kaukolämpöpumput joudutaan esimerkiksi suuren nostokorkeuden tai pitkien siirtoyhteyksien takia mitoittamaan suuriksi. (Energiateollisuus 2011, 2–5.)

Tyypillisesti suuria korkeuseroja hallitaan asentamalla välipumppaamo mäen juurelle tai rinneeseen ja kuristusventtiili paluuputkeen. Kuvassa 9 on esitetty tällainen tilanne, jossa kaukolämpöasiakas sijaitsee maastollisesti korkealla, jolloin verkon paine nousee lähelle suunnittelupaineen maksimirajaa (PN16) ja paine-ero meno- ja paluuputken välillä on pieni. (Energiateollisuus 2011, 9.)



Kuva 9: Ratkaisu painetason ja -eron hallintaan, kun kaukolämpöasiakas sijaitsee mäen päällä. Laadittu lähteestä Energiateollisuus (2011, 9).

Kaukolämpöpumppujen valintaan liittyen pumpun teknisissä arvoissa ilmoitetaan pumpun vaatima imukorkeus (NPSH, Net Positive Suction Head). Sillä ilmoitetaan, kuinka suuri paine nesteen höyrystymispaineen lisäksi tulee pumpun imuaukossa vallita, jotta pumppu ei ala kavitoimaan. Kavitointia ilmenee, kun neste höyrystyy liian alhaisessa paineessa muodostaen höyrykuplia, jolloin tilavuusvirta kasvaa, mutta pumpun läpi virtaava todellinen massavirta pienenee. Pumpun myöhemmissä osissa paine nousee, jolloin höyry tiivistyy nopeasti nesteeksi. Tämä aiheuttaa melua ja paineiskuja, jotka vaurioittavat pumppua. (Koskelainen et al. 2006, 171.)

Pumpun tilavuusvirran tuottoa ja paine-eroa voidaan säätää kuristusventtiilillä, pyörimisnopeutta muuttamalla, ohivirtauksella painepuolelta imupuolelle sekä johtosiipien ja juoksupyörän rakenteellisilla muutoksilla. Suuren säätöalueen takia kuristussäätö ja pyörimisnopeussäätö ovat näistä selvästi yleisimpiä. Lisäksi esimerkiksi ohivirtauksen käyttö on huomattavan epätaloudellista. Pyörimisnopeuden muuttaminen onnistuu taajuusmuuttajalla, jolloin pumpun ominaiskäyrää pystytään muuttamaan vaatimusten mukaisesti. Pumpun ominaiskäyristä saadaan selville nostokorkeuden, hyötysuhteen ja tehon muutokset tilavuusvirran funktiona. Pyörimisnopeutta säätämällä pyritäänkin ensisijaisesti vähentämään pumpaustyöhön käytettävää energiaa säätämällä pumpun nostokorkeus vallitsevan tarpeen mukaiseksi. (Koskelainen et al. 2006, 172.)

Kaukolämmön kulutuksen vaihteluiden takia vaaditaan suurta vesimäärän tai nostokorkeuden säätömahdollisuutta. Tällöin taloudellisuuden ja hyötysuhteen optimoimiseksi on olennaista kiinnittää huomiota pyörimisnopeuden säädön lisäksi pumppujen kytkentätapaan. Pumppuja on mahdollista kytkeä joko rinnan tai sarjaan. Rinnankytkennässä vesimäärän säätömahdollisuudet ovat suuret ja sarjaankytkentä sen sijaan kasvattaa nostokorkeuden säätömahdollisuuksia, mikä on tarpeellista erityisesti pitkillä siirtoetäisyyksillä. Jokainen kaukolämpöverkko on kuitenkin omanlaisensa, joten pumppauksen toteutuksen mahdollisuudet on selvitettävä tapauskohtaisesti. Verkon ominaisuuksia, kuten kriittisiä kohtia, voidaan selvittää esimerkiksi automaation ja asiakkaiden etäluennan avulla. Myös mahdollinen verkon laajentuminen on hyvä ottaa huomioon pumppujen kytkennöissä. (Koskelainen et al. 2006, 173.)

3.3.3 Kaukolämpöakku

Yhdistettyä sähkön- ja lämmöntuotantolaitosta ajetaan vallitsevien tarpeiden mukaisesti. Sähkön ja lämmön kulutusvaihtelut eivät ole samanaikaisia, mutta kuten aikaisemmin esitettiin, sähköntuotanto riippuu laitoksen rakennusasteen mukaisesti lämmöntuotannosta. Sähköntuotannon riippuvuutta kaukolämmön kulutuksesta voidaan kuitenkin vähentää varastoimalla lämpöä kaukolämpöverkkoon tai erilliseen varastoon myöhempää käyttöä varten. Lämpövarasto toimii keinotekoisena kuluttajana laitoksen lämmön ylituotannolle, jolloin sähkön tuotantoa voidaan lisätä. Varastoitua lämpöenergiaa voidaan myöhemmin hyödyntää lämmön huippukulutuksessa, jolloin esimerkiksi tarve kalliimmalla tuotantotavalla tuotetulle lämmölle vähenee. Luvussa 3.5 käsitellään laajemmin lämmön varastoinnin etuja ja soveltamista kaukolämpöverkon hallinnassa. (Guelpa et al. 2019, 3; Koskelainen et al. 2006, 383.)

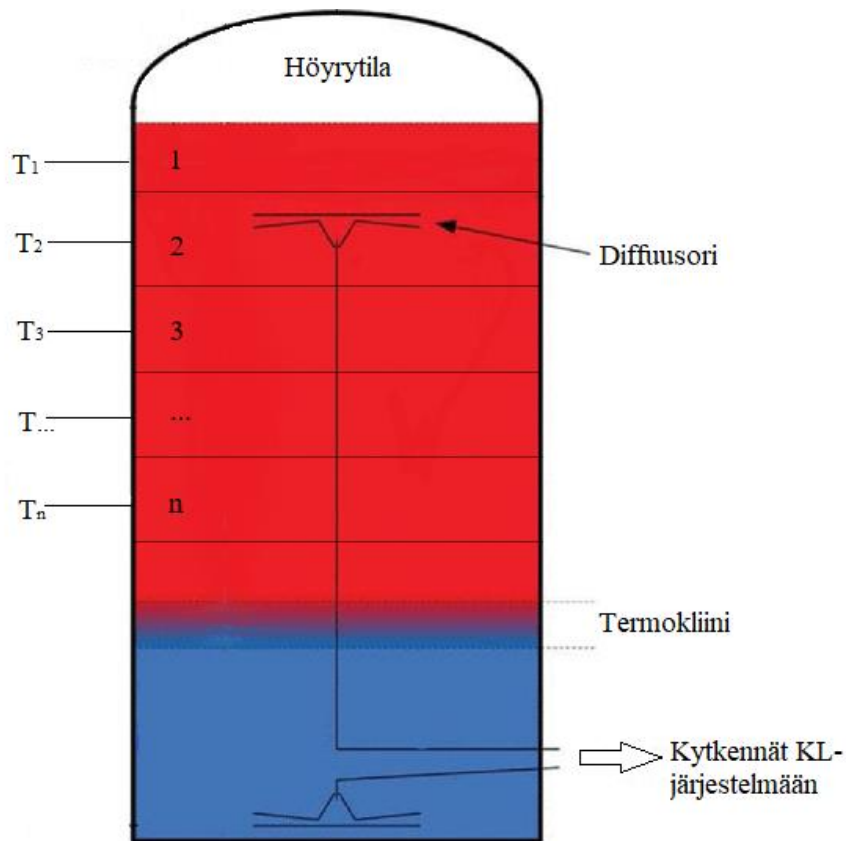
Lämpöenergiavarastot (TES, Thermal Energy Storage) voidaan jakaa tuntuvan lämmön varastoihin (SHS, Sensible Heat Storage), latenttilämmön varastoihin (LHS, Latent Heat Storage) ja termokemiallisiin energiavarastoihin (TCES, Thermochemical Energy Storage). Teknologioiden välillä on merkittäviä eroavaisuuksia muun muassa käyttömahdollisuuksien, hinnan, energiatiheyden ja energiansiirron suhteen. Tässä luvussa keskitytään SHS-teknologiaan perustuvaan ja lämmön lyhytaikaisvarastointiin soveltuvaan vedellä täytettyyn säiliöön, joka on kaukolämpöjärjestelmissä laajalti käytössä. Kyseinen lämmönvarastointiratkaisu soveltuu erityisesti verrattain nopeiden lämpökuormien vaihteluiden hallintaan, mikä on oleellista CHP-tuotannon optimoinnin kannalta. Lyhytaikaisvarastoinnissa akun purkaus- ja lataussyklit vaihtuvat suhteellisen nopeasti, joten varaston lämpöhäviöt ovat kausivarastoja pienemmät. SHS-teknologia perustuu yksinkertaisesti varastoivan väliaineen lämpötilaeroon eli tässä tapauksessa kaukolämpöakussa olevan veden lämpötilamuutoksiin. Vesi toimii lämpöä varaavana massana sekä siirron väliaineena. Merkittävimpiä etuja ovat sen soveltavuus, halpa hinta, suurehko ominaislämpökapasiteetti sekä yksinkertainen ja paljon tutkittu teknologia. (Cabeza 2021, 3; Guelpa et al. 2019, 6)

Lämmön varastointiin soveltuvat muun muassa teräs-, kallio- ja betonisäiliöt. Näistä etenkin Suomessa lyhytaikaiseen varastointiin tarkoitettu kaukolämpöakku on usein tuotantolaitoksen läheisyydessä oleva eristetty terässäiliö, jonka koko vaihtelee muutamista sadoista kuutioista jopa 40 000 m³:n asti. Pienet säiliöt rakennetaan usein paineellisiksi ja suuret

paineettomiksi. Tosin paineettomatkin säiliöt rakennetaan kestävämpään ylipainetta. Veden ominaisuuksien vuoksi paineistamattomassa säiliössä lämpötila ei voi olla yli 100 °C, joten akusta purettavan veden lämpötilaa täytyy nostaa, jos vaadittu kaukolämmön menolämpötila tätä on suurempi. Tällöin myös akkua lataavan veden lämpötila lasketaan tarpeeksi alhaiseksi sunntauksella, jossa veteen sekoitetaan kaukolämpöverkon paluupuolelta viileämpää vettä. Isot paineistetut säiliöt rakennetaan tavallisesti 0,5–2 bar ylipaineelle, jolloin on mahdollista nostaa akun lämpötila vastaamaan kaukolämpöverkon maksimilämpötilaa. Suuremman energiatiheyden omaavat pienet paineistetut säiliöt on mahdollista rakentaa jopa kaukolämpöverkon paineeseen, jolloin ei tarvita paineenalennus- ja nostoasemaa akun ja kaukolämpöverkon väliin. (Guelpa et al. 2019, 7; Phetteplace 2013, 7.)

Kaukolämpöakku voidaan liittää kaukolämpöjärjestelmään suoralla tai epäsuoralla kytkennällä. Suoralla kytkennällä toteutetussa ratkaisussa kaukolämpöakussa kiertää sama vesi kuin muuallakin kaukolämpöjärjestelmässä. Epäsuorassa kytkennässä akulla on oma vesikiertonsa, jolloin se kytketään kaukolämpöjärjestelmään lämmönvaihtimen välityksellä. Kytkentätapaan vaikuttavat esimerkiksi akun ja muun kaukolämpöjärjestelmän välillä oleva paine- ja lämpötilaero sekä veden laatu. (Guelpa et al. 2019, 7; Koskelainen et al. 2006, 386.)

Kaukolämpöakun termodynaaminen periaate on, että samaan säiliöön voidaan varastoida vettä eri lämpötiloissa ilman, että ne sekoittuvat keskenään (Kuva 10). Veden lämpötilaa muutetaan, mutta akun vesimäärä pyritään pitämään vakiona. Veden tiheys muuttuu lämpötilan funktiona, joten akussa oleva vesi kerrostuu siten, että kuumin vesi on säiliön yläosassa ja viilein alaosassa. Akun ylä- ja alaosan väliin muodostuu lämpötilagradientiltaan suuri termokliini, joka on tyypillisesti noin metrin paksuinen. Tämä kerros on oleellista pitää niin ohuena kuin mahdollista akun hyötysuhteen maksimoimiseksi. Akun korkeuden suhde halkaisijaan vaikuttaa merkittävästi termokliinin paksuuteen. Suhteen kasvaessa termokliini ohenee ja päinvastoin. Säiliössä vedenpinnan yläpuolella oleva tila täytetään tyypillisesti höyryllä 10–25 mbar ylipaineeseen, minkä tarkoituksena on estää hapen pääsy vapaaseen tilaan, jotta happea ei pääse akussa olevaan veteen. Lisäksi höyrypatja suojaa säiliön pintoja korroosiolta. Akussa vallitsevaa painetta hallitaan säiliön kannen varoventtiileillä. (Phetteplace 2013, 7; Streckiene et al. 2009, 2312.)



Kuva 10: Kaukolämpöakun periaatekuva. Laadittu lähteistä Phetteplace (2013, 7) ja Badyda et al. (2011, 12).

Kaukolämpöakkuun varastoitunut lämpöenergia lasketaan yhtälön 7 mukaisesti (Streckiene et al. 2009, 2311).

$$Q_{akku} = m_{av}c_{p,av}\Delta T = \rho_{av}V_{av}c_{p,av}\Delta T \quad (7)$$

missä

Q_{akku}	akun lämpöenergia	[J]
m_{av}	akun veden massa	[kg/s]
$c_{p,av}$	akun veden ominaislämpökapasiteetti	[kJ/kg°C]
ρ_{av}	akun veden tiheys	[kg/m ³]
ΔT	lämpötilaero	[°C]
V_{av}	akun veden tilavuus	[m ³]

Kun huomioidaan akun kerrostuneisuus (Kuva 10), yhtälö voidaan johtaa seuraavaan muotoon (Badyda et al. 2011, 12):

$$Q_{akku} = \sum_n \frac{\pi d^2}{4} l_n \rho_{av} c_{p,av} (T_n - T_{paluu}) \quad (8)$$

missä

d	akun sisähalkaisija	[m]
l_n	n:n kerroksen korkeus	[m]
T_n	veden lämpötila alueella n	[°C]
T_{paluu}	kaukolämmön paluulämpötila	[°C]

Yhtälöstä havaitaan, että kaukolämpöakkuun varastoitunut energia riippuu kaukolämmön paluulämpötilasta. Eli mitä suurempi on verkon jäähtymä, sitä suuremmaksi muodostuu myös akkuun varastoitunut lämpöenergia.

Kaukolämpöakkua ladataan syöttämällä kuumaa vettä säiliön yläosaan ja samalla pumppamalla alaosasta vastaava vesimäärä kaukolämpöjärjestelmään. Kun akkua puolestaan puretaan, säiliön alaosaan johdetaan kaukolämmön paluupuolelta viileää vettä, jota vastaava määrä kuumaa vettä pumpataan yläosasta kaukolämpöverkon meno- tai paluuputkeen akun veden lämpötilasta riippuen. Vesivirtaukset säiliöön johdetaan diffuusorien eli virtauksen jakajien läpi, jotta vertikaaliset virtaukset säiliön sisällä saadaan minimoitua ja vesi sekoituisi mahdollisimman vähän. Virtausten optimoinnissa tulee lisäksi ottaa huomioon veden tilavuuden muutos lämpötilan funktiona, jotta säiliön pinnankorkeus saadaan pidettyä mahdollisimman stabiilina. Akun minimi lataus- ja purkausteho määräytyy akun pumppujen minimitehon mukaan. Kavitaation estämiseksi akun vesivirtauksille on asetettava riittävä minimivirtaus, jotta pumpun imuaukossa vallitseva paine on tarpeeksi suuri. (Koskelainen et al. 2006, 386; Phetteplace G. 2013, 7.)

3.3.4 Reduktio

Höyrylinjan reduktioaseman tarkoituksena on alentaa höyryn paine ja lämpötila sopivalle tasolle. Tyypillisesti reduktioasema koostuu painetta alentavan reduktioventtiilin lisäksi ruiskutusvesi- ja sulkuventtiilistä. Ruiskutuksessa vettä syötetään sumuna tai pisaroina

venttiilin karan läpi istukkaosaan, jossa höyrystynyt vesi sekoittuu kuumempaan höyryvirtaan alentaen sen lämpötilaa. Höyryn massavirta kasvaa syötetyn ruiskutusvesimäärän verran. Kaukolämpökäyttöön reduktiolla ohjataan kattilalta tulevaa tuorehöyryä turbiinin ohi suoraan reduktiolämmönvaihtimelle, joka on tyypillisesti vastaavanlainen putki-vaippalämmönvaihdin kuin luvussa 3.3.1 esitetty väliotto- tai vastapainelämmönvaihdin. Joissakin ratkaisuissa reduktio ohjataan samaan kaukolämpövaihtimeen kuin turbiinilta tuleva höyry. Höyryn paine ja lämpötila määräytyvät vaaditun kaukolämmön menolämpötilan mukaan. (Mönkkönen 2023.)

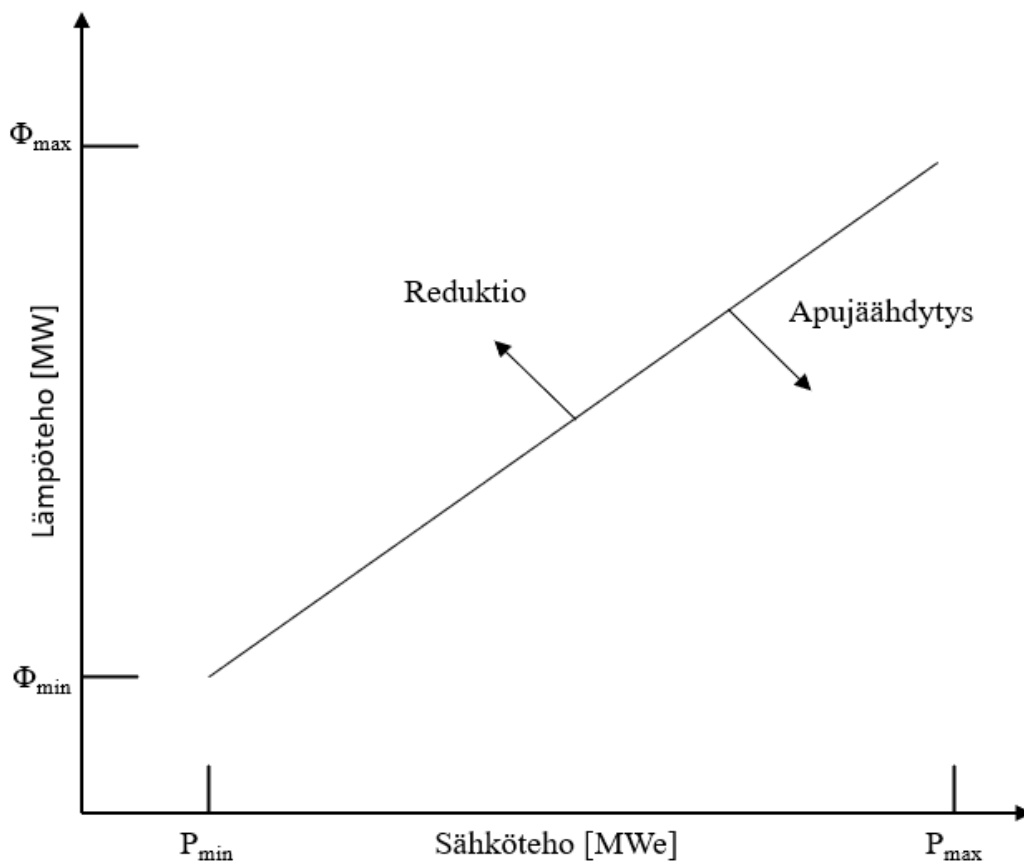
Reduktioajolla saadaan vähennettyä sähköntuotantoa ja lisättyä lämmöntuotantoa sellaisina ajankohtina, kun lämmöntarve on suuri. Reduktioaseman avulla lämmöntuotanto on myös mahdollista tilanteessa, jossa turbiini ei ole käytössä esimerkiksi rikkoutumisen takia. Energiatehokkuuden näkökulmasta reduktioajo ei ole optimaalisin ratkaisu, koska höyryn paine on nostettu tarpeettoman korkealle, minkä jälkeen se alennetaan reduktioventtiilillä ennen höyryn johtamista lämmönvaihtimelle. Hyötysuhteen parantamiseksi voidaan ajaa lähtökohteisesti matalampaa painetta, mikä edellyttää, että kattilan säätöratkaisut ovat tällaiseen soveltuvat ja järjestelmä kestää paineen muutokset ajotavan muuttuessa. Tyypillisesti reduktiolämmönvaihdinta pidetään jatkuvasti valmiudessa, eli kaukolämpövesi virtaa sen läpi. Reduktio on oleellista pitää paineisena ja tarpeeksi lämpimänä, koska sen nopea käynnistys kylmänä voi aiheuttaa vaurioita laitteissa. Tämän takia höyryä päästetään jatkuvasti hieman läpi joko reduktioventtiilin minimiavaumalla tai jaksoittain pieninä määrinä. (Mönkkönen 2023.)

3.3.5 Apujäähdytys

CHP-tuotannossa sähköntuotanto riippuu rakennusasteen mukaisesti lämmöntuotannosta. Tuotannossa tulee kuitenkin tilanteita, joissa sähköä halutaan tuottaa mahdollisimman paljon esimerkiksi korkean pörssihinnan takia, ja tällöin tuotettu lämpöteho voi olla liian suuri kaukolämpöverkon kulutukselle. Kuten aikaisemmin esitettiin, lämpöä voidaan varastoida, mikäli siihen ylipäättään on mahdollisuus. Mahdollinen kaukolämpöakku voi kuitenkin olla jo täyteen varattu, tai akun latausteho voi olla liian pieni kaikelle ylijäämälämmön kulutukselle. Tällaisessa tilanteessa ylimääräinen lämpö voidaan ohjata apujäähdytykseen, joka poistaa lämpöä systeemistä. Apujäähdytystä käytetään erityisesti myös silloin, kun lämpökuorma

olisi niin pieni, että kattilan teho laskisi alle minimimitoituksen ja kattila jouduttaisiin pysäyttämään. (Mönkkönen 2023.)

Energiatohokkuuden näkökulmasta apujäähdytyksen käyttö ei ole mielekäästä. Tuotettu lämpö jäähdytetään lämmönsiirtimen välityksellä läheiseen vesistöön tai joissakin tapauksissa ilmaan, jolloin se menee kokonaan hukkaan. Verrattuna perinteiseen lauhdevoimalaitokseen myös sähköntuotannon hyötysuhde on huonompi turbiinin korkean vastapaineen takia. Apujäähdytyksen käyttö on siis perustelua vain silloin, kun sen avulla tuotetun ylimääräisen sähkön tuotto on suurempi kuin tuotantokustannukset tai kattilan teho on putoamassa sen minimimitoituksen alapuolelle. Kuvassa 11 on havainnollistettu reduktion ja apujäähdytyksen vaikutukset lämpö- ja sähkötehon välisessä karakteristikassa. (Mönkkönen 2023.)



Kuva 11: CHP-laitoksen lämpö- ja sähkötehon välinen karakteristika. Laadittu lähteestä Wang et al. (2022).

3.4 Kaukolämpöverkosto ja jakelu

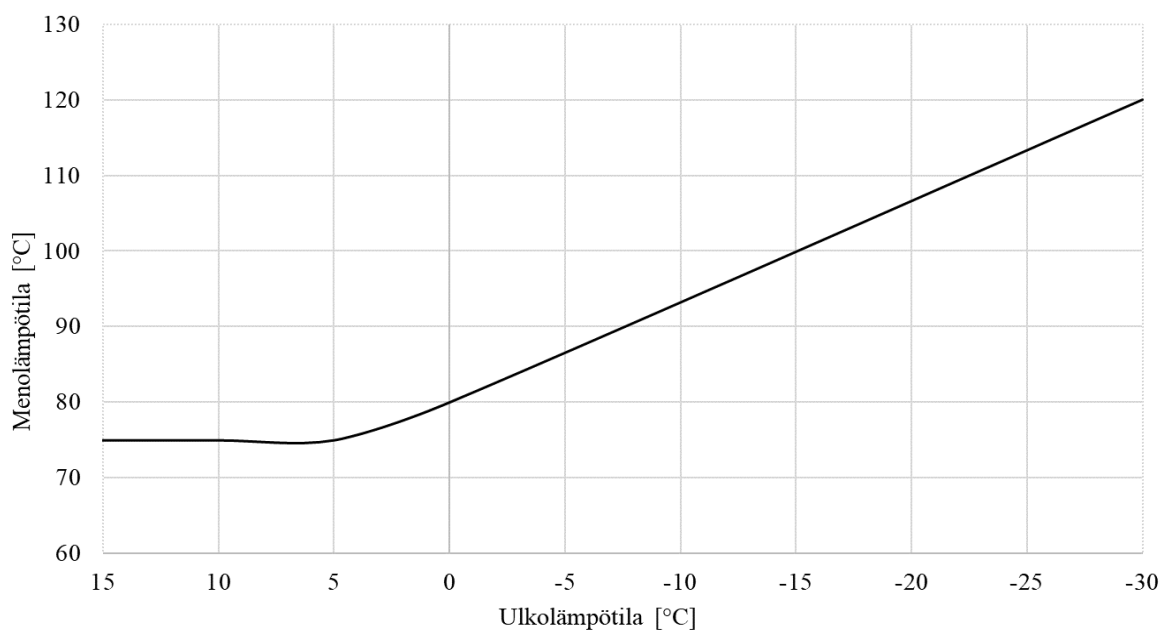
Kuten luvussa 3.1 esitettiin, kaukolämmön jakelu Suomessa perustuu kaksiputkijärjestelmään. Kaukolämpöverkoston meno- ja paluuputket asennetaan maan alle tyypillisesti 0,5–1 metrin syvyyteen yhdensuuntaisesti joko saman tai erillisten eristekuorien sisään. Virtausputket ovat pääsääntöisesti valmistettu teräksestä, mutta joissakin järjestelmissä voi olla käytössä myös kupari- tai muoviputkia. Putkityypin ja materiaalin valintaan vaikuttavat muun muassa tehontarve, rakennuspaikka, maaperä ja verkoston mitoituslämpötila. Kokonaisuudessaan verkosto muodostuu siirtojohtoista, runko- ja jakelujohdoista sekä talojohdoista. Halkaisijaltaan suuret siirtojohdot yhdistävät tuotantolaitokset verkoston runko- ja jakelujohtoihin, jotka jakavat kaukolämpöveden edelleen pienempiin jakelujohtoihin ja talojohdoin. Talojohdot kuljettavat kaukolämpöveden kuluttajan lämmönjakokeskukseen, joissa lämpö siirtyy lämmönvaihtimen välityksellä kuluttajan suljettuun piiriin. Työn rajauksen takia asiakaslaitteita ja kaukolämpöputkistojen rakenteellisia ominaisuuksia ei käsitellä laajemmin. (Energiateollisuus 2022f; Mäkelä et al. 2015, 50–55.)

Suuresta putkimäärästä ja merkittävistä rakennuskustannuksista johtuen kaukolämpöverkosto on kaukolämpöjärjestelmän suurin investointi. Lisäksi mahdollisista korjaus- ja huoltotoista aiheutuu haittaa kaupunkialueen liikenteelle sekä muulle yhteiskunnalliselle toiminnalle. Näiden takia kaukolämpöjärjestelmä on oleellista rakentaa siten, että se kestää käyttökuntoisena vähintään 30–50 vuotta. Verkoston kestävyys vaikuttavat putkityypin ja materiaalien lisäksi kaukolämpöveden laatu, vuodot ja ulkopuolinen vesi sekä erityisesti käyttöolosuhteet, kuten verkoston paine ja lämpötila. Kaukolämpövesi käsitellään siten, että siitä poistetaan epäpuhtaudet ja happi, jotta vältetään putkien sisäpuoliselta korroosiolta. Veden sähkönjohtavuuteen ja pH-arvoon vaikutetaan erilaisilla kemikaaleilla. Lisäksi veteen usein lisätään fluoresoivaa väriä antavaa kemikaalia, jotta mahdolliset vuodot pieninäkin määrinä on helppo paikantaa ultraviolettivalon avulla. (Koskelainen et al. 2006, 368; Mäkelä et al. 2015, 50–55.)

3.4.1 Kaukolämpöverkon meno- ja paluueden lämpötila

Kaukolämpöverkkoon pumpattavan menoveden lämpötila vaikuttaa merkittävästi kaukolämpöjärjestelmän toimintaan sekä tehokkuuteen, joten se on yksi olennaisimmista säädettävistä parametreista kaukolämpöjärjestelmässä. Menoveden lämpötilan ohjauksen perustana on varmistaa riittävä ja häiriötön lämmöntoimitus asiakkaille. Menoveden lämpötilan optimoinnin hyödyt koostuvat pääosin ajomäärien painottumisesta halvemmalle tuotannolle, sähköntuotannon kasvusta, tehokkaammista pumppausjärjestelyistä sekä lämpöhäviöiden pienentymisestä. (Energieollisuus 2021, 5–7.)

Suomessa menoveden lämpötilan säätö perinteisesti pohjautuu Lämpölaitosyhdistys ry:n kehittämään ohjeelliseen säätökäyrään (Kuva 12), jossa menoveden lämpötilaa säädetään ulkolämpötilan mukaisesti. Käytännössä kyseistä säätökäyrää korjataan tapauskohtaisesti siten, että se vastaa paremmin kyseisen kaukolämpöverkon ominaisuuksia pumppauksen ja lämpöhäviöiden osalta. Ulkolämpötilaan perustuva säätö vastaa kuitenkin vain kohtuullisesti verkon todelliseen kulutukseen. Kuten luvussa 3.2 esitettiin, kulutukseen vaikuttaa myös moni muu parametri, kuten esimerkiksi viikonpäivä, sademäärä, kellonaika, tuulisuus ja aurinkoisuus. (Energieollisuus 2021, 5–7.)



Kuva 12: Lämpölaitosyhdistys ry:n kehittämä ohjeellinen kaukolämmön menoveden lämpötilan säätökäyrä ulkolämpötilan funktiona. Laadittu lähteestä Koskelainen et al. (2006, 336).

Kaukolämpöverkossa siirtyvä lämpöteho riippuu veden massavirrasta sekä meno- ja paluu- lämpötilojen erotuksesta eli jäähtymästä yhtälön 9 mukaisesti (Koskelainen et al. 2006, 198).

$$\phi_{kl} = q_{m,kv} c_{p,kv} (T_{meno} - T_{paluu}) \quad (9)$$

missä

ϕ_{kl}	kaukolämpöteho	[W]
$q_{m,kv}$	kaukolämpöveden massavirta	[kg/s]
$c_{p,kv}$	kaukolämpöveden ominaislämpökapasiteetti	[kJ/kg°C]
T_{meno}	menoveden lämpötila	[°C]
T_{paluu}	paluuveden lämpötila	[°C]

Kuten yhtälöstä 9 havaitaan, kaukolämpöveden massavirta on kääntäen verrannollinen verkon jäähtymään. Menoveden lämpötilaa säädetään tuotantolaitokselta, mutta veden virtaus määräytyy asiakaslaitteissa. Virtausnopeuteen voidaan kuitenkin epäsuorasti vaikuttaa muuttamalla menoveden lämpötilaa. Virtausnopeus kasvaa menoveden lämpötilaa laske- malla ja puolestaan laskee menoveden lämpötilaa nostamalla. Jäähtymä riippuu pääasiassa asiakkaan toisiopuolen paluulämpötilasta. Merkittävintä vaihtelua asiakkaan paluulämpötilaan aiheuttaa lämpimän käyttöveden tarpeen satunnainen vaihtelu. Tuotantolaitokselle palaava vesi on usein lämpimämpää kuin välittömästi asiakkailta lähtevä vesi, koska verkossa on meno- ja paluupuolen yhdistäviä kytkentöjä. (Koskelainen et al. 2006, 335.)

Kaukolämmön menolämpötilaa alarajalla rajoittavat seuraavat tekijät (Energieateollisuus 2021, 20; Koskelainen et al. 2006, 335–336):

- asiakaslaitteiden mitoitus ulkolämpötilan ja muiden sääolosuhteiden mukaisesti
- asiakkaan käyttöveden lämpötilan oltava vähintään 55 °C
- lämpöhäviöistä johtuvan menolämpötilan lasku kriittisellä asiakkaalla
- mahdollisesti verkon siirtokyky, jos virtauksen kasvattaminen ei ole taloudellisesti järkevää tai se aiheuttaa liian suuret painehäviöt

Sen sijaan menolämpötilaa ylärajalla rajoittavat:

- verkon suunnittelulämpötila (yleensä 120 °C)
- CHP-tuotannossa aleneva sähköntuotanto korkeammilla menolämpötiloilla (korkeampi menolämpötila aiheutuu turbiinin suuremmasta vastapaineesta, mikä heikentää höyryn paisuntaa turbiinissa)
- kasvavat lämpöhäviöt

Kaukolämpöjärjestelmä on kokonaisuutena monimutkainen, koska se sisältää riippuvuuksia lämmöntuotannosta ja -jakelusta asiakkaiden talotekniikkaan. Tämän takia myös menoveden lämpötilan optimointi on monimutkaista. Optimointi on mahdollista tehdä esimerkiksi laskemalla kokonaiskustannusminimi kahden merkittävimmän kustannustekijän eli lämpöhäviöiden ja pumppaukseen käytetyn sähkön välillä. Lisäksi paremmin eristetyt uudet kaukolämpöjohdot, asiakkaiden energiatehokkuussaneeraukset ja kehittyneet säätö- ja automaatiojärjestelmät mahdollistavat verkon ajotavan päivittämisen teknistaloudellisesti tehokkaammaksi. Kuten luvussa 3.2.3 esitettiin, alhaisempi menolämpötila myös mahdollistaa hukkalämpöjen tehokkaamman hyödyntämisen. (Energiateollisuus 2021 5–6.)

3.5 Lämmön varastoinnin sovellukset kaukolämpöverkon hallinnassa

CHP-laitoksen sähkön- ja lämmöntuotannon välistä riippuvuutta voidaan vähentää lämpöenergian varastoinnin sovelluksilla. Lämpöä voidaan varastoida joko kaukolämpöverkkoon, jolloin puhutaan verkon akkumuloinnista tai suuremmassa mittakaavassa erilliseen lämpövarastoon. Tässä luvussa käsitellään lämmön varastoinnin tuomia hyötyjä kaukolämpöverkon hallintaan ja tuotantoyksikön taloudellisuuteen.

3.5.1 Lämmön varastointi kaukolämpöverkkoon

Kaukolämpöverkossa kiertävä suuri vesimäärä mahdollistaa suhteellisen suuren kapasiteetin lämmön varastoinnille itse verkkoon. Verkon akkumulointi perustuu veden melko hitaaseen virtausnopeuteen kaukolämpöputkissa, jolloin tuotantolaitokselta pumpattava menovesi säästää osan kuluttajista vasta usean tunnin kuluttua. Verkon akkumuloinnissa menoveden lämpötilaa nostetaan ajotilanteen ja ohjekäyrän vaatimaa tasoa suuremmaksi, jolloin

verkkoon sitoutuu enemmän lämpöä, kuin verkossa on kulutusta. Verkostosta ja halutusta varauksesta riippuen lämpötilaa voidaan nostaa 5–20 °C. Tavallisesti varaus kestää muutamman tunnin, joten sillä voidaan kattaa tuntitason muutoksia eli esimerkiksi aamun kulutus-huippu nostamalla menoveden lämpötilaa aamuyöllä. Varaus purkautuu kuluttajien laitteissa, jotka säätelevät kaukolämpöveden virtausta lämmöntarpeen mukaisesti niin, että paluuv veden lämpötila pysyy menolämpötilasta huolimatta lähes vakiona. Jos kulutus ei nouse, virtaus hidastuu kuluttajalaitteiden myötä ja kaukolämpöverkkoon akkumuloitu lämpöenergia siirtyy verkossa entistä hitaammin. (Koskelainen et al. 2006, 389.)

Lämpöä voidaan varata menoveden lisäksi myös kaukolämmön paluuveteen, jolloin tuotantolaitokselle palaavan veden lämpötila on lähempänä menoveden lämpötilaa ja vaatii vähemmän lämmitystehoa, kun se johdetaan takaisin menovedeksi kaukolämpöverkkoon. Lämmön varastointi paluuputkeen mahdollistetaan meno- ja paluuputkien välisillä ohitusventtiileillä. Lämmön varastointi kaukolämpöverkkoon on mahdollista toteuttaa myös niin, että tuotantolaitokselta lähtevän menoveden lämpötilaa lasketaan alle ohjekäyrän mukaisen arvon ja samalla nostetaan kaukolämpöveden virtausta verkossa. Tämä kasvattaa virtausta kuluttajien laitteissa ja aiheuttaa verkkoon lämmön vajeen, joka myöhemmin palautetaan nostamalla menoveden lämpötila takaisin ohjearvoonsa. (Koskelainen et al. 2006, 389.)

Suurin hyöty lämmön varastoinnissa kaukolämpöverkkoon on kulutushuippujen tasaaminen. Verkon akkumulointi ei myöskään vaadi fyysisiä investointeja toisin kuin erillinen lämpövarasto, koska kaukolämpöverkko on tietysti jo olemassa. Parhaimmillaan verkon akkumuloinnilla voidaan välttää huipputeholaitosten käyttöä, joissa tuotantokustannukset ovat tyypillisesti merkittävästi suuremmat kuin peruskuormalaitoksessa. Lisäksi lyhytkestoinen yلیلämmön tuottaminen mahdollistaa CHP-laitoksen sähkötehon nostamisen, mikäli sille on tarvetta. Nopea joustomahdollisuus sähkötehosta myös mahdollistaa CHP-laitoksen osallistumisen sähköverkon taajuudentuentaan. (Korpela et al. 2017, 312.)

Kaukolämpöverkon akkumuloinnilla on myös haitallisia vaikutuksia. Korkeat lämpötilat ja etenkin nopeat lämpötilan muutokset aiheuttavat lämpörasitusta rakenteisiin. Tämän takia menoveden lämpötilagradientille on asetettu rajoitus, joka on suomalaisissa kaukolämpöjärjestelmissä yleensä 1–2 °C kuutta minuuttia kohden. Käytännössä menoveden lämpötilaa muutetaan usein rajoitusta selvästi maltillisemmalla nopeudella, koska verkon akkumulointia pystytään tyypillisesti ennustamaan, eikä äkillisille muutoksille ja turhille rakenteellisille rasituksille ole täten tarvetta. Muutosnopeuden rajoituksen lisäksi menoveden lämpötilan

CHP-laitokselta ei tulisi poiketa yli 10 °C:tta suhteessa muihin samassa kaukolämpöverkostossa toimiviin tuotantolaitoksiin. Tällöin vältetään liialliset lämpörasitukset verkoston kohdissa, joissa eri tuotantolaitosten menovedet sekoittuvat keskenään. (Korpela et al. 2017, 312.)

3.5.2 Lämmön varastointi kaukolämpöakkuun

Verkon akkumulointiin verrattuna kaukolämpöakku mahdollistaa merkittävästi suuremman ja pitkäkestoisemman lämpöenergian varastointikapasiteetin. Suomessa kaukolämpöakut ovat tyypillisesti mitoitettu kattamaan yllättävät muutaman tunnin häiriöt, jolloin akku on mitoitettu yleensä pääkattilan tehon perusteella. (AFRY 2020, 62.)

CHP-laitoksen yhteydessä olevan kaukolämpöakun avulla voidaan saavuttaa esimerkiksi seuraavia hyötyjä (Koskelainen et al. 2006, 383; Phetteplace G. 2013, 7):

- sähkön korkean pörssihinnan aikana sähköntuotantoa voidaan lisätä, vaikka kaukolämmön kulutus ei kasvaisi, koska tuotettu ylimääräinen lämpö voidaan ladata akkuun
- joustomahdollisuus sähkötehossa mahdollistaa laitoksen osallistumisen sähköverkon taajuudentuentaan
- akkuun ladattua lämpöenergiaa voidaan purkaa kaukolämpöverkkoon lämmön huippukulutuksen aikana, jolloin mahdollisesti vältetään käynnistämästä huipputeholaitosta, jossa tuotantokustannukset ovat yleensä suuremmat
- kokonaispäästöt laskevat, koska tyypillisesti huipputeholaitosten päästöt tuotettua tehoa kohden ovat suuremmat
- akussa olevaa vettä voidaan häiriötilanteessa hyödyntää verkon vesireservinä, jolloin akku tukee verkon paineenpitoa
- akun avulla apujäähdyttimen käyttöä voidaan vähentää
- kaukolämmön toimitusvarmuus asiakkaille kasvaa

Kaukolämpöakun käytöstä saatavat hyödyt ovat kuitenkin prosessikohtaisia ja riippuvat akun käyttötavoista. Akun käyttöön vaikuttavat esimerkiksi ulkolämpötila, akun varaus, tuotannon jakautuminen tuotantoyksiköiden välillä, sähkön hinta sekä kaukolämmön kulutus. (AFRY 2020, 62.)

4 Voimalaitosprosessien tasesäätökonsepti

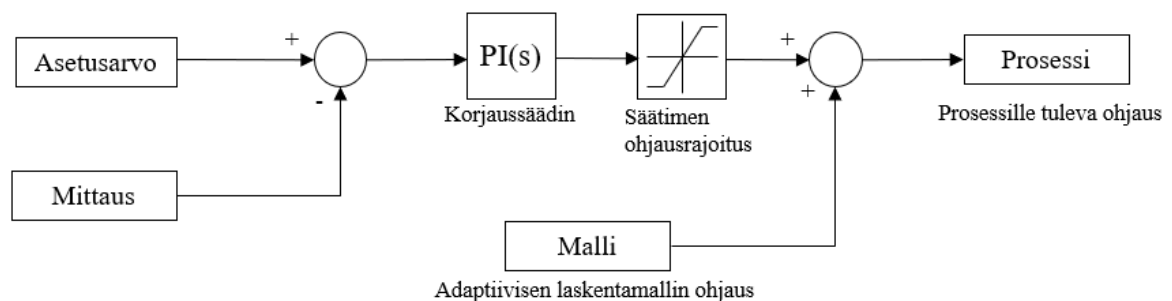
Tässä luvussa esitellään lyhyesti AFRYn pääasiassa voimalaitosprosesseihin kehittämät tasesäätöratkaisut, joita on sittemmin sovellettu myös kaukolämpöverkkojen säätöihin. Näitä myös hyödynnetään soveltuvin osin tämän työn kaukolämpöjärjestelmän simulaattorissa. Työn laajuuden ja rajauksen takia säätötekniikan teoriaa ei käsitellä laajemmin.

4.1 Balance+

Balance+ on AFRYn kehittämä patentoitu voimalaitosprosessien säätökonsepti. Balance+ -konseptia voidaan hyödyntää muun muassa erinäisiin höyrykattilaprosesseihin ja se voidaan implementoida kaikkiin moderneihin automaatiojärjestelmiin. Sitä on sovellettu menestyksekkäästi esimerkiksi kattilan tuorehöyryn ja lämpötilan säätöön, primääri- ja sekundääri-ilmasäätöihin, läpivirtauskattiloissa tuliteho-vesitasapainon saavuttamiseen sekä kiertokattiloissa lieriön pinnankorkeuden säätöön. Konseptia voidaan hyödyntää myös kaukolämpöjärjestelmän säätöihin. (Mönkkönen 2023.)

Voimalaitosten kokonaishyötysuhde on pitkälti riippuvainen prosessiteknisistä ratkaisuista, mutta lopullinen saavutettava hyötysuhde riippuu merkittävästi myös kattilaa ja voimalaitosyksikköä ohjaavista säädöistä. Muun muassa prosessien lukuisat ristikkäisvaikutukset, erilaiset häiriöt, vaihtelevalaatuinen polttoaine sekä hidas ja epäsymmetrinen dynamiikka aiheuttavat haasteita säädöille. Hyvin toimivat säädöt mahdollistavat prosessin stabiilimman käyttäytymisen, jolla on lukuisia hyötyjä taloudellisuuden, ekologisuuden ja toimintavarmuuden näkökulmasta. Balance+ -konseptin ratkaisuilla saavutetaan esimerkiksi laitoksen pienempi minimiteho, suurempi maksimiteho, tasaisempi ajo, pienempi omakäyttöteho, alhaisemmat käyttökustannukset, vähentyneet päästöt sekä nopea vaste kuormanmuutoksiin, jolloin on mahdollisuus osallistua sähköverkon taajuudentuentaan. Stabiilimman prosessin ansiosta myös laitteiston käyttöikä pitenee, koska se vähentää komponentteihin kohdistuvaa rasitusta. Samalla toimintavarmuus paranee ja toimilaitteiden huoltoväli pitenee. (Mönkkönen 2023.)

Balance+ -konseptin ratkaisut perustuvat taseyhtälöihin sekä adaptiivisiin prosessimalleihin yhdessä PI-säädinten kanssa. Adaptiivisuus perustuu mitattaviin apumuuttujiin, joita käytetään sisäänmenoina laskentamalleille. Näitä malleja päivitetään prosessista saatavan historiadan perusteella, jolloin saavutetaan nopea vaste toimintapisteen muutoksissa. Adaptiivisuuden ansiosta säätöjen myöhemmälle viritykselle ei ole juurikaan tarvetta. Taseyhtälöiden avulla säädettävät prosessit saadaan tarkemmin pidettyä vakaampana. Kuvassa 13 on esitetty yksinkertaistettu Balance+ -konseptin toimintaperiaate lohkokaaaviona. (Mönkkönen 2023.)



Kuva 13: Yksinkertaistettu Balance+ -konseptin toimintaperiaate. Laadittu lähteestä AFRY (2023a).

Säätökonseptin ratkaisuisa taseyhtälöillä lasketut ohjaukset lisätään varsinaisten säätimien ulostuloihin eli ne toimivat perusarvona, joka antaa toimilaitteelle laskennallisen ohjaustarpeen. Tämän tarkoituksena on poistaa mitattavissa olevien häiriöiden vaikutus ennen kuin ne välittyvät prosessiin. Tällöin perinteiset PID-säätimet toimivat korjaussäätiminä ja adaptiivisten mallien ansiosta taseyhtälöiden avulla saadut ohjaukset saavat pidemmällä ajanjaksolla korjaussäätimen ohjauksen kohti nollaa. Tällöin säädin ei aiheuta häiriötä prosessiin. Korjaussäätimiä myös rajoitetaan siten, että lähellä tasapainoasemaa säädin ei saa ohjata ollenkaan tai se saa tehdä vain maltillisia ohjauksia. Tällä menetelmällä vältetään turhat yli- ja aliohjaukset, jotka aiheuttavat häiriötä muualle prosessiin ja kuluttavat toimilaitteita tarpeettomasti. Sen sijaan kauempana tasapainotilasta säätimen ohjausta vahvistetaan, jotta ohjattava suure ei pääse poikkeamaan liian kauas asetusravostaan. (Mönkkönen 2023.)

4.2 Säätoratkaisut

Tässä luvussa esitellään lyhyesti Balance+-konseptiin perustuvat kaukolämmön menoveden lämpötilasäätö ja kaukolämpöakun säädöt. Kyseisiä säätoratkaisuja sovelletaan osittain työn simulaattorissa. Työn toimeksiantajan päätöksenä konseptin säätoratkaisuja ei kuvailla yksityiskohtaisemmin eikä säätökaavioita tuoda julki. Luvussa 5.3 selostetaan kuitenkin kokonaisuudessaan simulaattorissa käytettävät yksinkertaistetut säätoratkaisut.

4.2.1 Kaukolämmön menoveden lämpötilasäätö

Pitkät ja vaihtelevat viiveet aiheuttavat haasteita kaukolämpöjärjestelmän säädöille. Riittävän lämmöntoimituksen takaamiseksi ja energiatehokkuuden optimoimiseksi kaukolämmön menoveden lämpötilatasojen tulisi mukautua mahdollisimman tarkasti kuluttajien lämmöntarpeeseen. Balance+ -konseptin kaukolämmön menoveden lämpötilasäätö ohjaa kaukolämpöakun, reduktion ja apujäähdytyksen tehoja. Säädön tavoitteena on pitää kaukolämmön kulutus ja tuotanto tasapainossa. Asetusarvo menoveden lämpötilalle määräytyy joko automaattisesti ulkoilman lämpötilan mukaan tai manuaalisesti operaattorin asettamana. Menoveden lämpötilasäädin on korjaussäädin, jonka ohjaus on rajoitettu tietyille tehovälille. Lämpötilasäädin korjaa laskennallista kaukolämpötehon kulutusta, joka toimii kaukolämpötehon peruspyyntinä. Tästä pyynnistä vähennetään lämmönvaihtimien tuottama lämpöteho, minkä tuloksena saadaan lämpötehon tarve apulaitteille eli kaukolämpöakulle, reduktiolle ja apujäähdytykselle. (AFRY 2023b.)

Lähtökohtaisesti tehon lisätarve pyritään ajamaan kaukolämpöakulla ja vasta sitten reduktiolla tai apujäähdytyksellä. Jos tehoa on liikaa, ensisijaisesti ladataan akkua ja sitten lisätään apujäähdytystä. Mikäli tehoa puuttuu, ensin puretaan akkua, ja sitten ajetaan reduktiota. (AFRY 2023b.)

4.2.2 Kaukolämpöakun säädöt

Kaukolämpöakun tehosäädön tavoitteena on pitää akkua lataava tai purkava lämpöteho menoveden lämpötilasäädön asettamassa asetusravossa ohjaamalla akun pumpun nopeutta.

Säätöpiiriin kuuluu lisäksi akun pinnankorkeuden säätö sekä verkon keskipaineen tuenta akun imuventtiilin avulla. (AFRY 2023b.)

Akun lataus- tai purkaustehoa säädetään akun kiertopumpulla ja pumpun jälkeisellä kuristussäätöventtiilillä. Akun imuventtiiliä ohjaamalla pidetään akkuun menevä ja sieltä poistuva virtaus tasapainossa. Akun pinnankorkeuden säätö korjaa virtauspyyntiä niin, että akun pinta pysyy lähellä asetusarvoaan. Hetkellisissä verkon painehäiriöissä imuventtiili tukee painetta lisäämällä virtausta paineen noustessa ja päinvastoin. Akun lataus- ja purkauslogiikat sisältävät ehdot, jotka määrittävät tehonpyynnin suuruuden ja keston ennen kuin lataus- tai purkauspyynti astuu voimaan. Akun lataus- ja purkauspyynnit ovat rajoitettu akun varauksen mukaan, jotta akun virtaukset pysyvät järkevässä suuruusluokassa. (AFRY 2023b.)

5 Kaukolämpöjärjestelmän säätöratkaisuiden simulointi

CHP-laitoksen kaukolämpöjärjestelmän dynaamisella mallintamisella voidaan tutkia järjestelmän toimintaa ja erilaisten säätöratkaisuiden vaikutuksia prosessin käyttäytymiseen. Tässä luvussa esitellään aluksi Simatic PCS7 -prosessinohjausjärjestelmä, jolla kehitetään kaukolämpöjärjestelmän simulaattori tämän työn tutkimusta varten. Seuraavaksi esitellään kuvitteellinen prosessi, jonka perusteella työn malli laaditaan. Lopuksi tarkastellaan simuloinnin tuloksia eli käsitellään Balance+ -konseptin säätöratkaisuiden vaikutuksia laaditun mallin prosessiin erilaisten CHP-laitoksen ajotilanteiden aikana.

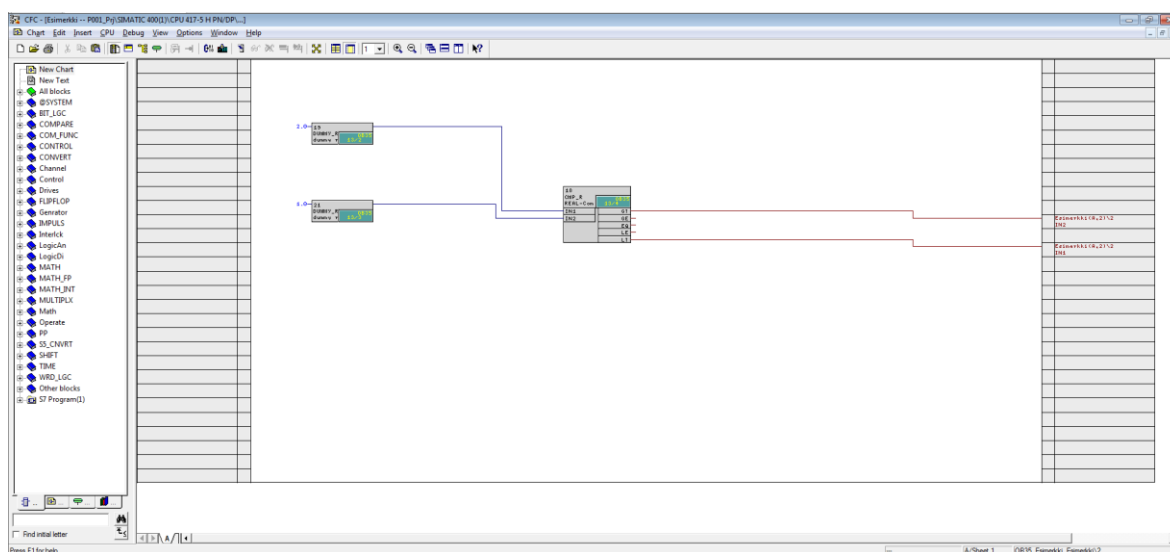
5.1 Simatic PCS 7

Simatic PCS 7 on Siemensin kehittämä hajautettu ohjausjärjestelmä, joka on globaalisti prosessiteollisuudessa laajasti käytössä. Ohjausjärjestelmä on prosessilaitoksen perusta, joka valvoo ja ohjaa laitoksen prosesseja sekä mahdollistaa digitalisaation kenttätasolta lähtien. Skaalautuvuutensa ansiosta PCS 7 -järjestelmän välityksellä voidaan hallita sekä pieniä että erittäin suuria teollisuuden prosesseja. Järjestelmä lukeutuu osaksi Siemensin TIA (Totally Integrated Automation) Portal -ohjelmointiympäristöä, joka mahdollistaa eri ohjelmistojen ja automaatiohierarkian jokaisen osa-alueen integroinnin yhdeksi kokonaisuudeksi. (Siemens 2023.)

PCS 7 -projektin rakenne vaihtelee tapauskohtaisesti hyvinkin paljon, mutta tyypillisesti siihen kuuluvat ainakin seuraavat pääkomponentit: automaatioasema (AS), operointiasema (OS) ja suunnitteluasema (ES). Suunnitteluasema toimii keskustietokoneena, jolla konfiguroidaan järjestelmän sisältämät laitteet sekä niiden yhteydet. Suunnitteluasemalla luodaan laitoshierarkia sekä kootaan ja ladataan konfiguroitu data automaatio- ja operointiasemille. Operointiasemalla valvotaan ja ohjataan järjestelmää prosessikuvien välityksellä. Operointiasema mahdollistaa tiedonsiirron kentältä valvomoon ja toisinpäin. Automaatioasemalla luodaan itse ohjelma, joka perustuu Siemensin S7-400 sarjan logiikoihin. Automaatioasema on yhteydessä kenttälaitteisiin ja se kerää sekä prosessoi dataa, jota välitetään operointiasemalle. Tiedonsiirto väylällä muun muassa eri asemien, IO-moduulien ja kenttälaitteiden

välillä tapahtuu standardoitujen kommunikointiprotokollien välityksellä. Tällaisia ovat esimerkiksi Profibus, Ethernet ja MPI. (Siemens 2016, 4.)

PCS7- järjestelmän ohjauskeskuksena toimii SIMATIC Manager, jossa on integroituna kaikki projektiin tarvittavat sovellukset ja työkalut. Ohjelman luomiseen käytetään pääasiassa graafisia CFC (Continuous Function Chart) -editoreita (Kuva 14). CFC:n rakenne koostuu kaavioon asetetuista toimilohkoista, jotka sisältävät ohjelmoituja toimintoja eli esimerkiksi laskutoimituksia. Toimilohkoja on saatavilla valmiiksi Siemensin luomista kirjastoista sekä niitä voi luoda myös itse. Toimilohko muodostuu tulo- ja lähtöliitännöistä, joiden välityksellä lohko lukee ja syöttää ulos dataa lohkon ohjelmoitujen toimintojen mukaisesti. Järjestelmän lohkoja on mahdollista ohjelmoida usealla eri ohjelmointikielellä, joita ovat Ladder Diagram (LAD), Function Block Diagram (FBD), Statement List (STL), Structured Control Language (SCL) ja S7- GRAPGH. (Siemens 2016, 5.)



Kuva 14: Simatic PCS7:lla luotu CFC-kaavio.

Kuvassa 14 on esitetty CFC-editori, johon on luotu esimerkkikaavio. Editorin yläosassa on työkalurivi ja kuvan vasemmassa laidassa on ikkuna toimilohkokirjastoille. Editorin työtilan molemmissa laidoissa on paikat tulo- ja lähtöliitännöille esimerkiksi saman kaavion muille sivuille, projektin muihin kaavioihin tai lohkojen instansseihin eli datablokkeihin, jotka nimensä mukaisesti säilövät dataa. Toimilohkojen, sivujen ja kaavioiden välisten liitännöiden avulla luodaan ohjelman kokonaisuuden toiminnallisuus. Liitännän väri indikoi datatyyppiä,

jota liitää välittää. Esimerkkikaavio vertaa kahden vakioksi määritellyn reaaliluvun suuruutta ja välittää vertailun ulostulon kaavion toiselle sivulle tulokytkenäksi. Todellisessa projektissa kyseinen vertailu voisi esimerkiksi perustua prosessista kerättäviin mittauksiin.

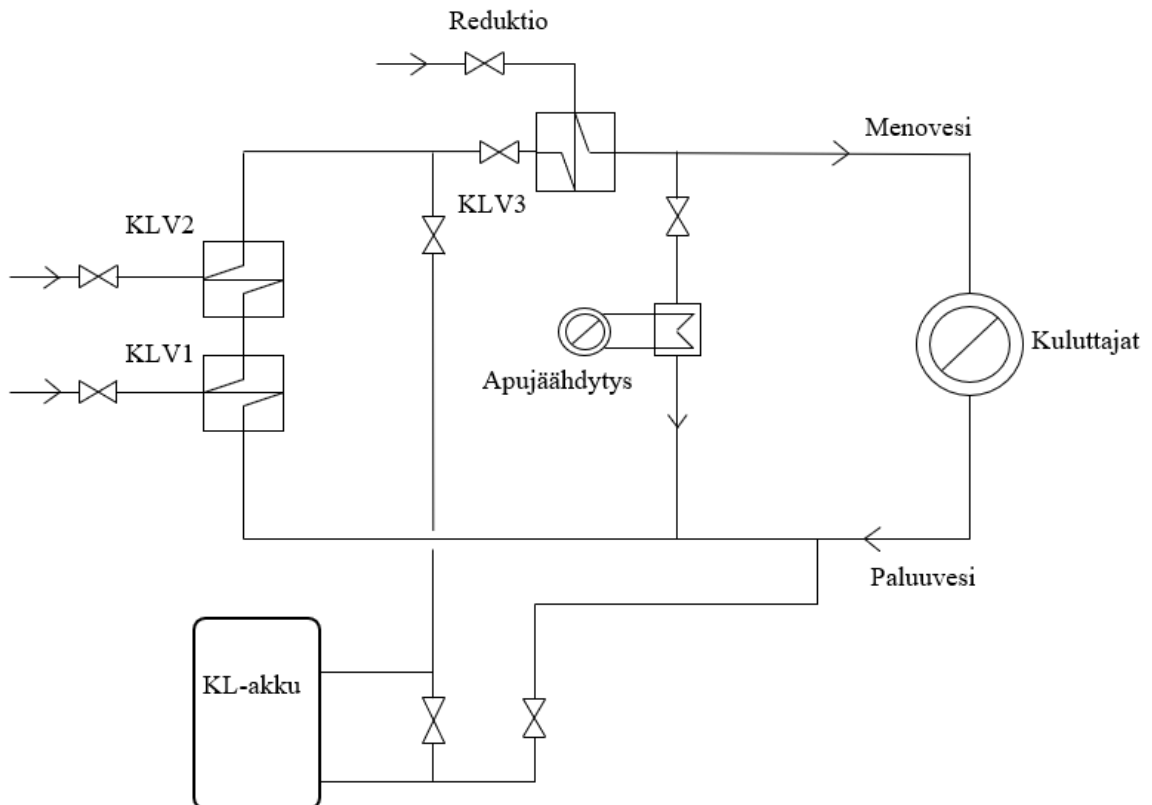
5.2 Mallinnettava prosessi

Matemaattisten mallien avulla voidaan simuloida erilaisten prosessien tai järjestelmien toimintaa. Mallit voidaan jakaa staattisiin ja dynaamisiin malleihin sen perusteella, miten ne käyttäytyvät ajan suhteen. Staattinen on ajasta riippumaton ja dynaaminen puolestaan ajasta riippuvainen. Mallin on tarkoitus sisältää tarkasteltavan prosessin tai järjestelmän oleelliset ominaisuudet, jolloin mallilla voidaan simuloida sen toimintaa halutuissa toimintapisteissä. Parhaimmillaankin malli on kuitenkin vain tarkka approksimaatio todellisesta prosessista. (Flynn 2011, 19–20.)

Oleellisimmat muuttujat, jotka vaikuttavat kaukolämpöjärjestelmän toiminnan kokonaisuuteen ovat meno- ja paluuveden lämpötila ja paine, virtaus, viiveet, lämmön tuotanto sekä lämmön kulutus. Lämpöhäviöt voidaan olettaa sisältyvän lämmön kulutukseen. Mallin suunnittelussa ja toteutuksessa on oleellista ottaa huomioon sen käyttötarkoitus. Tätä työtä varten laadittavan simulaattorin käyttötarkoituksena on demonstroida Balance+ -konseptin kaukolämpösäätöjen toimintaa erilaisissa CHP-laitoksen ajotilanteissa. Mallin esimerkkilaitokseksi valikoitui kuvitteellinen CHP-laitos, jonka kaukolämpöjärjestelmän toimintaa on tarkoitus simuloida. Tässä tapauksessa simulaattoriin on relevanttia konfiguroida ne komponentit, joilla on merkittävä vaikutus kaukolämpöjärjestelmän energiataseeseen, koska myös tarkasteltavat säätöratkaisut vaikuttavat ensisijaisesti järjestelmän tehotasapainoon. Tämän sekä työn rajallisen laajuuden takia simulaattoriin ei sisälly kaukolämpöjärjestelmän painetasoon liittyviä komponentteja, kuten pumppuja tai paisuntasäiliötä. Näin ollen tässä työssä ei tarkastella kaukolämpöjärjestelmän painesäätöjä. Mallin validointia ei suoriteta, koska simulointimalli ei perustu todelliseen prosessiin, josta olisi saatavilla mittausdataa vertailua varten.

Kuvassa 15 on esitetty periaatekaavio laadittavasta simulaattorista. Systemissä lämpöä kaukolämpöjärjestelmään välittävät ensisijaisesti turbiinin paisuntahöyryyn lämmönvaihdin KLV1 sekä turbiinin väliottohöyryyn lämmönvaihdin KLV2. Lämpöä voidaan tuoda prosessiin myös höyrylinjan reduktion välityksellä, jolloin höyryä ohjataan turbiinin ohi suoraan

reduktiolämmönvaihtimelle KLV3. Systemistä lämpöä pois puolestaan vievät apujäähdytys ja kaukolämmön kuluttajat. Kaukolämpöakun avulla systemistä voidaan poistaa lämpöä akkua lataamalla ja systeemiin voidaan tuoda lämpöä akkua purkamalla. Luvussa 3.3 käsiteltiin tarkemmin mallin komponentteja ja niiden funktioita kaukolämpöjärjestelmässä.



Kuva 15: Periaatekaavio kaukolämpöjärjestelmän simulaattorista.

Esimerkkilaitoksen komponenttien teholliset suoritusarvot ovat listattu Taulukkoon 2. Parametrit valikoidaan kirjallisuuden ja aikaisempien AFRYn toteuttamien Balance+ -projektien perusteella. Tässä tapauksessa komponenttien suoritusarvojen suuruusluokat eivät ole ratkaisevia tulosten kannalta, koska myöskään tutkittavien säätöratkaisuiden demonstrointi ei ole prosessin suuruusluokasta riippuvainen. Sen sijaan komponenttien parametrien määrittelyssä on olennaista, että niiden suhde toisiinsa vastaa mahdollisimman hyvin todellista prosessia, jolloin säätöratkaisuiden toiminnallisuuden tutkiminen on ylipäätään mielekästä.

Taulukko 2: Mallin komponenttien teholliset suoritusarvot

Sähköntuotannon nimellisteho [MW]	50
CHP-laitoksen rakennusaste [-]	1,8–2,2
Kaukolämpöakun kapasiteetti [MWh]	400
Kaukolämpöakun maksimi lataus- ja purkausteho [MW]	25
Reduktion maksimiteho [MW]	50
Apujäähdytyksen maksimiteho [MW]	50

CHP-laitoksen rakennusaste kasvaa suuremmilla sähkötehoilla, joten mallissa kaukolämmönvaihtimille KLV1 ja KLV2 tuleva lämpöteho on laskettu sähkötehon mukaan Taulukon 3 mukaisesti.

Taulukko 3: Mallin rakennusaste sähkötehon funktiona.

Sähköteho [MWe]	Lämpöteho [MW]	Rakennusaste [-]
10	22	0,450
20	41	0,475
30	60	0,500
40	76	0,525
50	90	0,550

Lämpötehon jakautuminen vastapainelämmönvaihtimen (KLV1) ja väliottolämmönvaihtimen (KLV2) välillä riippuu sähkötehosta Taulukon 4 mukaisesti. Mallin toteutuksessa pienemmillä tehoilla KLV1:n tuotanto on suhteessa suurempaa ja tehon ollessa 80 prosenttia tai enemmän maksimimitoituksesta, lämpöteho jakautuu lämmönvaihdinten välillä tasan.

Taulukko 4: Tehokuorman jakautuminen lämmönvaihtimien välillä.

Sähköteho [MWe]	KLV2/KLV1 [-]
10	0,40
20	0,44
30	0,47
40	0,50
50	0,50

5.3 Mallin toteutus

Prosessin mallin ja säätöpiirin muodostamisessa hyödynnetään Simatic PCS7:n valmiita toimilohkoja. Prosessin malli perustuu systeemin energia- ja massataseisiin. Kaukolämpöveden voidaan olettaa olevan kokoon puristumatonta, joten prosessin massavirran oletetaan olevan samansuuruinen joka puolella (Pöllänen 2017, 6). Lisäksi veden ominaiskapasiteetin oletetaan olevan prosessissa vakio. Kuten luvussa 3.4.1 ja yhtälössä 9 esitettiin, kaukolämpöveden virtaus määräytyy asiakaslaitteissa eli toisin sanoen asiakkaiden tehonkulutuksen määrämänä yhtälön 10 mukaisesti.

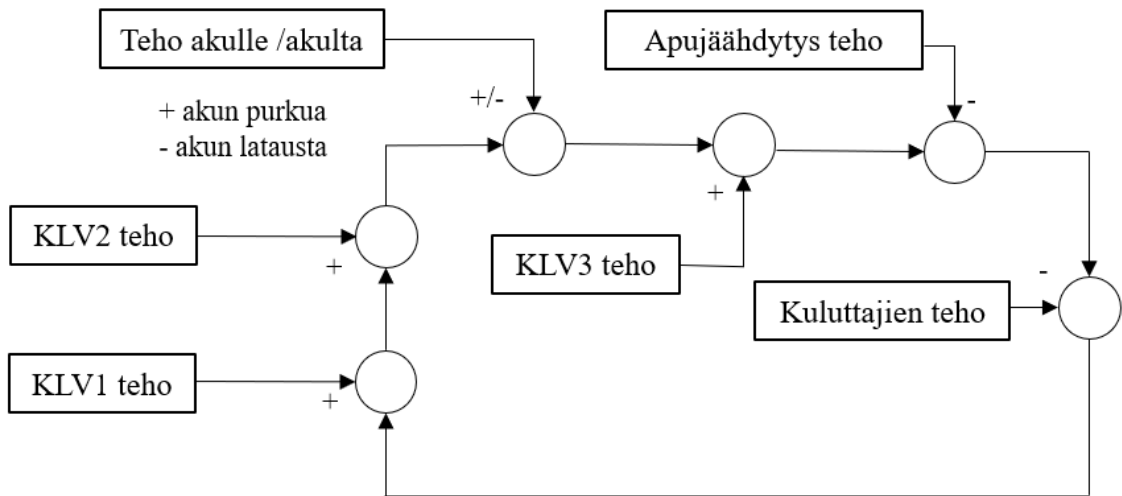
$$q_{m,kv} = \frac{\phi_{kl}}{c_{p,kv}(T_{meno} - T_{paluu})} \quad (10)$$

Mallin komponenttien vaikutukset kaukolämpöjärjestelmän tehoon on esitetty kuvassa 16, jonka pohjalta energiatase saadaan muodostettua. Systeemin energiataseen ja massavirran avulla voidaan määrittää lämpötilat halutuissa kohdissa yhtälön 9 periaatteen mukaisesti. Energiatase systeemille on esitetty yhtälössä 11.

$$P_{sys} = P_{KLV1} + P_{KLV2} \pm P_{akku} + P_{KLV3} - P_{apuj} - P_k \quad (11)$$

missä

P_{sys}	systemin teho	[MW]
P_{KLV1}	KLV1:n teho	[MW]
P_{KLV2}	KLV2:n teho	[MW]
P_{akku}	akun teho	[MW]
P_{KLV3}	KLV3:n (reduktio) teho	[MW]
P_{apuj}	apujäähdytyksen teho	[MW]
P_k	kuluttajien teho [MW]	[MW]



Kuva 16: Mallin komponenttien teholliset vaikutukset kaukolämpöjärjestelmään.

Kuluttajien lämpötehon kulutus ei ole yhtä suuri kuin samalla ajanhetkellä laitoksella havaittava meno- ja paluueden lämpötilaeroista laskettu kulutus johtuen kaukolämpöverkon viiveistä. Kuluttajille välittynyt lämpöteho saadaan laskettua yhtälöllä 12. (Saarinen 2008, 10.)

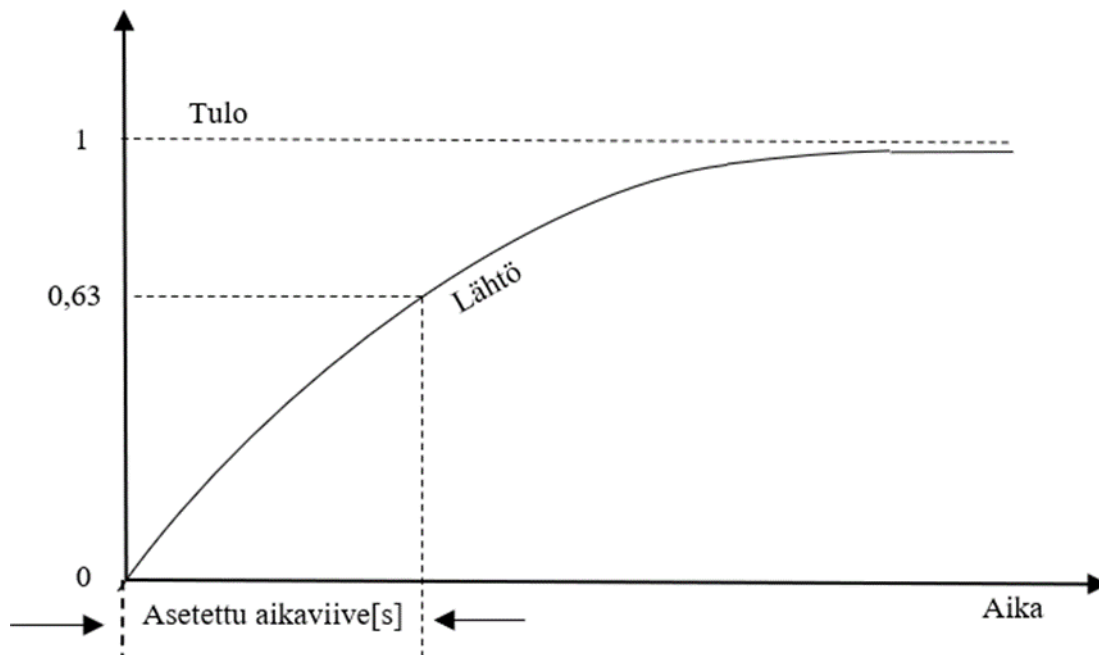
$$P_k = c_{p,kv} q_{m,kv} \frac{\int_{t-\Delta t}^t T_{meno}(\tau) d\tau - \int_t^{t+\Delta t} T_{paluu}(\tau) d\tau}{\Delta t} \quad (12)$$

missä

P_k	kuluttajille välittynyt lämpöteho	[W]
Δt	viive kuluttajan ja laitoksen välillä	[s]

Kaukolämpöjärjestelmän hidasta dynamiikkaa mallinnetaan lisäämällä prosessiin PCS7:n kirjaston sisältämiä ”DeadTime”, ”Lag” ja ”RateLim” -toimilohkoja. DeadTime -lohko viivästyttää signaalin lähtöä määritellyn ajan mukaisesti. Lag -lohko puolestaan hidastaa lähtösignaalia käyttämällä ensimmäisen kertaluvun aikaviivettä. Lag -lohkon toiminta on havainnollistettu kuvassa 17. RateLim -lohko ”rampittaa” lähtösignaalia määriteltyjen gradienttirajoitusten mukaisesti. Kuluttajien viiveiden mallintamisen lisäksi näiden lohkojen avulla saadaan realistisemmin demonstroitua eri tehokomponenttien hitautta kaukolämpöjärjestelmässä. Muun muassa tuotantolaitoksella veden virtaus komponenttien välillä,

lämmönsiirtyminen lämmönvaihtimissa sekä venttiilien asentomuutokset vievät oman aikansa. Niiden vaikutus prosessiin otetaan näiden toimilohkojen avulla huomioon, koska simulaattoriin ei mallinneta pumppuja, venttiileitä ja putkistoja.



Kuva 17: Lag -lohkon toiminta Simatic PCS7 -prosessinohjausjärjestelmässä.

Kaukolämpöakun varaus saadaan mallinnettua yhtälön 7 mukaisesti. Laskentaa varten määritetään alkuarvot akun vesimäärälle ja lämpötiloille. Mallintamisen helpottamiseksi akku jaetaan termokliinin perusteella kuumaan ja kylmään osaan, joille määritellään omat massa- ja energiataseet. Akun lataus- ja -purkaustehopyyntien, akun lämpötilojen sekä kaukolämpöveden meno- ja paluulämpötilojen perusteella voidaan määrittää virtaukset akun lataukselle ja purkaukselle yhtälön 9 periaatteen mukaisesti. Akun sisältämän veden massa ja varaus saadaan laskettua integroimalla, jolle on toimilohko PCS7:n kirjastossa. Akussa vallitsevat lämpötilat arvioidaan varauksen funktiona.

Mallin säätöpiiri toteutetaan luvun 4.2 mukaisesti. Prosessin yksinkertaistuksien takia myös Balance+ -konseptin säätöratkaisuja yksinkertaistetaan malliin sopivaksi, mutta säädön periaate pysyy samana. Kaukolämmön menoveden lämpötilasäätö ohjaa kaukolämpöakun, reduktion ja apujäähdytyksen tehoja. Säädön tavoitteena on pitää kaukolämmön kulutus ja

tuotanto tasapainossa. Lämpötilasäädin on PI-säädin, jolle tuleva mittaus on kaukolämmön menoveden lämpötila. Asetusarvo säätimelle määräytyy simuloinneissa tapauskohtaisesti. Säätimen ohjaus on rajoitettu tehovälille, jonka alaraja on -10 MW ja yläraja 10 MW. PI-säädin toimii korjaussäätimenä, joka korjaa laskennallista kaukolämpötehon kulutusta. Tämän tuloksena saadaan kulutuksen tehollinen peruspyynti. Tästä vähennetään lämmönvaihtimien KLV1 ja KLV2 tuottama teho, minkä tuloksena määräytyy tehontarve akulle, reduktiolle sekä apujäähdytykselle. Ensisijaisesti tehontarve pyritään ajamaan kaukolämpöakun avulla, joten reduktiolle sekä apujäähdytykselle menevistä tehonpyynnistä vähennetään akun teho.

Mallissa hyödynnetään PCS7 -järjestelmän kirjastossa saatavilla olevaa PID-säätimen toimilohkoa. Säätöpiirissä apulaitteille asetetaan tiettyjä rajoituksia komponentista riippuen. Akun latauksen ja purkauksen käynnistyminen kestää hetken. Tästä syystä säätöpiiriin määritellään, että kaukolämpöakulle tulevan tehopyynnin itseisarvon täytyy olla kahden minuutin ajan yli 2 MW, jotta lataus- tai purkauskäsky astuu voimaan. Reduktiolle tai apujäähdytykselle ei ole vastaavaa aikarajoitusta, joten ne reagoivat tehontarpeeseen ennen kuin akku ehtii mukaan. Lisäksi akun lataus- ja purkaustehoja rajoitetaan akun varauksen funktiona, jotta virtaukset eivät kasva holtittomasti akun lämpötilojen tasoittuessa. Apujäähdytyksen minimitehoksi määritellään 0,1 MW ja reduktion puolestaan 0,3 MW. Aika- ja tehorajoituksilla vältetään myös edestakainen heilunta sekä reagointi pieniin tehopyynteihin, jotka kulluttavat toimilaitteita tarpeettomasti ja aiheuttavat häiriöitä prosessiin. Järjestelmän sisältämän hitauden takia akulle on asetettu tehogradientin rajoitukseksi 5 MW/min ja apujäähdytykselle sekä reduktiolle puolestaan 20 MW/min.

5.4 Simuloinnit ja tulosten tarkastelu

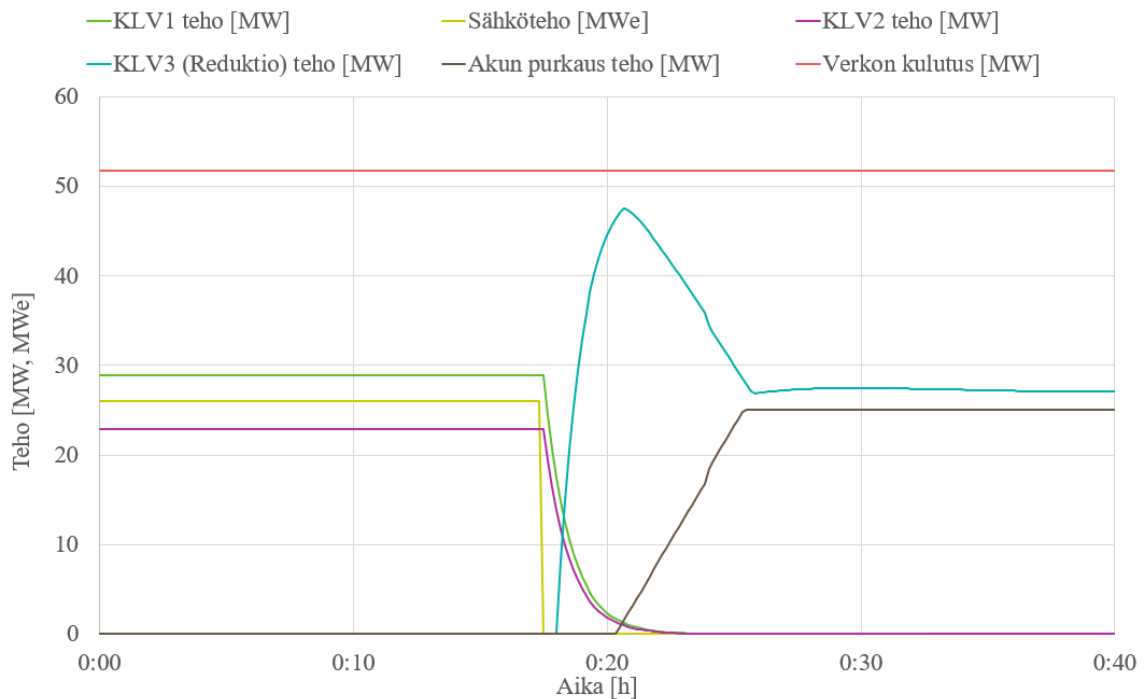
Tässä luvussa tutkitaan ja havainnollistetaan Balance+ -säätöratkaisuiden toimintaa CHP-laitoksen kaukolämpöjärjestelmässä simuloimalla laitoksen erilaisia ajotilanteita ja tarkastelemalla olennaisimpien parametrien käyttäytymistä. Esimerkeiksi valitaan viisi erilaista ajotilannetta, jotka ovat joko usein toistuvia tai säätöjen kannalta muuten olennaisia. Simulointeihin määritetään tapauskohtaisesti tilanteeseen sopivat alkuarvot. Simulointitilanteiden data tuodaan PCS7:n prosessiasemalta Microsoft Exceliin, jossa saadaan piirrettyä kuvaajat

kustakin tilanteesta. Kuvaajiin valitaan vain tarkastelun kannalta keskeisimmät parametrit, jotta niiden luettavuus ja ulkoasu ovat mahdollisimman selkeitä.

5.4.1 Turbiinin hätäpysäytys

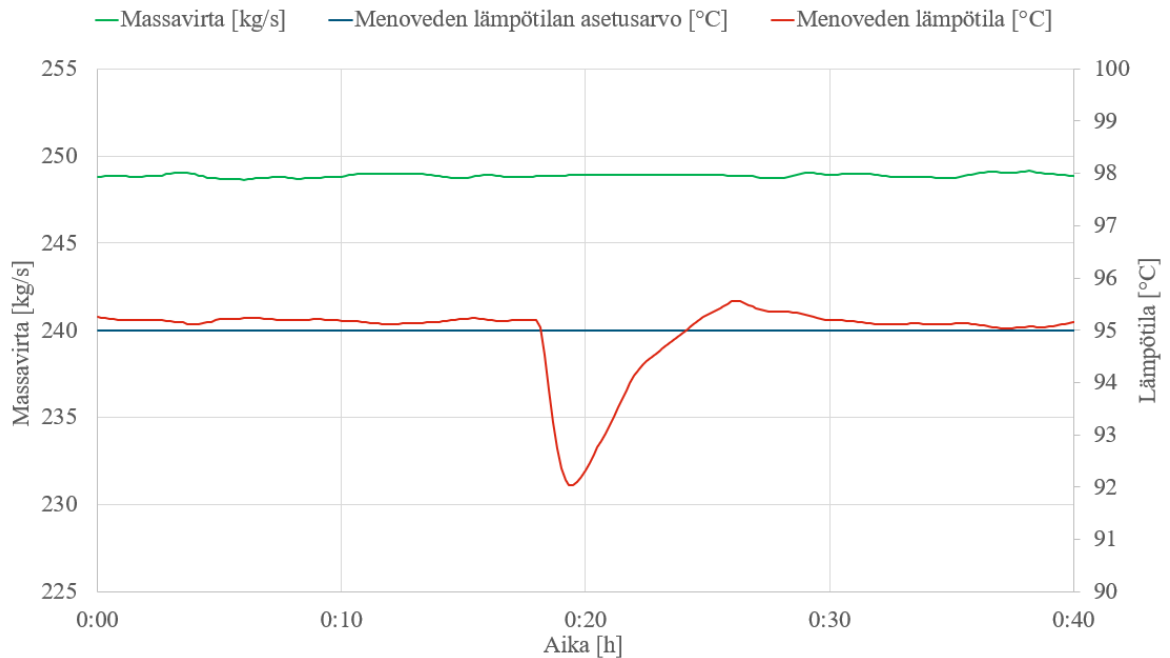
Tässä luvussa simuloidaan turbiinin hätäpysäytys, joka on harvinainen, mutta prosessin sää-
töjen kannalta haastava tilanne CHP-laitoksessa. Turbiinin hätäpysäytyksellä tarkoitetaan
suunnittelematonta ja yllättävää turbiinin alasajoa. Höyryvoimalaitosten turbiinit ovat varus-
tettu erilaisilla suojauksilla, jotka tulevat voimaan, kun tietyt suojaehdot täyttyvät. Kyse on
varoitimesta, jotta vältetään turbiinin vaurioilta. Syynä voi olla esimerkiksi kattilan hätä-
sulku, turbiinille tulevan höyryn liian matala tai korkea lämpötila, liian suuri lämpötilagra-
dientti tai jännitepiikki. Turbiinin hätäpysäytyksessä turbiinin korkeapaineventtiili sulkeu-
tuu alle sekunnissa, joten myös kaukolämmönvaihtimille kulkeutuvan höyryn määrä alkaa
välittömästi vähenemään. Venttiilin pikasulku aiheuttaa lisäksi nopeaa höyryn paineen nou-
sua korkeapainetukissa, minkä vuoksi on tärkeää, että reduktioaseman venttiileitä avataan
mahdollisimman nopeasti. Höyryjärjestelmän toiminta ei ole kuitenkaan osa tätä simulaat-
toria.

Turbiinin hätäpysäytys aiheuttaa välittömän lämmönvajeen kaukolämpöjärjestelmään. Il-
man nopeaa ja riittävää korvaavaa lämmöntuotantoa, kaukolämmön menoveden lämpötila
lähtee äkilliseen laskuun. Tämän simuloinnin tarkoitus on tarkastella, miten mallin säätörat-
kaisut kykenevät vastaamaan tilanteeseen ja stabiloimaan häiriön lämmöntuotannossa. Mer-
kittäviä tarkastelukohteita ovat apulaitteiden tuottamat tehot, menoveden lämpötila sekä
mahdolliset yli- ja aliohjaukset. Kuvassa 18 on simuloitu tilanne, jossa CHP-laitoksella tur-
biini hätäpysäytetään, mutta kattila pysyy käynnissä eli höyryn tuotanto jatkuu. Simuloitava
ajanjakso on 40 minuuttia ja turbiinin pysäytys tapahtuu ajanhetkellä 0:17, mikä havaitaan
sähkötehon välittömänä pudotuksena 26 MWe:sta nollaan. Sähkötehon alkuarvo valitaan si-
ten, että lämmönvaihtimien teho on yhtä suuri kuin kaukolämmön kulutus (52 MW), joka
pidetään simuloinnin ajan vakiona. Tällä tavalla apulaitteiden reagointia tehontarpeeseen
saadaan selkeämmin havainnollistettua, kun niiden tehot ovat alussa 0 MW. Menoveden
lämpötilan asetusarvoksi määritellään 95 °C, jolloin tehonkulutuksen ja kuluttajien jäähty-
män perusteella massavirran alkuarvoksi määrättyy 249 kg/s. Akun alkuarvot valitaan siten,
että akussa on varausta noin 300 MWh, jolloin varaus ei rajoita purkaustehoa.



Kuva 18: Turbiinin hätäpysäytys.

Kuten kuvasta 18 voidaan havaita, turbiinin pysäytyksen takia lämmönvaihtimien tuottama lämpöteho lähtee välittömästi laskuun ja niiden tuottama teho loppuu kokonaan muutamassa minuutissa. Äkillinen lämmöntuotannon väheneminen ilmenee menoveden lämpötilan laskuna. Säätoratkaisussa lämmönvaihtimien tehon lasku näyttäytyy kasvaneena tehontarpeena apulaitteille. Tehontarpeen pyynti menee ensiksi akulle, jolla kestää kaksi minuuttia aloittaa kuumen varastoidun veden purkamisen järjestelmään. Tämän vuoksi tarvittavaa lämpötehoa aletaan tuottamaan höyrylinjan reduktion avulla, mikä kykenee nopeaan tehonmuutokseen. Tehonpyynti reduktiolle alkaa vähenemään sitä mukaa, kun akku tulee mukaan tukemaan lämmöntuotantoa. Akku saavuttaa muutamassa minuutissa maksimi purkaustehonsa 25 MW ja jää täydelle teholle. Mikäli simulointia jatkettaisiin siten, että nostettaisiin kaukolämmön kulutusta, niin lisätehon tarve ajettaisiin reduktiolla, koska kaukolämpöakku on tehonsäätöalueensa ylärajalla. Kuvaajasta voidaan havaita, että apulaitteet eivät yliohtaa juuri ollenkaan, koska reduktion teho asettuu todella nopeasti stabiiliksi.



Kuva 19: Massavirta ja menoveden lämpötila turbiinin hätäpysäytyksen yhteydessä.

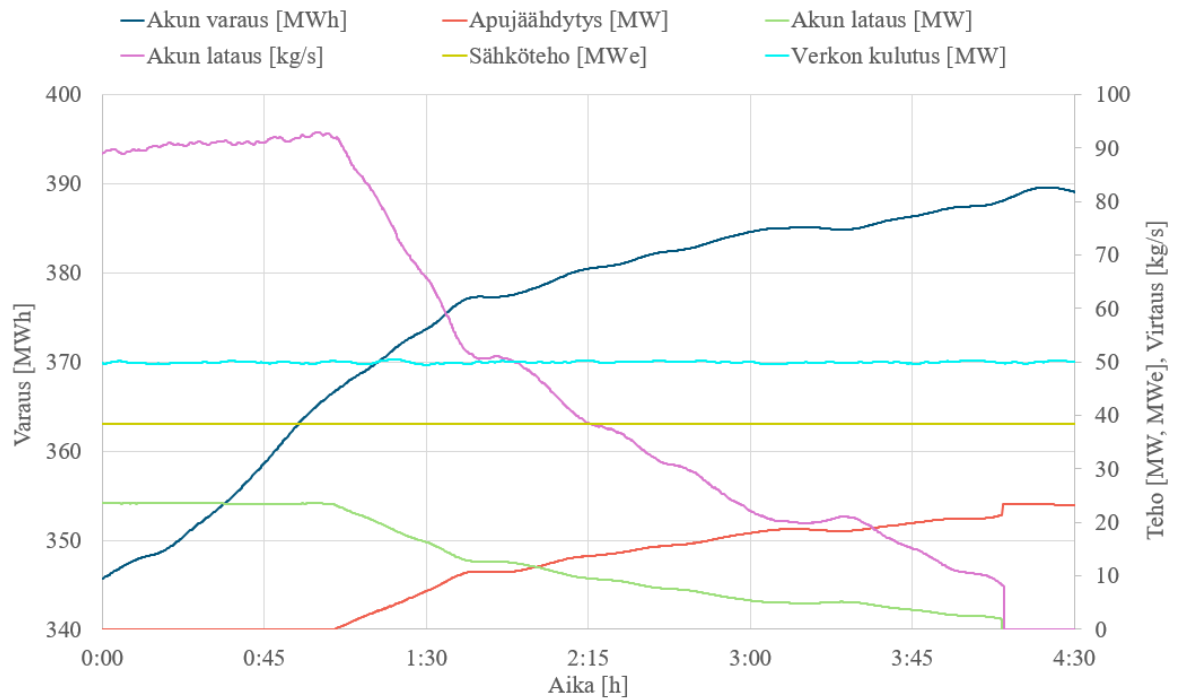
Kuvasta 19 ilmenee kaukolämpöjärjestelmän massavirta ja menoveden lämpötila saman simuloititilanteen aikana. Säätoratkaisuiden nopean ja tarkan reagoinnin avulla menoveden lämpötila ei pääse romahtamaan, vaan se putoaa hetkellisesti vain muutaman asteen. Tehon ja menolämpötilan muutoksiin ei kuitenkaan reagoida liian voimakkaasti, koska menolämpötila palaa nopeasti takaisin asetusarvoonsa menemättä liikaa yli. Järjestelmän massavirta, eli kuluttajien laitteissa määräytyvä kaukolämpöveden virtaus, pysyy lähes vakiona, joten hetkellinen ja maltillinen menolämpötilan lasku ei aiheuta lämmötoimitukseen kuluttajilla havaittavissa olevaa häiriötä. Kaukolämmön paluuvesi pysyy koko simuloinnin ajanjakson melko tasaisesti 46 °C:een lämpötilassa.

5.4.2 Kaukolämpöakun lataus

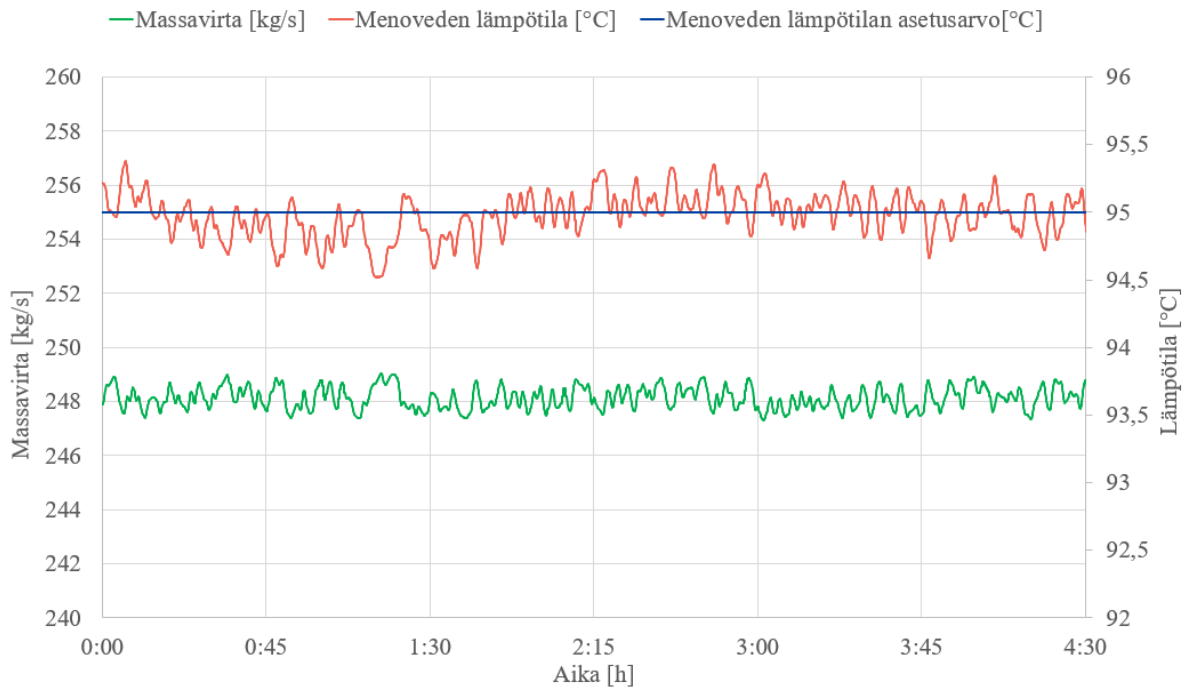
Tässä luvussa simuloidaan tilanne, jossa lämmöntuotanto on suurempaa kuin sen kulutus, joten lämpöä varastoidaan kaukolämpöakkuun myöhempää käyttöä varten. Tällainen tilanne on hyvin yleinen esimerkiksi ajankohtana, kun sähkön pörssihinta on korkea, joten CHP-laitosta halutaan ajaa mahdollisimman isolla kuormalla. Lisäksi akun latauksella voidaan varautua tulevaan alhaiseen sähkön pörssihintaan, jolloin laitosta ei haluta ajaa isolla

kuormalla ja/tai korkeaan lämmönkulutukseen, jota voidaan arvioida muun muassa sääennusteen perusteella. Simuloinnissa akku ladataan täyteen varaukseensa. Tässä tapauksessa olennaista on tarkastella akun latauksen rajoittamista akun varauksen kasvaessa sekä latausvirtausta.

Simuloitava ajanjakso on 4,5 tuntia, jonka aikana akku ladataan täyteen varaukseen. Kaukolämmön kulutukseksi määritellään $50 \text{ MW} \pm 0,4\text{--}0,6 \text{ MW}$, minkä tarkoitus on mallintaa pientä kaukolämmön kulutuksen vaihtelua simuloinnin aikana. Sähkötehoksi määritellään $38,5 \text{ MW}$, jolloin lämmöntuotannoksi muodostuu $73,5 \text{ MW}$. Simuloinnin lähtökohtana on siis noin $23,5 \text{ MW}$:n ylituotanto lämmölle, jota ladataan akkuun. Akun alkuarvot valitaan siten, että varaukseksi tulee noin 350 MWh , jotta akku lähestyisi täyttä varaustaan. Menoveden lämpötilan asetusarvoksi määritellään $95 \text{ }^\circ\text{C}$, jolloin tehonkulutuksen ja kuluttajien jäähtymän perusteella massavirran alkuarvoksi määräytyy noin 247 kg/s . Paluuveden lämpötila on $47 \text{ }^\circ\text{C}$. Simuloinnin kuvaajat ovat esitetty kuvissa 20 ja 21.



Kuva 20: Akun lataus täyteen varaukseen.



Kuva 21: Massavirta ja menoveden lämpötila akun latauksen aikana.

Kaukolämpöäkkua ladataan noin 23,5 MW teholla hieman yli tunnin ajan, kunnes akun varaus on 365 MWh, jolloin akun säädöt alkavat rajoittaa latauksen tehoa. Akun varauksen kasvaessa akun alaosaista paluupuolelle purettavan veden lämpötila nousee, jolloin lataustehon pysyessä samana latausvirtaus lähtee nousuun, kuten kuvasta 20 voidaan havaita. Ilman rajoitusta virtaukset menopuolelta akun yläosaan ja akun alaosaista paluupuolelle kasvavat merkittävästi suhteessa kaukolämpöverkon virtaukseen. Tällöin, kun akku pysäytettäisiin suurelta teholta, suurten virtausten äkillinen pysäyttäminen aiheuttaisi valtavan häiriön järjestelmään. Lisäksi virtausta rajoittaa pumpun tilavuusvirran tuoton maksimiarvo toiminta-arvojen mukaisesti. Suuret virtaukset myös vaativat enemmän pumppaustehoa, mikä taas nostaa laitoksen omakäyttösähkönkulutusta. Tällöin ei ole taloudellisestikaan järkevää ladata tarpeettoman suurella teholla, etenkin, jos laitoksen yllämmön tuottaminen jatkuu ja myöhemmin joudutaan kuitenkin turvautumaan apujäähdytykseen.

Kuvasta 20 havaitaan, että kaukolämpöakun lataustehoa rajoitetaan maltillisesti ja samanaikaisesti apujäähdytyksen tehoa nostetaan. Taseratkaisun ansiosta akun lataustehon ja apujäähdytyksen tehon summa vastaa tarkasti laitoksen tuottamaa yllämpöä suhteessa kuluttajien tehoon. Ajanjakson loppupuolella on havaittavissa akun virtauksen ja lataustehon pudotus nolnaan, mikä johtuu siitä, että akun latausteho on laskenut alarajalle 2 MW:iin.

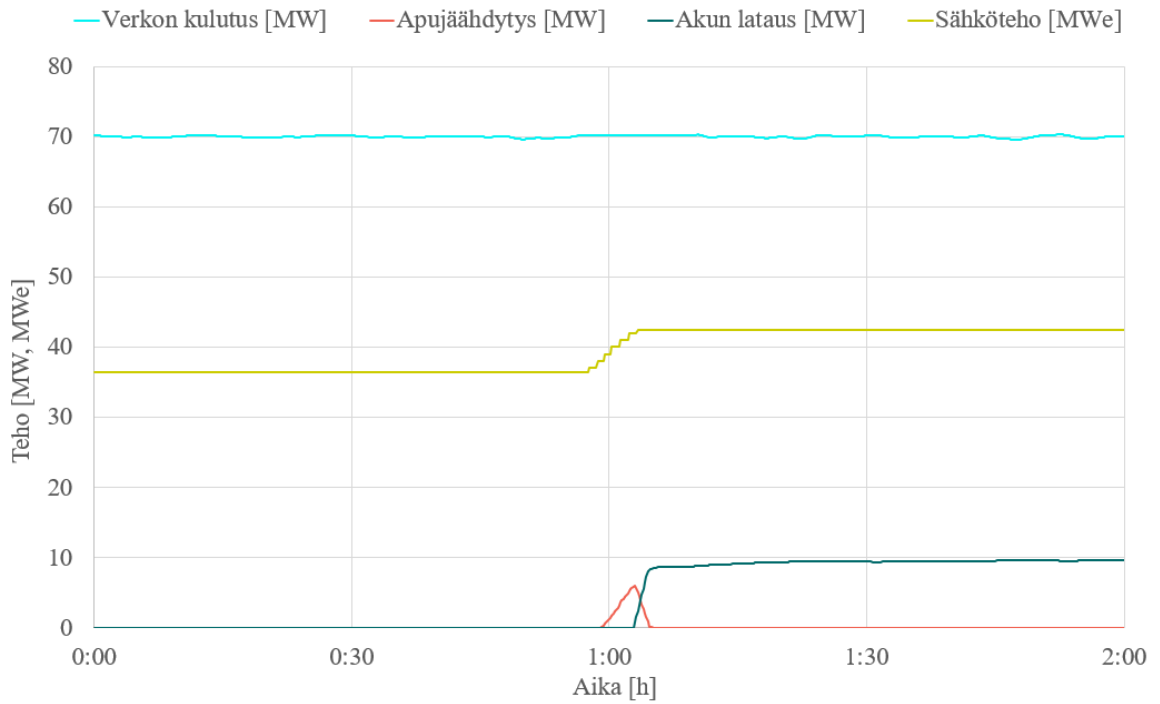
Samanaikaisesti apujäähdytyksen teho nousee nopeasti, jotta lämmön tuotanto ja kulutus saadaan pidettyä tasapainossa. Apujäähdytyksen käyttö ei ole energiatehokkuuden kannalta mielekäästä, mutta se on järjestelmän tehotasapainon hallinnan takia tärkeää. Kuvasta 21 havaitaan, että menoveden lämpötila pysyy lähellä asetusarvoaan simuloinnin aikana. Kuluttajien tehon pienestä vaihtelusta johtuen voidaan havaita pientä värähtelyä myös virtauksessa, joka pysyy muuten melko stabiilina johtuen tasaisesta menoveden lämpötilasta. Kulutuksen ja menolämpötilan tasaisuudesta johtuen paluuv veden lämpötila pysyy melko tasaisesti 47 °C:een lämpötilassa.

5.4.3 Lämmöntuotannon kasvu

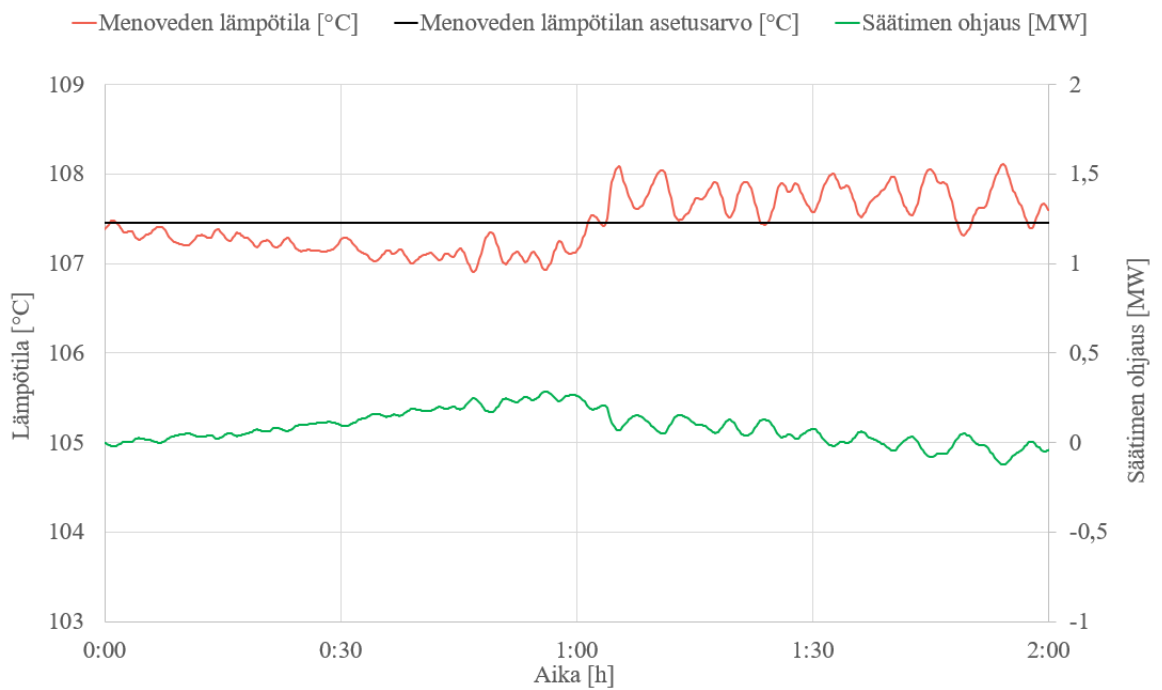
Tässä luvussa simuloidaan tilanne, jossa laitoksen lämmöntuotanto kasvaa. Vastaavanlaista tehonmuutosta tapahtuu CHP-laitoksella jatkuvasti, joten on olennaista tutkia miten mallin säätöratkaisut toimivat tällaisessa tilanteessa ja millaisia vaikutuksia sillä on kaukolämpöjärjestelmän toimintaan. Lisäksi tässä simuloinnissa tarkastellaan PI-säätimen toimintaa ja sen vaikutusta prosessiin. Simuloitava ajanjakso on kaksi tuntia.

Kaukolämmön kulutukseksi määritellään koko simuloinnin ajaksi 70 MW, johon lisätään vastaavanlaista pientä heiluntaa kuin edellisessä simuloinnissa. Sähkötehon alkuarvoksi määritellään 36,5 MW, jolloin tuotettava lämpöteho on 70 MW eli simuloinnin alussa lämmön tuotanto ja kulutus ovat suunnilleen yhtä suuria. Akun alkuarvot määritellään siten, että sen varaus on noin 200 MWh, jolloin varaus ei rajoita lataustehoa. Kaukolämmön kulutus on melko suurta, joten menoveden lämpötilan asetusarvoksi määritellään 107,5 °C, jolloin verkon jäähtymän ja tehonkulutuksen perusteella massavirraksi määräytyy noin 274 kg/s. Paluuv veden lämpötila simuloinnin alussa on 46 °C.

CHP-laitoksen sähkötehoa nostetaan porrastaen yhteensä 5 MW alkaen ajanhetkellä 0:57. Sähkötehon muutosnopeus on 1 MW/minuutti. Sähkötehon noston seurauksena lämmöntuotanto lähtee nousemaan, jolloin menoveden lämpötila lähtee nousuun. Säätöratkaisun negatiivinen tehonpyynti tulee ensiksi akulle, jolla kestää kaksi minuuttia aloittaa akun lataus. Tämän vuoksi lämpöä aletaan poistamaan systeemistä apujäähdytyksellä, joka kykenee reagoimaan nopeasti. Tehonpyynti apujäähdytykselle laskee sitä mukaa, kun akun latausteho lähtee kasvamaan. Kuten kuvasta 22 havaitaan, akun latausteho saavuttaa nopeasti noin 10 MW lataustehon eikä yli- tai aliohjaa juuri ollenkaan.



Kuva 22: Sähkön- ja lämmöntuotannon kasvu.



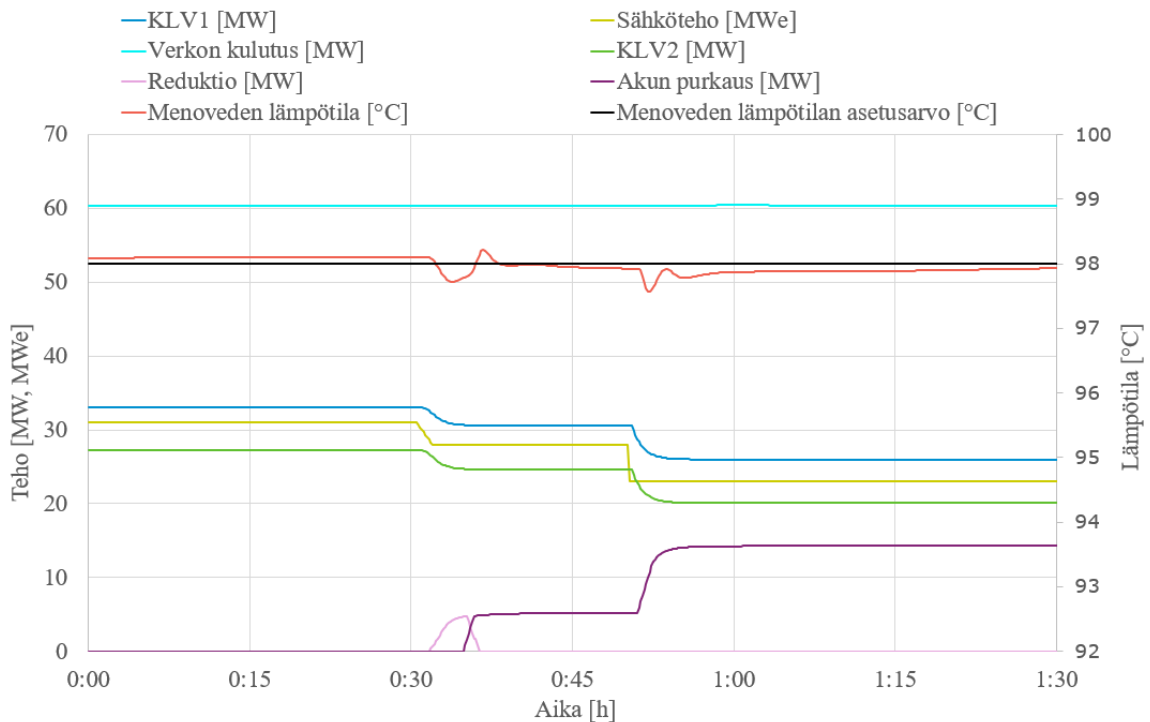
Kuva 23: Menoveden lämpötila ja säätimen ohjaus lämmöntuotannon kasvun aikana.

Kuvasta 23 ilmenee saman simulaatiotilanteen aikana menoveden lämpötila ja PI-säätimen ohjauksen suuruus. Ennen lämmöntuotannon nousua menoveden lämpötila on hieman asetusarvonsa alapuolella. Lämmöntuotannon nousun aikana menoveden lämpötila nousee noin asteen, jonka jälkeen se jää heilumaan hieman asetusarvon yläpuolelle. Tällainen heilunta asetusarvon läheisyydessä tyypillisesti vältetään asettamalla PI-säätimeen vasteeton alue, jossa säädin ei saa ohjata. Työn simulaattorissa ei ole asetettu säätimelle vasteetonta aluetta, mutta säätimen parametrit ovat viritetty maltilliseen ohjaukseen. Kuten kuvasta 23 voidaan havaita, kun menoveden lämpötila eroaa koko simuloinnin ajan vain vähän asetusarvostaan, säätimen ohjauskin on pientä. Tällöin säätöön vaikuttaa ensisijaisesti laskennallinen tehontarve, minkä lisäksi säädin maltillisesti korjaa. Lämmöntoimituksen ja kuluttajien tehon taseisuudesta johtuen systeemin massavirta ja paluueden lämpötila pysyvät melko vakioina.

5.4.4 Sähköverkon taajuudentuenta

Kuten luvussa 2.2.2 esitettiin, CHP-laitoksella on taloudellisia intressejä osallistua sähköverkon taajuudentuentaan. Tässä luvussa simuloidaan tilanne, jossa laitos osallistuu sähköverkon taajuuden sekundäärisäätöön aFRR-tuotteella. Lisäksi simuloidaan sähkötehon pieni rampitus alaspäin.

Tässä tapauksessa olennaista on tarkastella, miten taajuuden sekundäärituentaan osallistuminen vaikuttaa kaukolämpöjärjestelmään ja miten mallin säätöratkaisut reagoivat. Simulointi-ajanjakso on 1,5 tuntia. Kaukolämpöverkon kulutukseksi määritellään 60 MW ja se pidetään vakiona simuloinnin ajan. Sähkötehoksi määritellään simuloinnin alussa 31 MW, jolloin lämmöntuotanto on 60 MW eli yhtä suuri kuin verkon kulutus, jolloin apulaitteiden teho alussa on 0 MW. Akun alkuarvot määritellään siten että akussa on varausta noin 250 MWh, jolloin varaus ei rajoita purkaus- tai lataustehoa. Menoveden lämpötilan asetusarvoksi valitaan 98 °C, jolloin verkon jäähtymän ja tehonkulutuksen perusteella massavirta alussa on 263 kg/s ja paluueden lämpötila on 43 °C.



Kuva 24. Sähkötehon rampitus ja aFRR-taajuudentuenta.

Laitoksen sähkötehoa lasketaan 3 MW alkaen ajanhetkellä 00:30, kuten kuvasta 24 voidaan havaita. Sähkötehon laskun seurauksena lämmöntuotanto lähtee laskemaan, jolloin menoveden lämpötila lähtee myös laskuun. Säätoratkaisun tehonpyynti tulee ensiksi akulle, jolla kestää kaksi minuuttia aloittaa akun purkaus. Tämän vuoksi lämpöä aletaan tuomaan systeemiin reduktion avulla, joka kykenee reagoimaan nopeasti. Tehonpyynti reduktiolle laskee sitä mukaa, kun akun latausteho lähtee kasvamaan. Tämän seurauksena menoveden lämpötilassa voidaan havaita pieni asetusarvon ylittyminen, jonka jälkeen prosessi stabiloituu nopeasti.

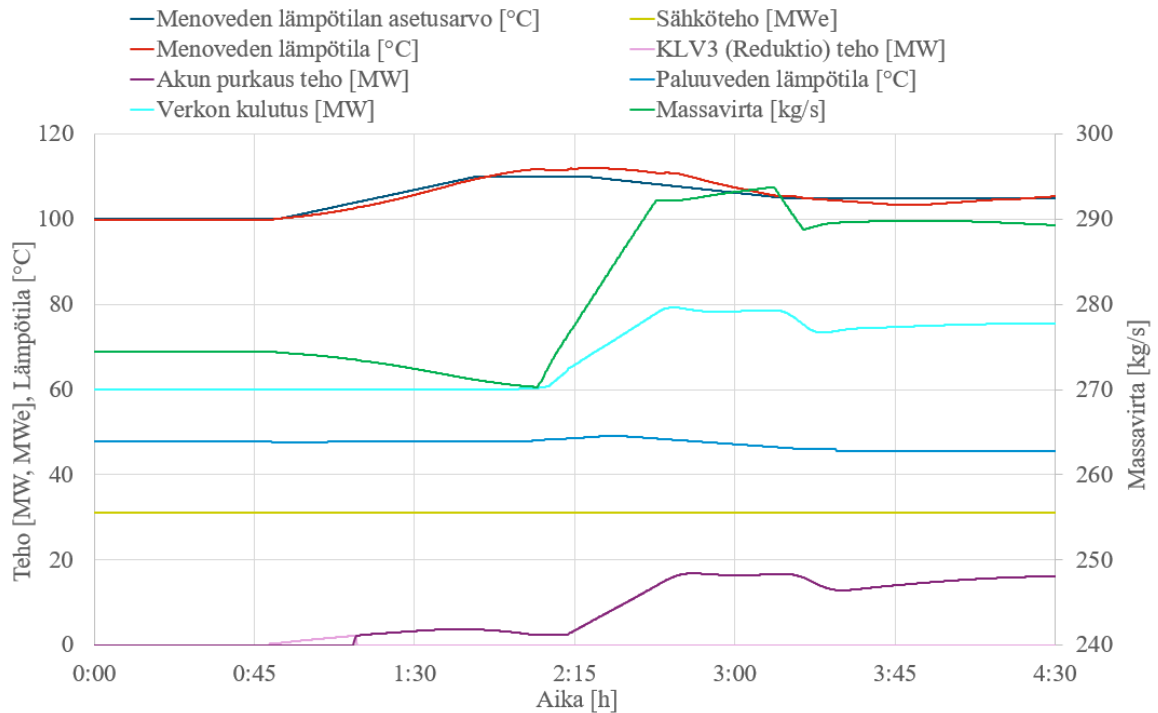
Kantaverkkoyhtiö lähettää -5 MW tehonmuutossignaalin ajanhetkellä 00:50, mikä havaitaan sähkötehon laskuna. Fingridin vaatimusten mukaan aFRR:n tehonmuutokseen tulee ehtiä 5 minuutin kuluessa, mutta tässä simuloinnissa tehoa muutettiin välittömästi, jotta voidaan tarkastella säätoratkaisuja myös nopeampaankin tehonmuutokseen. Sähkötehon laskun seurauksena lämmönvaihtimien teho lähtee nopeaan laskuun. Tämä lisää akulle tulevaa tehonpyyntiä, jolloin menoveden lämpötila lähtee nousemaan takaisin kohti asetusarvoaan pienen pudotuksen jälkeen. Prosessi stabiloituu nopeasti. Lämmöntoimituksen ja kuluttajien tehon

tasaisuudesta johtuen systeemin massavirta ja paluueden lämpötila pysyvät melko vakioina.

5.4.5 Lämmönkulutuksen kasvu ja verkon akkumulointi

Tässä luvussa simuloidaan tilanne, jossa kaukolämpöverkkoon akkumuloidaan lämpöenergiaa ennakoitua kulutuksen kasvua varten. Kuten luvussa 3.5.1 esitettiin, tällainen tilanne on CHP-laitokselle hyvin tyypillinen esimerkiksi aamuyöllä, kun varaudutaan aamulla kasvavaan kaukolämmön kulutukseen. Tässä tapauksessa olennaista on tarkastella miten menoveden lämpötila seuraa asetusarvon muutosta sekä miten järjestelmä reagoi kulutuksen muutokseen.

Simuloitava ajanjakso on 4 tuntia ja 40 minuuttia. Kaukolämpöverkon kulutuksen alkuarvoksi määritellään 60 MW. Sähkötehoksi määritellään 31 MW, jolloin lämmöntuotanto on 60 MW eli yhtä suuri kuin verkon kulutus, jolloin apulaitteiden teho alussa on 0 MW. Sähköteho pidetään simuloinnin ajan vakiona, jolloin akkumulointiin sekä kulutuksen muutoksiin reagoidaan apulaitteilla. Täten voidaan havainnollistaa kaukolämpöakun roolia CHP-laitoksen lämmön- ja sähköntuotannon välisen riippuvuuden poistamisessa. Menoveden lämpötilan asetusarvoksi alussa valitaan 100 °C, jolloin paluulämpötila on 48 °C ja massavirta 274 kg/s. Akun alkuarvot valitaan siten, että akussa on varausta noin 250 MWh, jolloin varaus ei rajoita purkutehoa simuloinnin aikana.



Kuva 25: Kaukolämpöverkon akkumulointi ja kulutuksen kasvu.

Kuten kuvasta 25 havaitaan, CHP-laitoksella aloitetaan verkon akkumulointi ajankohdassa 0:50 nostamalla menoveden lämpötilan asetusarvoa. Asetusarvoa nostetaan rauhallisesti 110 °C:een. Tehonpyynti on alle 2 MW, joten aluksi systeemiin tuodaan lämpöä reduktiolla. Asetusarvon ja tehonpyynnin kasvaessa akku aloittaa purkauksen. Kaukolämmön kulutus pysyy samana, joten virtaus hidastuu ja systeemiin varastoituu lämpöenergiaa. Akkumulointia aletaan hidastamaan laskemalla asetusarvoa hitaasti vastaamaan ennustettua kulutusta. Ajankohdassa 2:00 kulutus alkaa kasvamaan 80 MW:iin, mikä havaitaan myös virtauksen kasvussa. Kasvaneeseen tehonkulutukseen reagoidaan kasvattamalla akun purkausta säätöratkaisun mukaisesti. Kulutus pysyy noin tunnin ajan huipussaan, jonka jälkeen se laskee noin 5 MW ja asettuu suunnilleen stabiiliksi. Menoveden lämpötila reagoi pienellä viiveellä asetusarvon muutokseen, mutta pysyy lähellä asetusarvoaan koko simuloinnin ajan. Paluuveden lämpötilan voidaan havaita aluksi nousevan hieman johtuen menolämpötilan noususta ja kulutuksen kasvaessa jäähtymä hieman kasvaa, jolloin laitokselle lopulta palaa viileämpää vettä.

Ilman akkumulointia virtaus kasvaisi voimakkaammin, koska menoputkessa olisi viileämpää vettä. Lisäksi ilman akkumulointia akulta vaadittaisiin kulutuksen kasvun yhteydessä suurempaa tehoa, jolloin sen maksimipurkausteho voi tulla rajoittavaksi tekijäksi. Tällöin

riittävän lämmöntoimituksen takaamiseksi CHP-laitos voi joutua nostamaan tehoaan riippumatta sähkön pörssihinnasta. Laitoksen kannalta on taloudellisempaa, mikäli lämmöntuotantoon voidaan hyödyntää korkean pörssihinnan aikaan ladattua akkua. Lisäksi mikäli CHP-laitos olisi jo maksimiteholla, jouduttaisiin turvautumaan lämpökeskuksiin, joiden tuotantokustannukset ovat suuremmat.

6 Johtopäätökset

Tämän diplomityön tavoitteena oli tutkia ja havainnollistaa AFRYn kehittämän Balance+ - tasesäätökonseptin kaukolämpöjärjestelmän ja etenkin kaukolämpöakun säätöratkaisuiden toiminnallisuutta sähkön ja lämmön yhteistuotannossa. Tätä tutkittiin työssä laaditun simulaattorin avulla viidessä erilaisessa CHP-laitoksen ajotilanteessa, jotka ovat joko usein toistuvia tai prosessin säädöille haastavia. Tilanteiksi valikoituivat turbiinin hätäpysäytys, kaukolämpöakun lataus, laitoksen lämmöntuotannon kasvu, sähköverkon taajuuden sekundärituenta ja verkon akkumulointi. Olennaista oli tarkastella, miten kaukolämmön menoveden lämpötilasäätö ja kaukolämpöakun säädöt toimivat järjestelmän tehotasapainon kannalta sekä miten prosessin parametrit käyttäytyvät erilaisten tilanteiden aikana. Riittävän lämmön toimituksen takaamiseksi ja energiatehokkuuden optimoimiseksi kaukolämmön menoveden lämpötilatasojen tulisi mukautua mahdollisimman tarkasti kuluttajien lämmöntarpeeseen.

Työssä luodulla simulaattorilla pystyttiin hyvin havainnollistamaan säätöjen ja prosessin toimintaa eri tilanteissa. Säädöt reagoivat halutulla tavalla ja todellisen prosessin mukaisesti. Simulointien tuloksena havaittiin, että mallin prosessiin säätöratkaisut ovat järjestelmän tehotasapainon kannalta toimivia erilaisten ajotilanteiden ja niiden aiheuttamien haasteiden aikana. Taselaskenta ohjaa lasketulla tehontarpeella kaukolämpöjärjestelmän komponentteja välittömästi muutosten tai häiriöiden ilmaantuessa. Lisäksi komponenttien toimintaa ohjataan erilaisilla rajoituksilla siten, että vältetään epätoivotuilta ohjauksilta. Säädöt ovat tarkkoja eikä yli- tai aliohjausta ole juurikaan havaittavissa. Kaukolämmön menoveden lämpötila palaa lähelle asetusarvoaan häiriöiden jälkeen ja järjestelmään saadaan tuotua jokaisessa simulointitilanteessa riittävästi lämpöenergiaa tarpeeksi nopeasti ilman yliohtoa. Näin ollen kuluttajille ei aiheudu havaittavaa häiriötä lämmön toimituksessa eikä järjestelmään aiheudu ylimääräistä rasitusta.

Säätöjen toimivuuden lisäksi työssä havaittiin, että kaukolämpöakulla ja sen oikeanlaisilla säädöillä on merkittävä vaikutus yhdistettyyn sähkön- ja lämmöntuotantoon. Peruskuormalaitoksena toimivan CHP-laitoksen keskeisin tehtävä on tuottaa kaukolämpöasiakkaille riittävästi lämpöenergiaa, joten tuotantoa määrää pääasiassa kuluttajien lämmöntarve. Kaukolämmön myynnistä saatava hinta lämpöenergiaa kohden on kuitenkin kiinteä, joten laitoksen tuotannosta saatava lopullinen tuotto määräytyy ohessa tuotettavan sähkön myynnistä.

Kaukolämpöakun ansiosta sähkön- ja lämmöntuotannon välistä riippuvuutta saadaan kevennettyä, jolloin laitos saa merkittäviä taloudellisia hyötyjä sähkömarkkinoilla. Energiamuroksen etenemisen ja esimerkiksi varttitaseeseen siirtymisen myötä CHP-tuotannon reaaliaikaisen optimoinnin ja tuotannon joustavuuden merkitys korostuu entisestään. Tämän takia on olennaista, että akun käyttöä ohjaavat säädöt ovat toimivia ja kaukolämpöjärjestelmässä saadaan pidettyä tehotasapaino tuotannon ja kulutuksen välillä.

Työssä suoritettujen simulointien tuloksena havaittiin, että tutkittujen tasesäätöratkaisuiden avulla kaukolämpöakun integrointi osaksi kaukolämpöjärjestelmää onnistuu ilman häiriöitä. Säätöratkaisut toimivat tarpeeksi nopeasti ja tarkasti, jolloin ne mahdollistavat kaukolämpöakun hyödyntämisen CHP-laitoksen tuotannon reaaliaikaisessa optimoinnissa. Akun käyttöä ohjaavat toimivat säädöt mahdollistavat kokonaistaloudellisuuden lisäksi muitakin hyötyjä yhteiskunnallisella tasolla. Energiatohokkuus ja ympäristöystävällisyys kasvavat, koska apujäähdytyksen käyttöä pystytään vähentämään ja prosessissa menee vähemmän lämpöä hukkaan. Lisäksi lämmöntuotanto keskittyy useammin vain peruskuormalaitokselle, jossa päästöt ovat lämpökeskuksia alhaisemmat. Näiden lisäksi akun käytön ansiosta lämmön toimitusvarmuus paranee ja samalla sähköjärjestelmää pystytään tukemaan, koska laitoksen mahdollisuus osallistua taajuudentuentaan on suurempi sähkötehon joustomahdollisuuden takia.

Tuloksia tarkastellessa on kuitenkin syytä huomioida simulaattorin luotettavuus ja yksinkertaistukset sekä kaukolämpöjärjestelmien keskinäiset eroavaisuudet. Laadittu simulaattori sisältää tehotasapainon kannalta olennaiset komponentit, mutta siihen ei sisälly kaukolämpöjärjestelmän painetasoon liittyviä komponentteja. Näiden puuttumisen vaikutusta mallin prosessiin ja tarkasteltuihin säätöratkaisuihin on kuitenkin hankala arvioida. Todellinen kaukolämpöjärjestelmä on myös monimutkaisempi sisältäen useampia linjoja ja niiden välisiä kytkentöjä. Lisäksi kaukolämpöjärjestelmän hidasta dynamiikkaa on hankala arvioida, joten simulaattoriin laaditut hitaudet ja viiveet ovat vain karkeita arvioita. Kaukolämpöjärjestelmät myös eroavat prosessiteknisesti toisistaan, joten simulaattoria ei voida pitää yleisesti toimivana ratkaisuna eri prosessien tarkasteluun. Tämän vuoksi kaukolämpöjärjestelmän säätöratkaisut on toteutettava jokaiseen järjestelmään tapauskohtaisesti. Simulointitulokset ovat kuitenkin onnistuneita ja todellisen prosessin mukaisia, joten simulaattoria voidaan pitää toimivana säätöratkaisuiden toiminnallisuuden demonstrointiin, missä todellisuutta

vastaavan erittäin tarkan mallin sijasta merkittävämpää on tarkastella säätökonseptin eri ratkaisuiden vaikutuksia prosessiin yleisesti.

Säätöratkaisuiden kehitystyötä varten mallinnetun prosessin tulisi mukailla mahdollisimman tarkasti todellisuutta. Tämä vaatisi simulaattorin laajentamista ja kehittämistä, mikä on työn mahdollinen jatkokehityskohde. Simulaattoriin voi mallintaa hydraulista dynamiikkaa lisäämällä muun muassa putkistot, venttiilit ja pumpput laskennan luotettavuuden lisäämiseksi ja tarkempien tulosten saamiseksi. Lisäksi komponenttien toimintaa voi mallintaa yksityiskohtaisemmin. Tällöin prosessin suoritusarvot ovat lähempänä todellisuutta sekä säätöratkaisuja voisi tämän myötä tarkastella myös pumppauksen ja paineenpidon osalta. Työn tuloksena tuli ilmi, että simulaattori on toimiva säätöratkaisuiden havainnollistamiseen, joten toinen kiinnostava jatkotutkimuskohde on eri säätömenetelmien vertailu laaditulla simulaattorilla. Tällöin simulaattoriin luotaisiin eri menetelmiin perustuvat säätöratkaisut, joiden toimintaa ja vaikutusta prosessiin simuloitaisiin samanlaisissa ajotilanteissa samoilla toiminta-arvoilla.

Lähteet

AFRY 2020. Energiatehokkuusdirektiivin mukainen selvitys hukkalämmön potentiaalista ja kustannushyötyanalyysi tehokkaasta lämmityksestä. Asiakasraportti. 9/2020. AFRY Management Consulting.

AFRY 2022. Kaukolämpö yhteiskunnan energiavirtojen tehokkaana hyödyntäjänä. Selvitys Energiakaupungit ry:lle 10/2022. AFRY Management Consulting.

AFRY 2023a. Säätoakaaviot. Process Control, AFRY Finland Oy. Rajoitettu saatavuus.

AFRY 2023b. Säätoaselostukset. Process Control, AFRY Finland Oy. Rajoitettu saatavuus.

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. 3, s. 3–31. <https://doi.org/10.2478/v10173-011-0010-8>

Cabeza, L. 2021 Advances in thermal energy storage systems: methods and applications. 2nd edition. Elsevier. ISBN 0-12-819888-5.

Direktiivi 2018/2001/EU: Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi uusiutuvista lähteistä peräisin olevan energian käytön edistämisestä. Euroopan unionin virallinen lehti 21.12.2018.

Energiateollisuus 2011. Kaukolämpöverkon pumppausjärjestely. Suositus L10/2011. ET-kaukolämpökansio 2/2. Energiateollisuus ry 2011.

Energiateollisuus 2021. Kaukolämmön menolämpötilan optimointi. Raportti 2021. Energiateollisuus ry 2021.

Energiateollisuus 2022a. Ilmastonmuutoksen hillintä ohjaa energiantuotantoa. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 7.9.2022]. Saatavissa: <https://energia.fi/energiasta/energiantuotanto>

Energiateollisuus 2022b. Säätoivoima. Sähköntuotanto. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 8.9.2022]. Saatavissa: <https://energia.fi/energiasta/energiantuotanto/sahkontuotanto/saatoivoima>

Energiateollisuus 2022c. Energiavuosi 2021 Kaukolämpö. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 9.9.2021]. Saatavissa: <https://energia.fi/tilastot/kaukolampotilastot>

Energiateollisuus 2022d. Kaukolämmöntuotanto. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 9.9.2022]. Saatavissa: https://energia.fi/energiasta/energiantuotanto/kaukolammon_tuotanto

Energiateollisuus 2022e. Energiamarkkinat. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 15.9.2022]. Saatavissa: <https://energia.fi/energiasta/energiamarkkinat>

Energiateollisuus 2022f. Energiaverkot. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 23.9.2022]. Saatavissa: <https://energia.fi/energiasta/energiaverkot>

Eurostat 2022. Share of energy from renewable sources. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 13.9.2022]. Saatavissa: <https://ec.europa.eu/eurostat/cache/infographs/energy/bloc-4c.html>

Fingrid 2021. Ehdot ja edellytykset manuaalisen taajuuden palautusreservin (mFRR) toimittajalle. Liite 1 Säätosähkömarkkinasopimukseen 1.11.2021. 17s.

Fingrid 2022a. Fingridin sähköjärjestelmävisio 2022 – Tulevaisuuden järjestelmän skenaarioluonnokset.

Fingrid 2022b. Suomen sähköjärjestelmä. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 14.9.2022]. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/sahkonsiirto/suomen-sahkojarjestelma/>

Fingrid 2022c. Reservimarkkinat. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 14.9.2022]. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/>

Fingrid 2022e. Reservimarkkinainformaatio. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 7.3.2023]. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinainformaatio/reservimarkkinainformaatio/>

Fingrid 2022f. Varttitase. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 16.9.2022]. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/markkinoiden-yhtenaisyyss/pohjoismainen-tasehallinta/varttitase/>

Flynn D. 2011. Thermal power plant simulation and control. IET.

Frangopoulos C. 2017. Cogeneration: Technologies, optimization and implementation: Technologies, optimization and implementation. Stevenage: The Institution of Engineering and Technology.

- Giri P. 2012. Effort estimation for design activity in power plant equipments. *Journal of Software Engineering and Applications*, 2012, 5, 1001–1007. doi: 10.4236/jsea.2012.512115
- Guelpa E. & Verda V. 2019. Thermal energy storage in district heating and cooling systems: A review. *Applied Energy*. doi: 10.1016/j.apenergy.2019.113474
- Haakana J., Tikka V., Lassila J., Partanen J. 2017. Methodology to analyze combined heat and power plant operation considering electricity reserve market opportunities. *Energy (Oxford)*. Vol. 127, s. 408–418.
- Heiskanen E., Matschoss K., Laakso S., Rinkinen J., Apajalahti E. 2021. Energiamurroksen jännitteet kansalaisten arjessa. *Alue ja ympäristö*. Vol. 50, nro 1, s. 124–138.
- Korpela T., Kaivosoja J., Majanne Y., Laakkonen L., Nurmoranta M., Vilkkö M. 2017. Utilization of District Heating Networks to Provide Flexibility in CHP Production. *Energy Procedia*, Vol. 116, s. 310–319. ISSN 1876-6102.
- Koskelainen L., Saarela R., Sipilä K. 2006. *Kaukolämmön käsikirja*. Energiateollisuus ry. 566s. ISBN 952-5615-08-1.
- Mäkelä V., Tuunanen J. 2015. *Suomalainen kaukolämmitys*. Mikkelin ammattikorkeakoulu. ISBN: 978-951-588-507-4.
- Mönkkönen T. 2023. Säätoasiantuntija. AFRY Finland Oy. Keskustelut Tampereella 1.9.2022–29.3.2023.
- Nord Pool 2022. Trading. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 14.9.2022]. Saatavissa: <https://www.nordpoolgroup.com/en/trading/>
- Pesola A. Bröckl, M., Vanhanen J. 2011. Älykäs kaukolämpöjärjestelmä ja sen mahdollisuudet. Loppuraportti. Energiateollisuus. Gaia Consulting Oy. 38 s.
- Phetteplace G. 2013. *District heating guide*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. ASHRAE 2013. ISBN 978-1-936504-43-5
- Pöllänen J. 2017. *Veden tiheys ja paine syvissä kairanrei'issä*. Posiva Oy. Työraportti 2002–2017.

- Pöyry 2019. Esiselvitys: Ylijäämälämmön potentiaali teollisuudessa. Motiva Oy, Helsinki 2019.
- Ramboll 2021. Selvitys kaukolämpömarkkinan avaamisen tavoitteista, edellytyksistä ja vaikutuksista. Raportti 1510064058. 72s.
- Rosen M., Marc A., Koochi-Fayegh, S. 2016. Cogeneration and district energy systems: modelling, analysis and optimization. Herts. England: The Institution of Engineering and Technology.
- Saari J. 2022a. Sähkön ja lämmön yhteistuotanto höyryvoimalaitoksissa (CHP). Voimalaitosopin perusteet. Luentomateriaali 22.2.2022. Lappeenranta University of Technology.
- Saari J. 2022b. Höyryvoimalaitoksen komponentit. Voimalaitosopin perusteet. Luentomateriaali 24.1.2022. Lappeenranta University of Technology.
- Saarinen L. 2008. Modelling and control of a district heating system, Master's thesis. Uppsala Universitet.
- Siemens 2016. SIMATIC PCS7 System Course. Training documentation, V8.1.0, ST-PCS7SYS.
- Siemens 2023. Process Control. Industrial Automation. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 6.3.2022]. Saatavissa: <https://www.siemens.com/global/en/products/automation/process-control.html>
- Statistics Finland 2022. Energy in Finland 2022. ISBN 978-952-244-700-5
- Streckiene G., Martinnaitis V., Andersen A., Katz J. 2009. Feasibility of CHP-plants with thermal stores in the German spot market. Applied Energy. Volume 86, Issue 11, s. 2308–2316.
- Tilastokeskus 2022. Suomi lukuina 2022. ISSN 2242-847X
- Tynjälä T. 2013. Teknillinen termodynamiikka. Luentomoniste Osa 2. Lappeenranta University of Technology.
- Työ- ja elinkeinoministeriö 2022a. Sähkömarkkinat. Energia. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 14.9.2022]. Saatavissa: <https://tem.fi/sahkomarkkinat>

- Työ- ja elinkeinoministeriö 2022b. Lämpömarkkinat. Energia. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 14.9.2022]. Saatavissa: <https://tem.fi/lampomarkkinat>
- Uusitalo A. 2022. Principles of heat exchangers. Efficient power plants and waste heat recovery. Luentomateriaali. Lappeenranta University of Technology.
- Valtioneuvosto 2022. Hiilineutraali ja luonnon monimuotoisuuden turvaava Suomi. Hallitusohjelma. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 7.9.2022]. Saatavissa: <https://valtioneuvosto.fi/marin-hallitus/hallitusohjelma/hiilineutraali-ja-luonnon-monimuotoisuuden-turvaava-suomi>
- Vepsäläinen A., Pitkänen J., Hyppänen T. 2012. Fundamentals of heat transfer. Lappeenranta University of Technology. ISBN 978-952-265-127-3
- VTT 2020. Hukkalämpö kaukolämpöjärjestelmässä. Asiakasraportti VTT-CR-00340-20.
- VTT 2022. Ydinkaukolämpöselvitys. Tutkimusraportti VTT-CR-01059-22.
- Wang H., Hua P., Wu X., Zhang R., Granlund K., Li J., Zhu Y., Lahdelma R., Teppo S. Yu L. 2022. Heat-power decoupling and energy saving of the CHP unit with heat pump based waste heat recovery system, Energy, Vol. 250, 2022, 123846, ISSN 0360-5442,
- World Wide Fund for Nature 2022. Pariisin ilmastopimus. Uhat. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 7.9.2022]. Saatavissa: <https://wwf.fi/uhat/ilmastonmuutos/pariisin-ilmastopimus/>