



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

KALLE LESKINEN
KAUKOLÄMPÖVERKON ENERGIATEHOKKUUDEN
PARANTAMINEN AJOTAPOJA JA SÄÄTÖRATKAISUJA
KEHITTÄMÄLLÄ

Diplomityö

Tarkastaja: professori Matti Vilkkö
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Teknillisten tieteiden
tiedekuntaneuvoston kokouksessa
29. maaliskuuta 2017

TIIVISTELMÄ

LESKINEN KALLE: Kaukolämpöverkon energiatehokkuuden parantaminen ajotapoja ja säätöratkaisuja kehittämällä
Tampereen teknillinen yliopisto
Diplomityö, 80 sivua
Helmikuu 2018
Automaatiotekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma
Pääaine: Prosessien hallinta
Tarkastaja: professori Matti Vilkkö

Avainsanat: kaukolämpöverkko, kaskadisäätö, myötäkytkentä, lämmönsiirto, Gain-schedulointi, energiatehokkuus, windup -ilmiö

Kaukolämpöverkon keskeisin tarkoitus on tarjota sen kuluttajille riittävä lämpöenergia. Kaukolämpöverkon energiatehokkuuden kehittämisessä suurin haaste liittyy riittävän lämpöenergian jatkuvaan takaamiseen kaikille kuluttajille, sillä kuluttajien lämmöntarpeet vaihtelevat jatkuvasti esimerkiksi kellonajan tai ulkoilman lämpötilan mukaan. Lämmöntarpeet vaihtelevat myös satunnaisesti, jolloin kokonaislämmöntarpeen tarkka ennustaminen on mahdotonta. Kaukolämpöverkon menoveden lämpötila ja paine nostetaan usein liian korkeiksi, jotta kuluttajien lämmöntarve pystytään varmasti kattamaan kaikissa olosuhteissa. Liian korkeat lämpötila- ja painetasot aiheuttavat kaukolämpöverkossa tehohäviöitä, jolloin verkon energiatehokkuus huonontuu. Energiatehokkuuden parantamiseksi kaukolämpöverkon menoveden lämpötila- ja painetasojen tulisi mukautua kuluttajien lämmöntarpeisiin, jolloin tehohäviöiden osuutta saadaan vähennettyä.

Tämän työn tavoite on parantaa Stora Enson Anjalankosken tehtaiden kaukolämpöverkon energiatehokkuutta vähentämällä höyrynkulutusta kaukolämpöverkon lämmityksessä. Höyrynkulutusta vähentämällä säästetään maakaasua, jolloin säästöt ovat sekä taloudellisia että ympäristöystävällisiä. Työssä käytettyjä menetelmiä kaukolämpöverkon energiatehokkuuden parantamiseksi ovat menoveden lämpötila- ja painesäädön kehittäminen sekä kaukolämpöverkon ajotapojen ja sisäisten kytkentöjen muuttaminen.

Tuloksissa osoitetaan, että tämän projektin aikana tehdään kaukolämpöverkon höyrynkulutus on vähentynyt 30–60 %, kun ulkoilman lämpötila on välillä $-9-4$ °C. Merkittävin yksittäinen selitys höyrynkulutuksen vähentymiselle on tehdään prosesseista syntyneen hukkalämmön tehokkaampi hyödyntäminen uuden lämmönsiirtimen avulla. Kaukolämpöverkon ajotapojen muutoksella on myös merkittävä vaikutus höyrynkulutuksen vähentymiseen.

Vaikka kaukolämpöverkon höyrynkulutus pystytään helposti mittaamaan, on vaikea arvioida kuinka paljon yksittäiset kaukolämpöverkossa tehdyt muutokset ovat vaikuttaneet höyrynkulutukseen ja sitä kautta energiatehokkuuteen, sillä erilaisia muutoksia on tehty samaan aikaan. Työn kannalta oleellisinta on kuitenkin se, että kaukolämpöverkon energiatehokkuuteen vaikuttavat tekijät on tunnistettu ja energiatehokkuus on noussut paremmalle tasolle.

ABSTRACT

LESKINEN KALLE: Improving the energy efficiency of district heating system by developing control and driving methods.

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 80 pages

February 2018

Master's Degree Programme in Automation Technology

Major: Process Control

Examiner: Professor Matti Vilkkö

Keywords: district heating system, cascade control, feed forward control, heat transfer, Gain scheduling, energy efficiency, windup effect

The main purpose of district heating system is to deliver sufficient thermal power for its consumers all the time which is at the same time the most challenging part of improving energy efficiency of district heating system. It is difficult because customers' thermal power needs are changing continually for example because of time or outside temperature. The needs also change randomly so it is impossible to do accurate real time estimates about the total needs of thermal power. Usually the temperature and pressure of supply water in district heating system are raised too high level because of trying to ensure sufficient thermal power for consumers in all situations. Too high temperature and pressure levels cause power losses and decrease the energy efficiency of district heating system. If these levels could adapt to customers' heat power needs, the power losses would reduce and the energy efficiency of district heating system would increase.

The main target of this work is to increase energy efficiency of district heating system by decreasing use of steam that is used as thermal power source. The location of the district heating system is in Stora Enso's factories in Anjalankoski. Reducing use of steam also reduces use of natural gas so savings are both economical and environmentally friendly. Main methods that are used in this work to improve the energy efficiency are developing pressure and temperature control strategies of supply water, improving district heating system's driving methods and changing structure of the district heating system.

In the result section it is shown that during this project the use of steam has decreased 30–60 % while the outside temperature has been $-9-4$ °C. The most significant single reason why the use of steam has decreased is more effective way to use waste heat power that comes from paper factory processes. Developed driving methods have also decreased the use of steam significantly.

Even though the use of steam can be measured, it is difficult to estimate how much a single change in the district heating system has changed the use of steam and the energy efficiency because all changes have been done at the same time. However, the most important facts for this work are that factors related to the energy efficiency have been identified and the energy efficiency has risen to upper level.

ALKUSANAT

Diplomityö tehtiin Stora Enson Anjalan paperitehtaalla osana laajempaa kaukolämpöprojektia. Projekti toteutettiin Stora Enson ja Empowerin välisenä yhteistyönä ja sain apua työhön liittyen molemmilta osapuolilta. Haluan kiittää kaikkia työkavereita, jotka ovat edistäneet diplomityötä tavalla tai toisella. Erityisen kiitoksen ja maininnan ansaitsevat Empowerilta Timo Töyrylä ja Stora Ensolta Risto Vahteri. Timo auttoi erityisesti diplomityöpaikan ja -aiheen hankkimisessa ja Risto on toiminut työn ohjaajana, jolta olen lukemattomia kertoja saanut neuvoja oikean suunnan löytämisessä.

Kouluun liittyen haluan kiittää erityisesti työn tarkastajaa professori Matti Vilkkoa sekä työn tarkistamisesta että selkeästä ja motivoivasta opetustyylistä. Haluan mainita myös, että prosessien hallinnan opetustimistä (VP, Masa, Terho ja Ykä) jäi erittäin hyvä ja positiivinen fiilis ja olen hyvin tyytyväinen, että valitsin prosessien hallinnan pääaineekseni.

Suuret kiitokset ansaitsevat myös tukijoukkoni, joihin kuuluvat koulukaverit, ystävät, perhe ja kaikki muutkin, jotka ovat joskus minua selkään taputtaneet ja todenneet ”kyllä se siitä”.

Kouvolassa, 20.03.2018

Kalle Leskinen

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
1.1	Aiheen kuvaus	1
1.2	Ratkaistava ongelma	2
1.3	Työn menetit	2
1.4	Työympäristö sekä työn sisältö	3
2.	KAUKOLÄMPÖVERKOSTON KEHITYSMENETELMÄT	5
2.1	Kaukolämpöverkoston rakenne ja toimintaperiaate yleisesti.....	5
2.2	Kaukolämpöverkon muuttujien vaikutus toisiinsa	8
2.2.1	Lämpöteho	8
2.2.2	Tehohäviöt	9
2.2.3	Muuttuva viive	10
2.3	Kaukolämpöverkoston säätörakenteet.....	11
2.3.1	PID-säädin.....	11
2.3.2	Negatiivinen takaisinkytkentä.....	13
2.3.3	Myötäkytkentä	14
2.3.4	Kaskadisäätö	15
2.4	Kaukolämpöverkon matemaattinen mallintaminen	17
2.4.1	Mallintamisen periaate	17
2.4.2	Siirtofunktio	19
2.4.3	Menoveden lämpötilan mallintaminen.....	22
2.4.4	Keskipakopumpun paine-eron mallintaminen	22
2.5	Gain Scheduling -säätö.....	24
3.	KAUKOLÄMPÖVERKON ENERGIA TEHOKKUUDEN PARANTAMINEN..	26
3.1	AP:n kaukolämpöverkosto	26
3.1.1	Alkuperäinen rakenne	26
3.1.2	Kaukolämpöverkon kuluttajien asettamat vaatimukset	29
3.1.3	Muutoksen jälkeinen rakenne	32
3.2	AP:n kaukolämpöverkoston säätäminen	34
3.2.1	Alkuperäisen PGW-piirin lämpötilasäätö	35
3.2.2	Alkuperäisen PGW-piirin painesäätö.....	36
3.2.3	Shunttipiirin lämpötilasäätö	38
3.2.4	Lämpötilasäädön kehittäminen PGW-piirissä	40
3.2.5	Painesäädön kehittäminen PGW-piirissä	50
3.3	Lämmönsiirron säätö TMP- ja PGW-piirien välillä.....	52
3.3.1	Lämmönsiirron kytkentälogiikka	53
3.4	Kaukolämpöverkon ajotapojen kehittäminen.....	55
3.4.1	IK-haaran ajotapojen kehittäminen	57
3.4.2	AP-haaran ajotapojen kehittäminen	58
4.	TULOKSET	62
4.1	IK-haaran lämpötilasäädön kehittyminen	62

4.2	IK-haaran painesäädön kehittyminen.....	65
4.3	Kaukolämpöverkon energiatehokkuuden kehittyminen.....	68
5.	YHTEENVETO	75
	LÄHTEET.....	77

LYHENTEET JA MERKINNÄT

AP	Anjalan paperitehdas
IK	Inkeröiden kartonkitehdas
KL	Kaukolämpö
LS	Lämmönsiirrin
PGW	Pressure Groundwood
PID	Proportional, Integral, Derivative
PI-kaavio	Putkitus- ja instrumentointikaavio
TMP	Thermomechanical pulp
c	Vakiotermi
C_p	Ominaislämpökapasiteetti
e	Neperin luku
$e(t)$	Erosuure ajan hetkellä t
F_x	Aineen virtausmäärä
$f(x)$	Funktio
ΔH	Entalpian muutos
h	Korkeus
$H(s)$	Siirtofunktio
K	Systeemin vahvistuskerroin
k	Kulmakerroin
K_x	PID-säätimen x -osan vahvistuskerroin
L	Putken pituus
\dot{m}	Massavirtaus
N	Jakauman otosten lukumäärä
P	Teho
Δp	Paine-ero
Q	Tilavuusvirtaus
r	Putken säde
s	Kompleksimuuttuja
Set	Asetusarvo
T	Lämpötila
T	Aikavakio
t	Aika
Δt	Muuttuva viive
T_D	Derivointiaika
T_I	Integrointiaika
$u(t)$	Ohjauksen suuruus ajan hetkellä t
V	Tilavuus
var	Varianssi
W	Energia
X	Jakauman yksittäisen havainnon arvo
\bar{X}	Jakauman keskiarvo
y	Prosessin lähtösuure
ω	Kierrosnopeus
Φ	Lämmön johtumisteho
λ	Lämmönjohtavuuskerroin

1. JOHDANTO

1.1 Aiheen kuvaus

Kaukolämpöverkolla tarkoitetaan verkostoa, jolla siirretään lämpöä lämpölaitokselta asiakkaille. Verkosto koostuu pumpuista, putkista, lämmityslaitteista ja asiakkaiden lämmönvaihtimista. Lämpölaitoksella kuumennettu vesi siirretään laitoksen ja asiakkaan välillä pumppujen avulla. Asiakas käyttää lämpimän veden sisältämän lämpöenergian lämmönvaihtimen avulla, jolloin lämpö siirtyy asiakkaan verkostoon. Lämpöenergiansa luovuttanut vesi palaa takaisin tuotantolaitoksen lämmitettäväksi. Kaukolämpöä tuotetaan tavallisesti sivutuotteena laitoksissa, joissa lämpöenergiaa menee pääprosessissa paljon hukkaan. Pääprosessin hukkalämmöllä lämmitetään kaukolämpöverkoston vettä, jolloin tuotantolaitoksen energiatehokkuutta voidaan parantaa huomattavasti ja tuotantolaitoksen toiminnasta saadaan kannattavampaa. Laitoksia, jotka voivat tuottaa kaukolämpöä, ovat esimerkiksi paperitehtaat ja sähköä tuottavat voimalaitokset. Kaukolämpöä valmistavat laitokset voivat hyödyntää sitä itse ja myydä muille kuluttajille.

Kaukolämmön (KL) suosio lämmitysmenetelmänä on ollut merkittävässä kasvussa viimeisen 30 vuoden ajan Suomessa. Energiaautisten julkaiseman raportin mukaan vuonna 1988 kaukolämpö oli käytössä 40 % uudisrakennuksissa ja vastaava luku vuonna 2016 oli 60 %. [13] Eryityisesti tiheään asutulla seudulla kaukolämpö on hyvä ratkaisu. Tällöin samaa verkostoa hyödyntävät useat kuluttajat, jolloin ratkaisusta hyötyvät sekä kaukolämmön kuluttajat että tuotantolaitos.

Kaukolämpöverkoston merkittävin vaatimus on, että lämmitysveden on oltava tarpeeksi korkeassa lämpötilassa, jotta kaukolämmön kuluttajat voivat sitä hyödyntää. Myös lämmitysveden virtausnopeuden on oltava riittävä, jotta tarvittava lämpöenergia voidaan siirtää riittävän lyhyessä ajassa tuotantolaitoksen ja kuluttajan välillä. Paineen täytyy myös olla riittävän korkea kaikissa verkoston osissa, jotta kaukolämpövesi virtaisi jokaisen verkossa olevan lämmönsiirtimen läpi. Toisaalta lämmitysvedettä ei kannata lämmittää liikaa, jotta lämpöhäviöt eivät kasvaisi liian suuriksi. Kaukolämpöä käyttävät kuluttajat määrittelevät, kuinka suuri virtausnopeus verkostossa on. Virtausnopeus määräytyy lämpöenergian kulutuksen mukaisesti. Pumppujen paine-eron tulee olla riittävän korkea, jotta kaukolämpöverkosto toimii. Toisaalta liian korkea paine-ero lisää verkoston painehäviöitä, minkä seurauksena pumppaamiseen käytettyä energiaa hukataan enemmän. Paine-ero riippuu pumpun kierrosnopeudesta sekä verkoston virtausvastuksesta.

1.2 Ratkaistava ongelma

Tämän diplomityön tavoitteena on parantaa Stora Enson Anjalankosken tehtaiden kaukolämpöverkoston energiatehokkuutta. Anjalankosken tehtaat koostuvat Inkeröisten kartonkitehtaasta (IK) ja Anjalan paperitehtaasta (AP). Tavoitteena on, että edellisessä kappaleessa esitetyt kolme kaukolämpöverkoston merkittävintä vaatimusta toteutetaan. Samalla tavoitellaan, että kaukolämpöverkosto olisi mahdollisimman energiatehokas. Tällöin kaukolämpöveden lämmittämiseen käytetyn ylimääräisen energian osuus olisi pieni, mikä säästäisi kustannuksia ja näkyisi tuloksessa voittona. Toimenpiteet, joilla tavoitteeseen pyritään, ovat kaukolämpöverkon säätöjen ja ajotapojen kehittäminen sekä alkuperäisen verkon kytkentöjen muuttaminen paremmiksi.

Työssä tutkittavat aihealueet esitetään seuraavien tutkimuskysymysten avulla:

1. Miten kaukolämpöverkon energiatehokkuutta voidaan mitata?
2. Miten kaukolämpöverkon ajotavat ja säätöjen toimivuudet vaikuttavat verkon energiatehokkuuteen?
3. Voidaanko kaukolämpöverkon sisäisiä kytkentöjä muuttamalla parantaa verkon energiatehokkuutta?

Työssä etsitään ratkaisut edellä esitettyihin kysymyksiin. Kysymyksiin etsitään ratkaisu erilaisten metodien avulla. Osa ratkaisumetodeista on löydetty kirjallisuutta ja osa projektiin liittyvien henkilöiden kokemusta ja tietämystä hyödyntäen.

1.3 Työn metodit

Eräs tutkittu metodi on kaukolämpöverkon menoveden prediktiivinen säätäminen. Leo Laakkonen on tutkinut tätä metodologia diplomityössään. Työssä ennustetaan neuroverkon avulla, mikä lämpötila menovedelle on asetettava, minkä perusteella ennustetaan myös paluuv veden lämpötila. Tutkimuksen tavoitteena oli optimoida menoveden lämpötila kuluttajien tarpeiden mukaisesti. Tutkimus osoittautui toimivaksi. Laakkosen mukaan menetelmällä onnistuttiin säästämään energiaa noin 1-1,5 %. [2] Laakkosen työtä on hyödynnetty lähteenä myös tässä työssä. Itse päämetodia ei ole kuitenkaan hyödynnetty, sillä AP:n kaukolämpöverkossa esiintyy liikaa satunnaista vaihtelua kuluttajien lämmöntarpeessa ja niiden ennustaminen on vaikeaa.

Shady Yehia on tutkinut, että hylsyn muotoiselle höyrylämmönsiirtimelle soveltuu kaskadisäädön, myötäkytkennän ja takaisinkytkennän yhdistävä säätörakenne, jossa hyödynnetään jokaisen luetellun säätörakenteen hyvät puolet [9]. Myös Radimin ja Renatan artikkelissa kaskadisäädöllä on saatu hyviä tuloksia verrattuna tavalliseen takaisinkytkettyyn säätöön, kun säädettävänä kohteena on ollut höyryn lämpötila

lämmönsiirtimen avulla [14]. Allen Houtz sekä Doug Cooper ovat myös tutkineet, että myötäkylkennän ja negatiivisen takaiskylkennän yhdistelmä soveltuu veden lämpötilasäätöön lämmönsiirtimen avulla huomattavasti paremmin pelkkään negatiiviseen takaiskylkentään verrattuna [11].

Sebastian Caba, Markus Lepper ja Steven Liu esittävät artikkelissaan, että keskipakopumpun paine-ero voidaan approksimoida, kun tiedetään virtausnopeus sekä pumpun kierrosnopeus. [15] Samaa approksimaatiota käytettiin myös Tampereen teknillisen yliopiston prosessien hallinnan kurssilla, jossa keskipakopumpun dynamiikka mallinnettiin mitatusta datasta identifioimalla [16].

Aiempien tutkimusten pohjalta kaukolämpöverkon menoveden lämpötilasäätö sekä painesäätö ovat osoittautuneet tärkeimmiksi säädettäviksi suureiksi. Kaukolämpöverkon menoveden lämpötilasäätö toteutetaan tässä työssä käyttämällä kaskadisäätöä, myötäkylkentää ja negatiivista takaiskylkentää. Kyseiseen säätöratkaisuun päädyttiin, koska sillä on saavutettu aikaisemminkin hyviä säätötuloksia samantyyppisissä kohteissa. Kaukolämpöverkon paineen säätö päätettiin toteuttaa myötäkylkennän avulla, jolla kompensoidaan tilavuusvirtauksen vaihtelun vaikutus pumpun paine-eroon. Myötäkylkennän avulla pumpun kierrosnopeutta muutetaan samaan aikaan ja samassa suhteessa tilavuusvirtauksen muutoksen kanssa. Myötäkylkennän lisäksi paineen säädössä käytetään negatiivista takaiskylkentää, jotta säädössä päästäisiin tavoitearvoon.

Lisäksi työssä käsitellään, miten kaukolämpöverkon ajotapoja ja kylkentöjä voidaan muuttaa, jotta verkon energiatehokkuus paranisi. Ajotapa- sekä kylkentämuutoksien vaikutuksista verkon energiatehokkuuteen on pohdittu yhdessä kaikkien projektiin kuuluvien henkilöiden kanssa.

Työssä tutkitaan myös Gain Scheduling -menetelmää, jonka avulla säätö saadaan toimimaan paremmin koko säädettävän systeemin toiminta-alueelle, vaikka systeemin dynamiikka muuttuisi toiminta-alueesta riippuen.

1.4 Työympäristö sekä työn sisältö

Tämän diplomityön tutkimusympäristönä on Stora Enson paperitehdas Anjalankoskella. Työ on osa projektia, jonka päämääränä on kehittää tehtaan kaukolämpöverkoston energiatehokkuutta ja parantaa sen kannattavuutta. Projektissa on ollut mukana henkilöstöä sekä Empowerilta että Stora Ensolta. Työssä käytetyt prosessidatat on kerätty MetsoDNA -järjestelmästä. Kerättyä dataa on käsitelty ja analysoitu Excel-, Wedge- ja Matlab -ohjelmistojen avulla.

Luvussa 2 käsitellään työhön liittyvät teoria-asiat. Luvussa 3 käsitellään työn kohteena olevan kaukolämpöverkon energiatehokkuuden kehittämiseen liittyvät asiat, joihin

teoriaa on sovellettu. Luvussa 3 esitetään, miten energiatehokkuuden kehittämiseen liittyvät toimenpiteet toteutetaan käytännössä. Luvussa 4 esitetään tulokset, miten kaukolämpöverkon energiatehokkuus on kehittynyt työn aikana. Lopuksi yhteenvedossa esitetään työn keskeisin sisältö tiivistettynä.

2. KAUKOLÄMPÖVERKOSTON KEHITYSMENETELMÄT

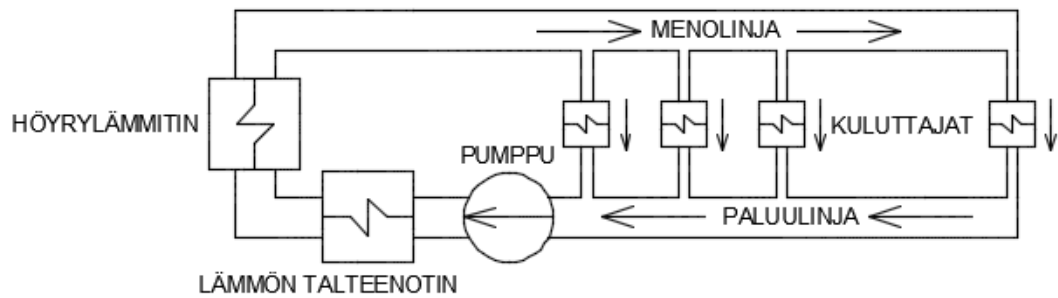
Tässä luvussa selitetään, mistä kaukolämpöverkosto yleisesti muodostuu, miten se toimii ja minkälaisia haasteita kaukolämpöverkoston hallinta aiheuttaa. Luvussa käsitellään, mitä parametreja kaukolämpöverkossa on ja miten ne vaikuttavat toisiinsa. Luvussa esitetään, millaisilla säätöarakehteilla kaukolämpöverkkoa voidaan säätää. Lisäksi esitetään fysikaalisen mallintamisen periaatteet sekä tehtaan kaukolämpöverkosta käsittelevät fysikaaliset mallit, joita hyödynnetään säätöjen virittämisessä. Lopuksi luvussa esitetään Gain Scheduling -menetelmä, jota voidaan hyödyntää PI -säädinten virittämisessä.

2.1 Kaukolämpöverkoston rakenne ja toimintaperiaate yleisesti

Kaukolämpöverkosto on lyhyesti selitettynä lämmönjakoverkon, lämmöntuottajien sekä lämmönkuluttajien muodostama verkosto [7, s. 56]. Lämmönjakoverkko muodostuu eristetyistä putkista, joita pitkin kuuma menovesi sekä jäähtynyt paluuvesi siirretään pumppujen avulla verkoston eri osien välillä.

Ideaalitilanteessa paluulinjaa pitkin virtaavan veden lämpötila on huomattavasti matalampi kuin menolinjan lämpötila. Korkea lämpötilaero linjojen välillä tarkoittaa, että lämmönkuluttajien lämmönsiirtimet toimivat tehokkaasti, jolloin lämpöä voidaan siirtää pienemmällä tilavuusvirtauksella. Matalalämpöisempi vesi sitoo paremmin lämpöenergiaa itseensä kuin korkealämpöinen vesi. Tästä syystä lämmön talteenottamisen energiatehokkuus paranee, kun paluueden lämpötila pienenee. Menoveden lämpötilan tavoitearvon valitsemisessa käytetään nykyään lähes poikkeuksetta ulkolämpötilaan perustuvaa lämpötilafunktiota. Funktion muuttujana on ulkolämpötila ja tuloksena menoveden lämpötilatavoite. [7, s. 56-55]

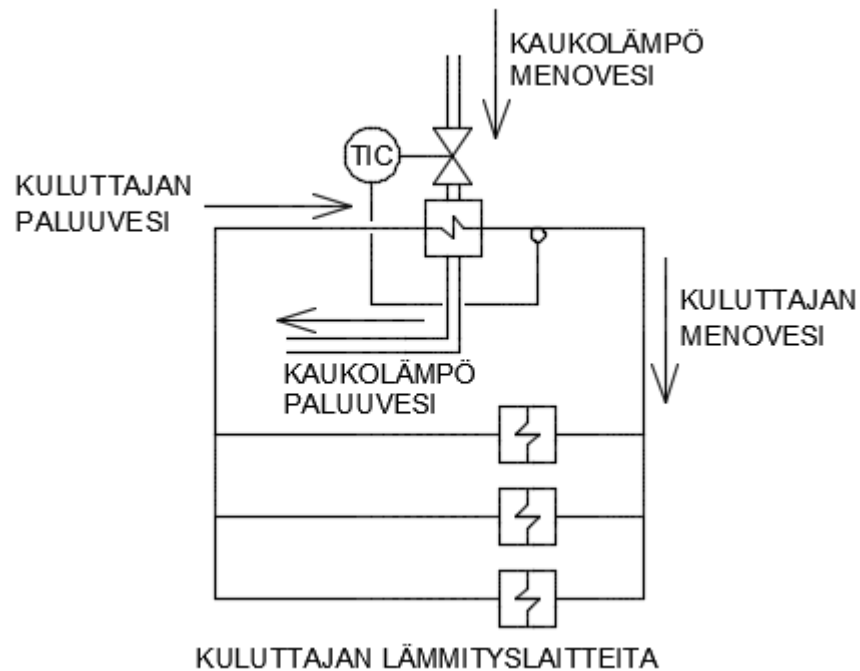
Lämmöntuottajien tehtävä kaukolämpöverkostossa on tuottaa koko kaukolämpöverkon tarvitsema lämpöenergia. Lämmöntuottajia ovat esimerkiksi joissakin voimalaitoksissa käytetyt höyrykattilat sekä teollisuuden prosessien lämmön talteenottimet, joilla hyödynnetään prosesseissa syntyvää hukkalämpöä. Lämmönkuluttajat käyttävät kaukolämpöverkkoon tuodun lämmön. Lämmönkuluttajia ovat esimerkiksi asutusalueet, tehtaan sisätilan lämmityslaitteet sekä jokin tehtaan prosessi, jonka käyttövesi lämmitetään kaukolämmön avulla. Kuvassa 1 on esitetty kaukolämpöverkoston perusrakenne yksinkertaistettuna.



Kuva 1. Kaukolämpöverkko peruseriaatteeltaan.

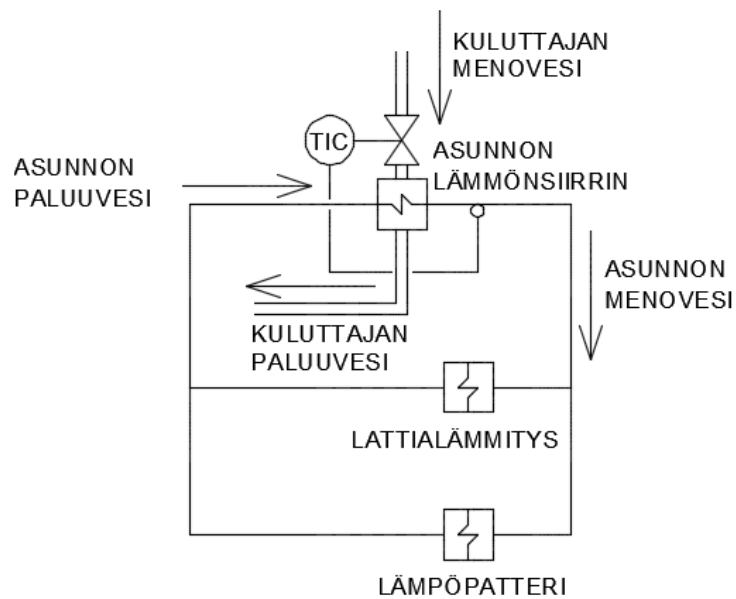
Kuvan 1 esittämä kaukolämpöverkosto koostuu lämmöntuottajista, lämmönjakoverkosta sekä lämmönkuluttajista, jossa lämmöntuottajia ovat höyrylämmitin sekä lämmön talteenotin.

Lämmön siirtäminen lämmönjakoverkon ja kuluttajien välillä säädetään kuluttajien yksilökohtaisten tarpeiden mukaan. Sääto toteutetaan paikallisen säätimen avulla, jonka tarkoituksena on pitää kuluttajan käyttöveden lämpötila halutun suuruisena [1, s. 8]. Käytännössä lämpötilan säätäminen toteutetaan säätämällä kaukolämpöveden virtausta kuluttajan lämmönsiirtimen lävitse säätöventtiilillä. Kasvattamalla lämmönsiirtimen läpivirtausta kasvaa lämmönsiirtimen lämmitysteho, jolloin kuluttajan käyttöveden lämpötila kasvaa. Kuvassa 2 havainnollistetaan kuluttajan käyttöveden lämpötilan säätötapaa.



Kuva 2. Kuluttajan käyttöveden lämpötilasäätö kaukolämpöverkossa.

Kuluttajan lämpimän käyttöveden lämpötilaa säädetään kuvan 2 osoittamalla tavalla. Lämmönsiirtimen jälkeinen lämpötila mitataan ja sitä säädetään venttiilillä, jolla ohjataan kaukolämpöveden virtaus kuluttajan lämmönsiirtimen läpi. Kuluttajalla voi olla useampi lämmityslaite verkossa. Kuvan 2 tilanteessa kuluttaja voisi olla esimerkiksi asuinalue, jolla on oma lämmönjakokeskus. Esimerkissä kuluttajan lämmityslaitteita ovat asuinalueen asunnot, jotka on liitetty samaan lämmönjakoverkkoon. Kuvan 3 avulla havainnollistetaan, miten kuluttajan lämmityslaitteet kytketään kuluttajan lämpöverkkoon ja miten niitä säädetään. Kuvassa 3 kuluttajan lämmityslaitteet ovat asuntojen lämmönsiirtimiä.



Kuva 3. Asunnon lämmityslaitteiden säätö asuinalueen lämpöverkossa.

Kuten kuva 3 osoittaa, asunnon lämmitysveden lämpötila säädetään asuinalueen lämpöverkossa samalla tavalla, kuin kaukolämmön kuluttajan menoveden lämpötila kaukolämpöverkossa. Asunnon sisäiset lämmityslaitteet säädetään yksilökohtaisesti laitteesta riippuen.

Kaukolämpöverkon menoveden tilavuusvirtauksen määrittää kaukolämpöverkon kuluttajat, joiden lämmöntarpeen mukaan menoveden tilavuusvirtaus vaihtelee. Jos kuluttajat tarvitsevat vähän lämpöä, virtaus on pieni. Jotta kuluttajien lämmönsiirtimet toimisivat, kaukolämpöverkon meno- ja paluulinjan paine-eron on oltava riittävä. Kaukolämpöverkoston putkistoissa esiintyy aina painehäviöitä, joten paine-eron tulee olla riittävän korkea myös kaukolämpöverkon kaukaisempien kuluttajien meno- ja paluulinjan välillä. Riittävä paine-ero tuotetaan pumppujen avulla. Paineita kasvatetaan suurentamalla pumppujen kierrosnopeutta. Pumput sijaitsevat tavallisesti paluulinjan lopussa ennen lämmöntuottajia. Tarpeen vaatiessa voidaan pumppuja asentaa muuallekin lämmönjakoverkossa [1, s. 8]. Paineen tulee olla riittävän korkea lämmönjakoverkon kaikissa kohdissa, jotta vältetään veden kavitoinnilta liian matalan paineen takia [2, s. 2].

Erilaiset kaukolämpöverkot eroavat toisistaan pääosin käyttöveden lämpötilan mukaan. Korkeampaa lämpötilaa käyttävän verkon hyötynä on matalampi virtauksen tarve, jolloin putkistot voidaan mitoittaa pienemmiksi, mutta haittana on suuremmat lämpöhäviöt putkissa. Vastaavasti matalampaa lämpötilaa käyttävän verkon hyötynä on matalammat lämpöhäviöt putkistossa, mutta haittana ovat suuremmat putkikoot sekä suurempi virtauksen tarve, jolloin painehäviöt putkissa kasvavat. [1, s. 8] Erilaisten kaukolämpöverkoston kannattavuuksien tutkimisessa voidaan vertailla, aiheuttavatko suuremmat lämpöhäviöt enemmän kustannuksia kuin suuremmat painehäviöt.

2.2 Kaukolämpöverkon muuttujien vaikutus toisiinsa

Kaukolämpöverkon muuttujat, jotka oleellisimmin vaikuttavat verkoston toiminnan kokonaisuuteen, ovat meno- ja paluueden lämpötilat, meno- ja paluueden paineet, tilavuusvirtaus, muuttuvat viiveet, tehohäviöt, lämmitysteho, sekä muuttuva lämmönkulutusteho. Jotta kaukolämpöverkkoa voidaan hallita, täytyy kaikkien eri muuttujien vaikutukset osata huomioida. Osa muuttujista voidaan mitata suoraan järjestelmässä, mutta osa joudutaan määrittämään epäsuorasti muilla keinoin, kuten laskennallisesti.

2.2.1 Lämpöteho

Kaukolämpöverkoston tavoitteena on tuottaa kuluttajien tarvitsema lämpöteho. Verkostossa on aina tehohäviöitä, joiden takia osa tuotetusta tehosta menee hukkaan. Kaukolämpöverkkoon tulee tuottaa tarpeeksi suuri lämpöteho, jotta se kattaa sekä kuluttajien tarvitseman lämpötehon että verkoston tehohäviöt. Tehojen välistä riippuvuutta toisistaan tarkastellaan kaavalla

$$P_{tuotto} = P_{kulutus} + P_{häviöt}, \quad (1)$$

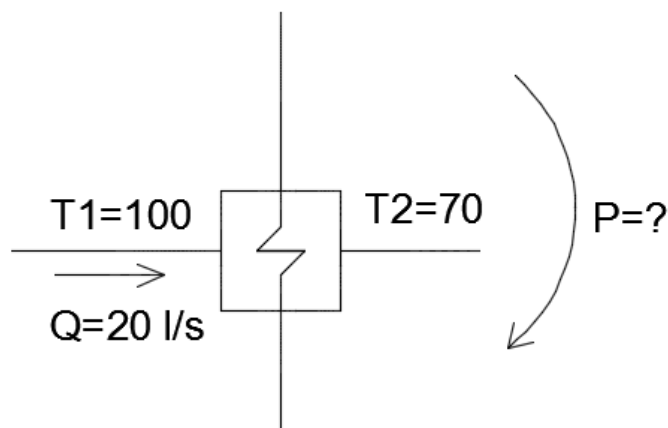
missä P_{tuotto} on kaukolämpöverkossa tuotettu lämpöteho lämmön talteenottimilla sekä muilla lämmityslaitteilla, $P_{kulutus}$ on kuluttajien käyttämä teho ja $P_{häviöt}$ on kaukolämpöverkon tehohäviöt. Oleellista tehojen käyttäytymisessä on, että kuluttajat käyttävät vain sen tehon, minkä ne tarvitsevat. Kaikki ylimääräinen verkostoon tuotettu teho on tehohäviöitä, kuten kaava (1) osoittaa. Optimaalisessa tilanteessa tehoa tuotetaan sen verran, että teho kattaa kuluttajien lämpötehotarpeen, mutta tehohäviöt ovat minimaaliset. Optimaalista tehontuottoa on kuitenkin käytännössä lähes mahdotonta toteuttaa, sillä kuluttajien tehontarve vaihtelee satunnaisesti, ja lämmönsiirrossa esiintyy viivettä, mikä vaihtelee tilavuusvirtauksen funktiona [2, s. 20]. Myös tehohäviöt vaihtelevat satunnaisesti. Esimerkiksi muuttuva tuuli aiheuttaa vaihtelua lämmön johtumisesta aiheutuviin lämpöhäviöihin

Kaukolämpöverkon tuotto- ja kulutustehon riippuvuus meno- ja paluueden lämpötiloista sekä tilavuusvirrasta esitetään energiayhtälön avulla seuraavasti:

$$P = \dot{m}C_p(T_{meno} - T_{paluu}), \quad (2)$$

missä P on tarkasteltavan kohteen lämpöteho, \dot{m} on lämmönsiirrossa käytetyn aineen massavirtaus C_p on virtaavan aineen ominaislämpökapasiteetti, T_{meno} on kohteeseen menevän aineen lämpötila ja T_{paluu} on kohteesta lähtevän aineen lämpötila. [2, s. 3] Kaukolämpöverkossa käytetään lähes aina vettä lämmönsiirtoaineena. Pienillä paineilla vesi on lähes kokoonpuristumatonta, jolloin kaukolämpöverkon pienet paine-erot eivät juurikaan vaikuta veden tiheyteen [3, s. 7]. Veden tiheys muuttuu lämpötilan funktiona. Esimerkiksi 50 °C veden tiheys on noin $988 \frac{kg}{m^3}$ ja 100 °C veden tiheys on noin $958 \frac{kg}{m^3}$ [12].

Kaavalla (2) voidaan laskea, kuinka suuri lämmitysteho tarvitaan tietyn vesimäärän lämmittämiseen tiettyyn lämpötilaan. Kaavalla (2) voidaan myös laskea veden lämpötilan muutokset tietyllä teholla. Kuvassa 4 havainnollistetaan kaavan (2) käyttömahdollisuuksia kaukolämpöverkossa.



Kuva 4. Lämmönsiirtimen lämmitysteho voidaan laskea energiayhtälön (2) avulla.

Kuvan 4 esimerkissä on mitattu lämmönsiirtimen läpivirtaus sekä virtaavan veden meno- ja tulolämpötilat. Mittausten perusteella voidaan laskea lämmönsiirtimen teho käyttäen kaavaa (2).

2.2.2 Tehohäviöt

Kuten kaava (2) osoittaa, lämpöteho määräytyy tilavuusvirran ja lämpötilaeron tulona. Jos teho pidetään vakiona, mutta menoveden lämpötilaa kasvatetaan, tilavuusvirta vähenee. Tehohäviöt muodostuvat painehäviöistä sekä lämpöhäviöistä. Kun lämpötilaeroa kasvatetaan, vähenee tilavuusvirtaus ja sitä kautta myös painehäviöt, mutta lämpöhäviöt kasvavat. Jos verkoston painehäviöt lisääntyvät, pumppaustehohäviöt kasvavat. Pumput käyttävät sähköä toimiakseen, joten pumppaustehohäviöiden kasvaminen kasvattaa sähkön kulutusta. Tehohäviöt pumppauksessa aiheuttaa

pienemmät kustannukset kuin lämpöhäviöt putkistoissa, osittain edullisen sähkön hinnan takia [2, s. 28]. Toinen syy on, että lisääntyneet painehäviöt putkistossa johtuvat veden ja putkiston välisen kitkan kasvamisesta [27]. Kitkan kasvu nostaa veden lämpötilaa, jolloin osa painehäviöistä ei mene hukkaan. Näistä syistä on taloudellisempaa pienentää lämpöhäviöitä, vaikka painehäviöt kasvaisivat. Painehäviöiden tarkastelussa täytyy huomioida, että pumppujen teho riittää pitämään paineen tarpeeksi korkeana kaukolämpöverkoston kaikissa kohdissa.

Lämpöhäviöt kaukolämpöverkossa aiheutuvat pääosin lämmön johtumisesta putkistosta ympäristöön. Lämpöhäviöitä aiheuttavat myös verkon muut laitteet, mutta putkien osuus kokonaislämpöhäviöistä on merkittävä, jos verkossa on paljon putkia verrattuna muihin laitteisiin. [2, s. 23]. Lämmön johtuminen putkesta ympäristöön lasketaan kaavalla

$$\Phi = \frac{2\pi\lambda L}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}(T_1 - T_2), \quad (3)$$

missä Φ on lämpöteho, jolla lämpö johtuu putkista ympäristöön, λ on putken eristeestä riippuva lämmönjohtavuuskerroin, r_2 on putken ulkosäde, r_1 on putken sisäsäde, T_1 on putken sisälämpötila, T_2 on putken ympäristön lämpötila ja L on putken pituus. [5, s. 5]

2.2.3 Muuttuva viive

Kaukolämpöveden lämmitykseen liittyy muuttuva viive. Viivettä voidaan selittää seuraavasti: Kun menoveden lämpötilaa kasvatetaan, lämmitystehoa lisätään. Lämmitettävä vesi virtaa lämmönsiirtimen läpi jollain nopeudella tietyn matkan, jonka jälkeen veden lämpötila mitataan. Veden lämmitystehon lisäys näkyy lämpötilan mittauksessa vasta viiveen kuluttua. Viiveen suuruus riippuu lämmitettävän veden virtausmatkasta sekä virtausnopeudesta, jolloin se muuttuu virtausnopeuden funktiona. Muuttuva viive noudattaa melko tarkasti seuraavaa approksimaatiota:

$$\Delta t = \frac{V}{Q_0}, \quad (4)$$

missä Δt on muuttuva viive, V on viiveen tarkasteluvälin nestetilavuus ja Q_0 on nesteen tilavuusvirtaus viiveen tarkasteluvälillä [1, s. 10]. Muuttuva viive hankaloittaa säätöjen toimintaa. Jos säätö on viritetty stabiiliksi suuremmalla tilavuusvirtauksella, voi säätö olla epästabiili, kun tilavuusvirtaus pienenee ja viive kasvaa. Kuten kaava (4) osoittaa, viive kasvaa, kun tilavuusvirtaus pienenee.

Jos säätöpiirin mittauksessa on viivettä, on olemassa riski, että säätö ei pysy stabiilina, jolloin säädettävä suure alkaa värähtelemään hallitsemattomasti [4]. Mitä suurempi viive on, sen hitaammaksi säätö tulee virittää, jotta se pysyy stabiilina. Viivettä voidaan kompensoida esimerkiksi myötäkytkennän avulla, josta kerrotaan luvussa 2.3.3.

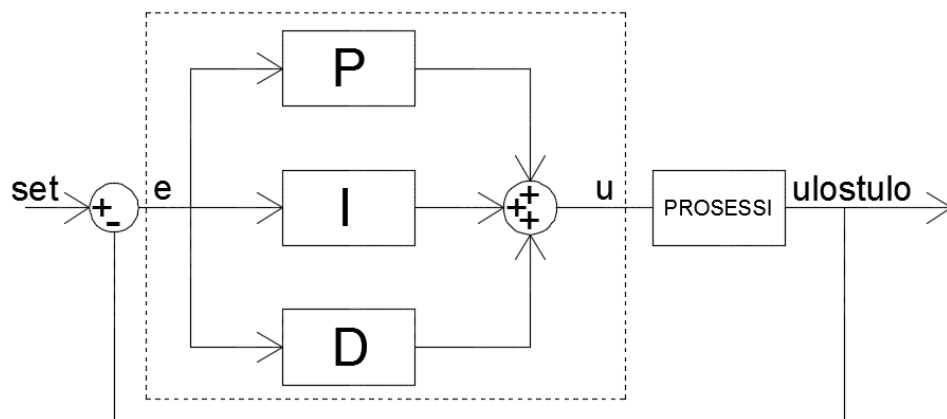
2.3 Kaukolämpöverkoston säätörakenteet

Kaukolämpöverkon tärkeimmät muuttujat ovat menoveden lämpötila, veden virtausnopeus sekä verkoston paine [6, s. 106-110]. Kaukolämmön kuluttajat määräävät virtausnopeuden kaukolämmön kulutuksen mukaan, jolloin virtausnopeutta ei suoraan säädetä. Sitä voidaan kuitenkin säätää epäsuorasti muuttamalla menoveden lämpötilaa. Pientämällä lämpötilaa virtausnopeus kasvaa, mikä on havaittavissa myös kaavasta (2).

Kaukolämpöverkossa menoveden lämpötila ja verkoston paine säädetään halutun suuruisiksi. Näiden pääsäättöjen tulee toimia keskenään mahdollisimman hyvin, jotta kaukolämpöverkko toimii halutulla tavalla. Tässä luvussa esitetään PID-säätimen (Proportional, Integral, Derivative) perusidea, sillä sitä käytetään kaikissa AP:n kaukolämpöverkon pääsäädöissä. Luvussa esitetään myös pääsäättöjen säätörakenteet, joita ovat negatiivinen takaisinkytkentä, myötäkytkentä sekä kaskadisäätö.

2.3.1 PID-säädin

PID-säädin koostuu nimensä mukaisesti vahvistusosasta (P -osa), integroivasta osasta (I -osa) sekä derivoivasta osasta (D -osa). Kaikkia säätimen osia ei aina tarvita. Säätimestä voidaan hyödyntää mitä vain osia ja yhdistää niitä. Teollisuudessa useimmin käytetyt yhdistelmät ovat PID-, PI- ja PD-säätimet. [19, s. 11] Esimerkiksi jos jättää integroivan osan pois, muodostuu PD-säädin. PID-säätimen malli esitetään kuvassa 5.



Kuva 5. Katkoviivojen rajaama alue esittää PID -säätimen rakennetta.

Kuvassa 5 set tarkoittaa asetusarvoa, e erosuuretta ja u säätimen ohjausta. Eroosuure muodostuu asetusarvon ja ulostulon erotuksesta. PID-säätimen P -osan vaikutusta säätimen ohjaukseen ajan hetkellä t kuvataan kaavalla

$$u(t) = K_p e(t), \quad (5)$$

missä K_P on säätimen vahvistus ja $e(t)$ on erosuureen arvo ajan hetkellä t . PID-säätimen I -osan vastaavaa vaikutusta kuvataan kaavalla

$$u(t) = K_I \int_0^t e(t), \quad (6)$$

missä K_I on integraalin vahvistuskerroin. PID-säätimen D -osan vastaava vaikutus lasketaan kaavalla

$$u(t) = K_D \frac{de(t)}{dt}, \quad (7)$$

missä K_D on säätimen derivaatan vahvistus. PID-säätimen vaikutus ohjaukseen ajan hetkellä t lasketaan kaavalla

$$u(t) = K_P e(t) + K_I \int_0^t e(t) + K_D \frac{de(t)}{dt}. \quad (8)$$

Huomataan, että kaava (8) muodostuu kaavojen (5), (6) ja (7) summasta, mikä on myös pääteltävissä kuvan 5 avulla. [19, s. 11]

Vahvistuskerroin K_I voidaan muuttaa integrointiajaksi kaavalla

$$T_I = \frac{K_P}{K_I}, \quad (9)$$

missä T_I on integrointiaika. Vahvistuskerroin K_D voidaan muuttaa derivointiajaksi ja lasketaan kaavalla

$$T_D = \frac{K_D}{K_P}, \quad (10)$$

missä T_D on derivointiaika. Integrointi- ja derivointiajan avulla PID-säätimen ohjaus lasketaan kaavalla

$$u(t) = K_P \left(e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t) + T_D \frac{de(t)}{dt} \right). \quad (11)$$

Kaavasta (11) voidaan päätellä, että PID -säätimen vahvistuskerroin K_P vaikuttaa suoraan ohjauksen muutosnopeuteen. Suurentamalla vahvistuskerrointa, ohjauksen muutosnopeus ja säätö nopeutuu. Vahvistuskertoimen kasvattaminen voi aiheuttaa värähtelyä säädettävän prosessin vasteessa ja pahimmassa tapauksessa tehdä säädöstä epästabiliin. Vahvistuskertoimen virityksessä tehdään kompromissi säädön nopeuden ja vasteen värähtelyn välillä. [19, s. 11]

PID-säätimen integrointiaika T_I vaikuttaa käänteisesti ohjauksen muutosnopeuteen, kuten kaavasta (11) voi päätellä. Kasvattamalla integrointiaikaa erosuureen integraalin vaikutus ohjauksen muutosnopeuteen pienenee ja säätö hidastuu. Vastaavasti pienentäessä integrointiaikaa säätö nopeutuu. Liian pieni integrointiaika aiheuttaa säädössä värähtelyä.

PID-säätimen I -osan tehtävä on integroimalla erosuuretta muuttaa ohjauksen arvoa, kunnes erosuure suppenee nolnaan ja säätövirhe eliminoituu.

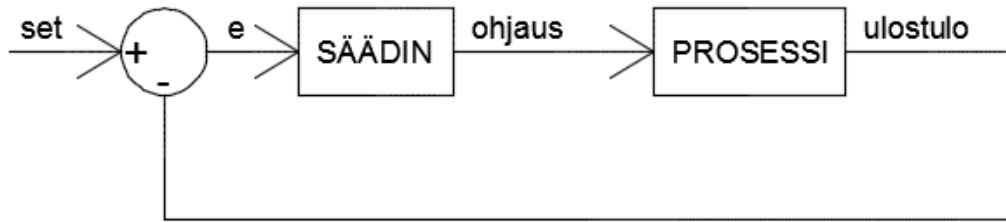
D -osan derivointiaika vaikuttaa suoraan ohjauksen muutosnopeuteen, kuten kaava (11) osoittaa. Kun erosuureen muutosnopeus kasvaa, derivointiaika vahvistaa muutosta ja kasvattaa ohjauksen muutosnopeutta. D -osalla voidaan nopeuttaa säätöä, mutta se on erittäin herkkä mittauskohinalle. Sen vuoksi usein PID-säätimessä on mukana D -osassa alipäästösuodatin, jonka avulla mittauskohinan vaikutusta säätöön saadaan pienennettyä. D -osaa ei tavallisesti käytetä, jos säädettävät jatkuva-aikaiset prosessit ovat hitaita, koska sillä ei saavuteta mitään hyötyä säädön kannalta. D -osaa ei käytetä myöskään, jos ei haluta, että säädin reagoi voimakkaasti pieniin häiriöihin. [19, s. 12]

PID-säätimen I -osa voi aiheuttaa windup -ilmiön. Prosessia ohjaavan toimilaitteen saturoituessa minimi tai maksimi arvoonsa erosuure ei välttämättä suppene nolnaan. Säätimen I -osa integroi erosuuretta. Kun erosuure ei ole nollla, I -osa kasvattaa tai pienentää säätimen ohjausta, vaikkei säädettävä toimilaite reagoisi ohjauksen muutokseen. Säätimen ohjauksen itseisarvon kasvaminen toimilaitteen saturoituessa aiheuttaa windup -ilmiön. Normaalisti kun erosuureen etumerkki (positiivinen tai negatiivinen) vaihtuu toiseksi, toimilaite reagoi siihen nopeasti. Windup -ilmiöstä johtuen toimilaite reagoi muutokseen viiveellä. Toimilaite reagoi muutokseen vasta sen jälkeen, kun säätimen ohjaus on palautunut windup -ilmiöstä takaisin toiminta-alueelle. Tavallisesti säädettävä suure ajautuu windupin takia epätoivottuun lopputulokseen, koska säätö ei toimi suunnitellusti. [18]

Windup -ilmiö estetään anti-windupin avulla, jolla rajoitetaan integroivan säätimen ohjaus toimilaitteen saturoituessa. MetsoDNA -järjestelmässä PID-säädin voidaan toteuttaa rajoittamalla sen ohjaus jollekin välille, jolloin windup -ilmiötä ei pääse syntymään. Järjestelmässä anti-windup on toteutettu PID-säätimessä sisäisesti, jolloin sitä ei tarvitse itse tehdä.

2.3.2 Negatiivinen takaisinkytkentä

Takaisinkytkentä on säätötekniikassa eniten käytetty säätörakenne. Sen avulla voidaan hyödyntää prosessin mittaustietoa ja ohjata prosessia ilman tarkempaa perehtymistä prosessin toimintaan ja dynamiikkaan. Takaisinkytkettyä järjestelmää kutsutaan myös suljetuksi järjestelmäksi. Suljettu järjestelmä on yksinkertaisimmillaan säätimen, prosessin ja mittauksen muodostama kokonaisuus. Kuvassa 6 on havainnollistettu suljetun järjestelmän rakenne.



Kuva 6. Suljetun järjestelmän perusrakenne.

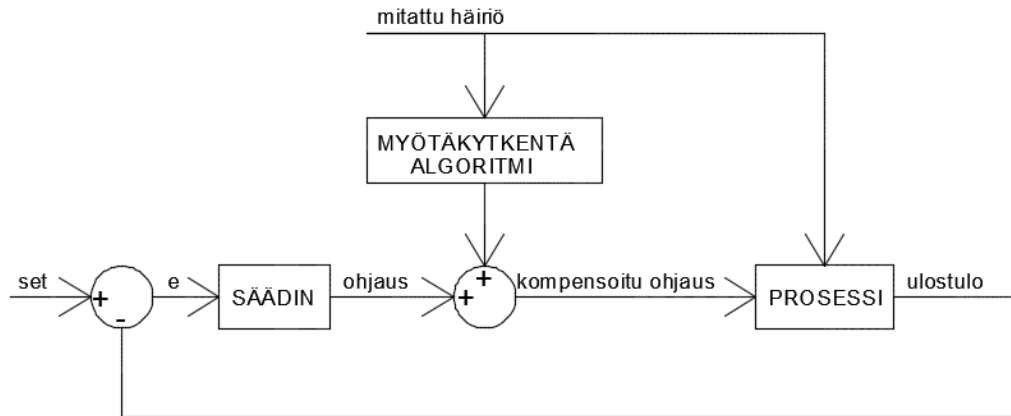
Kuvan 6 kytkentä esittää negatiivista takaisinkytkentää, sillä ero suure muodostuu asetusarvon ja mittauksen erotuksesta. Negatiivisella takaisinkytkennällä pyritään siihen, että ero suure suppenee nolliin, jolloin prosessin ulostulo suppenee asetusarvoon. Positiivisessa takaisinkytkennässä mittaus summataan asetusarvoon, jolloin ero suure kasvaa, kunnes prosessin ulostulo vähitellen saturoituu sen maksimi- tai minimiarvoon [8]. Kyseistä ilmiötä pyritään välttämään prosessien säädöissä.

Negatiivisen takaisinkytkennän suurin etu saavutetaan yksinkertaisen rakenteen vuoksi. Säädettävän prosessin dynamiikasta ei välttämättä tarvitse tietää paljoakaan. Silti sitä voidaan säätää negatiivisella takaisinkytkennällä, jossa säädin tekee korjaavat toiminnot, jolloin ero suure suppenee nolliin ja ulostulo tavoitearvoon. Prosessin mallintaminen ei ole välttämätöntä säätimen virittämistarkoituksessa, jos käytetään negatiivista takaisinkytkentää. Mallintamisella voidaan kuitenkin saavuttaa merkittävä etu. [9]

Negatiivinen takaisinkytkentä on altis häiriöille, joten se ei aina sovellu prosessin ainoaksi säädinrakenteeksi. Kun prosessiin vaikuttaa mikä tahansa häiriö, se näkyy prosessin ulostulossa ennen kuin säädin ehtii siihen reagoimaan. Häiriöt saattavat pahimmassa tapauksessa tehdä prosessin epästabiiliksi. [9] Erityisesti jos mittauksen ja prosessin välillä on viivettä, epästabiiliusriski kasvaa.

2.3.3 Myötäkytkentä

Myötäkytkennän päätarkoitus on eliminoida mitattavissa olevien häiriöiden vaikutus ennen kuin ne näkyvät prosessin ulostulossa. Jotta myötäkytkennästä on hyötyä, häiriöiden täytyy olla mitattavissa. Myöskään ohjauksen vaikutus säädettävään suureeseen ei saa olla merkittävästi hitaampi kuin häiriöiden vaikutus. [10] Myötäkytkentä ei havaitse prosessin muuttujaa, vaan se keskittyy pelkästään mitattavissa olevien häiriöiden kompensoimiseen. Kompensoitavien häiriöiden suuruudet mitataan ja niiden vaikutukset prosessimuuttujaan ennustetaan laskennallisesti. Myötäkytkennän ennaltaehkäisevä vaikutus lisätään prosessia ohjaavan säätimen ulostuloon eli ohjaukseen, jolloin myötäkytkennän vaikutus kohdistuu prosessiin lähes samaan aikaan kuin häiriö. [11] Ideaalitulanteessa myötäkytkentä poistaa häiriön vaikutuksen prosessin vasteesta kokonaan. Kuva 7 havainnollistaa myötäkytkennän rakennetta.



Kuva 7. Myötäkyytkennän ja negatiivisen takaisinkytkennän muodostama säätörakenne. (muokattu lähteestä [11])

Myötäkyytkentää käytetään harvoin pelkästään prosessin säätämässä, koska se vaatii hyvin tarkan mallin häiriön käyttäytymisestä, jotta häiriön saa kokonaan kompensoitua pois. Pelkällä myötäkyytkennällä prosessin säätöön jää helposti säätövirhe. Prosessiin saattaa vaikuttaa myös mittaamattomia häiriöitä, jotka näkyvät pelkästään prosessin ulostulossa. Edellisistä syistä johtuen myötäkyytkennän kanssa käytetään tavallisesti jotain toista säätörakennetta poistamaan säätövirhe. [11]

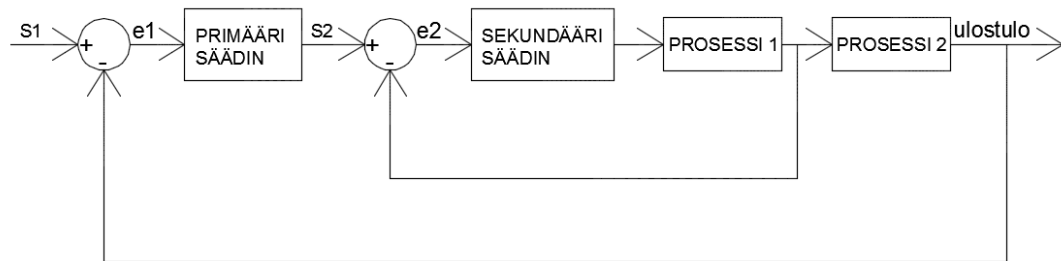
Myötäkyytkentä vaatii tavallisesti useita prosessiin vaikuttavia mittauksia, jolloin lisämittausten asentaminen järjestelmään voi olla kallista ja säätörakenteesta voi tulla hyvin monimutkainen. [11] Ennen kuin myötäkyytkennän lisää järjestelmän säätörakenteeksi, tulee pohtia, onko lisääminen kannattavaa pitkällä aikavälillä. Jos myötäkyytkennästä saatava hyöty on pieni verrattuna kustannuksiin, sen lisääminen ei välttämättä ole kannattavaa. Toisaalta, jos tarvittavat mittaukset ovat järjestelmässä valmiina, myötäkyytkennän lisääminen kannattaa, jos sillä saadaan parannettua ulostulon vastetta.

2.3.4 Kaskadisäätö

Kaskadisäädön päätarkoitus on myötäkyytkennän tavoin eliminoida häiriöiden vaikutus ennen kuin ne ehtivät näkyä prosessin vasteessa. Kaskadisäädin eliminoi häiriöt apusäätimen avulla. Apusäätimen tarkoitus on toimia huomattavasti nopeammin kuin pääsäädin ja lyhyemmällä viiveellä. Apusäädin on vastuussa prosessin ohjaamisesta, mutta pääsäädin ohjaa apusäädintä. Pääsäätimen tehtävä on muuttaa apusäätimen käyttämää asetusrvoa niin, että prosessin säädettävä muuttuja asettuu haluttuun tilaan. [9]

Kaskadisäätöä voidaan käyttää, kun prosessista on mitattavissa useampia muuttujia, mutta vain yhtä muuttujaa säädetään. Kaskadisäätö on hyödyllinen, jos prosessissa on pitkä viive tai aikavakio ohjausmuuttujan ja säädettävän suureen välillä. Tavallisesti

kaskadisäädin koostuu kahdesta sisäkkäisestä piiristä, mutta niitä voi olla useampikin. Kaskadisäätimen apusäätöpiirejä kutsutaan sekundääripiireiksi ja pääsäätöpiiriä primääripiiriksi. Sekundäärisäätimiksi valitaan usein P- tai PD-säädin. Joissain tapauksissa integroinnista voi olla hyötyä, jolloin valitaan PI-säädin. PI-säädin kompensoi häiriön tehokkaimmin etenkin, jos eliminointava häiriö on matalataajuisia. Integroiva sekundäärisäädin voi kuitenkin aiheuttaa primäärisäätimen vasteessa ylitystä, jonka vuoksi sitä ei aina kannata käyttää. Jos sekundääripiirin säädössä voidaan käyttää suurta vahvistuskerrointa, integroivaa säädintä ei tarvita. Sekundäärisäätimen tehtävä on poistaa nopeiden häiriöiden vaikutus, jolloin pelkkä P-säädin riittää, jos vahvistus asetetaan tarpeeksi korkeaksi. Hitaat häiriöt kompensoidaan primäärisäätimellä, joka sisältää integroinnin. [17, s. 2-19] Kuvassa 8 havainnollistetaan kaskadisäädön rakennetta.



Kuva 8. Kaskadisäädön perusrakenne. (muokattu lähteestä [17, s. 3])

Kuvassa 8 S1 tarkoittaa primäärisäätimen asetusarvoa ja e1 erosuuretta. S2 tarkoittaa sekundäärisäätimen asetusarvoa ja e2 erosuuretta. Prosessi 1 tarkoittaa sekundääripiirin ja prosessi 2 primääripiirin säädettävää kohdetta. Kytkenän tarkoituksena on, että prosessi 1 säädetään sekundäärisäätimen avulla nopeasti tavoitearvoon. Jos prosessin 1 ulostuloon tulee häiriö, sekundäärisäädin säätää sen vaikutuksen pois ennen kuin häiriö ehtii vaikuttaa prosessin 2 ulostuloon merkittävästi. Prosessi 2 on kytkenässä pääprosessi, jonka ulostulo pyritään säätämään tavoitearvoon. Prosessin 2 ulostuloa mitataan ja sen avulla primäärisäädin korjaa sekundäärisäätimen asetusarvoa.

Esimerkki käyttökohteesta, jossa kaskadisäätöä voidaan hyödyntää tehokkaasti, on lämmönsiirtimen säätäminen. Säädettävä muuttuja on lämmönsiirtimestä poistuvan veden lämpötila. Lämmönsiirtimessä vettä lämmitetään höyryn avulla ja höyryä ohjataan höyryventtiilillä lämmönsiirtimeen. Höyryventtiiliä ohjataan virtaussäädöllä, jotta höyryn virtaus pysyisi asetusarvossa. Virtaussäätö toimii esimerkissä sekundäärisäätönä. Primäärisäädin säätää ulostulon lämpötilan erosuureen avulla virtaussäätimen asetusarvoa. Jos höyryn virtauksessa esiintyy häiriö, virtaussäätö kompensoi häiriön ennen kuin prosessin ulostulon lämpötila ehtii olennaisesti muuttua häiriön vaikutuksesta. [9]

Kaskadisäädin täytyy virittää oikeassa järjestyksessä. Ensin primääripiiri kytketään automaattiohjaukselta käsiohjaukselle ja sen jälkeen viritetään sekundääripiiri.

Seuraavaksi viritetään primääripiiri ja sekundääripiiri pidetään automaattiohjauksella. Sekundääripiiri on viritettävä ylikriittiseksi tai maksimissaan kriittiseksi, jotta sen vaste ei värähtelisi. Jos sekundääripiirin ulostulon vaste värähtelee, se vähentää primääripiirin virittämisen pelivaraa. [17, s. 21]

Jos kaskadisäätimen käyttöönottoa ei tehdä oikeassa järjestyksessä, prosessin toiminnassa saattaa esiintyä kytkentätransientti, joka häiritsee prosessin toimintaa. Oikea järjestys on:

1. Sekundääri- ja primäärisäädin kytketään käsiohjaukselle.
2. Sekundäärisäätimen paikallinen asetusarvo asetetaan samaksi kuin säätimelle tulevan mittauksen arvo.
3. Sekundäärisäädin kytketään automaattiohjaukselle paikallinen asetusarvo valittuna.
4. Primäärisäätimen asetusarvo asetetaan yhtä suureksi kuin primäärisäätimen mittauksen arvo ja lähtö asetetaan yhtä suureksi kuin sekundäärisäätimen asetusarvo.
5. Sekundäärisäätimen asetusarvo vaihdetaan paikallisesta tilasta kaskaditilaan.
6. Primäärisäädin kytketään automaattiohjaukselle. [17, s. 24]

2.4 Kaukolämpöverkon matemaattinen mallintaminen

Luvussa käsitellään, miksi systeemejä mallinnetaan, miten mallinnus voidaan toteuttaa ja millaisia malleja AP:n kaukolämpöverkon säädöissä voidaan hyödyntää.

2.4.1 Mallintamisen periaate

Tutkittavia systeemejä mallinnetaan matemaattisesti, jotta systeemien dynamiikkojen käyttäytymistä ymmärrettäisiin paremmin ajan ja erilaisten sisäänmenosignaalien suhteen. Kun systeemin malli tunnetaan, voidaan ennustaa, miten systeemin sisäänmeno vaikuttaa ulostuloon. Mallin tunteminen auttaa systeemin säätöjen suunnittelussa, koska silloin voidaan laskennallisesti tutkia, miten erilaiset säätötoteutukset toimivat, ja valita paras toteutustapa. [20, 3-1] Mallien muodostamisessa on huomioitava, että malli ei koskaan ole absoluuttisen tarkka kopio oikeasta systeemistä, vaan se on approksimaatio. Riittävän tarkalla mallilla voidaan kuitenkin ennustaa, miten systeemi käyttäytyy.

Differentiaaliyhtälöiden muodostaminen on yksi käytetyimmistä tavoista mallintaa systeemien dynamiikkoja. Niiden avulla voidaan kuvata, miten systeemin muuttujat ja niiden derivaatat vaikuttavat systeemin sisäänmenon ja ulostulon suhteeseen. [20, 2-1] Teollisuuden prosessien mallintamisessa hyödynnetään fysiikan ilmiöitä sekä luonnonlakeja, joita on tutkittu paljon ja niistä on aineistoa helposti saatavana.

Mallia, jossa hyödynnetään systeemin tunnettuja riippuvuussuhteita, kutsutaan white box -malliksi. Riippuvuussuhteita ei aina tunneta, jolloin white box -mallia ei pystytä

muodostamaan. Jos mallinnettavan systeemin sisäänmenon ja ulostulon mittausdatat ovat saatavissa, niiden avulla voidaan identifioimalla määrittää systeemin malli. Tällaista menetelmää kutsutaan black box -mallintamiseksi. Joissain tapauksissa voidaan hyödyntää sekä white box- että black box -mallintamista, jolloin menetelmää kutsutaan gray box -mallintamiseksi. [21]

Systeemit voivat olla joko lineaarisia tai epälineaarisia. Lineaarisen systeemin dynamiikka käyttäytyy samalla tavalla toimintapisteestä riippumatta. Jos lineaarinen systeemi on stabiili jossain sen toimintapisteessä, se on stabiili kaikissa sen toimintapisteissä. Epälineaarisen systeemin dynamiikka voi muuttua, kun siirrytään toimintapisteestä toiseen, minkä vuoksi se voi olla stabiili jossain sen toimintapisteessä, mutta epästabiili toisessa pisteessä. [22]. Näiden syiden perusteella lineaariset systeemit ovat huomattavasti helpompia analysoida ja säätää kuin epälineaariset systeemit.

Systeemi on lineaarinen, jos seuraavat kaksi ehtoa ovat voimassa:

1. Jos u_1 aiheuttaa vasteen y_1 ja u_2 aiheuttaa vasteen y_2 , silloin $u_1 + u_2$ aiheuttaa vasteen $y_1 + y_2$.
 2. Jos u aiheuttaa vasteen y , silloin $k * u$ aiheuttaa vasteen $k * y$, jos k on vakio.
- [23]

Epälineaarinen systeemi voidaan linearisoida mihin tahansa systeemin toimintapisteeseen, jolloin systeemi käyttäytyy linearisoidun mallin tavoin kyseisessä pisteessä. Jos systeemi on voimakkaasti epälineaarinen, linearisoitu malli toimii hyvin vain lähellä linearisoitua toimintapistettä. Epälineaarinen funktio linearisoidaan johonkin toimintapisteeseen asettamalla siihen tangentti, joka sivuaa epälineaarista funktiota. [23]

Käytetään esimerkkinä funktiota

$$f(x) = x^2 + 1, \tag{12}$$

jonka derivaattafunktio on

$$f'(x) = 2x. \tag{13}$$

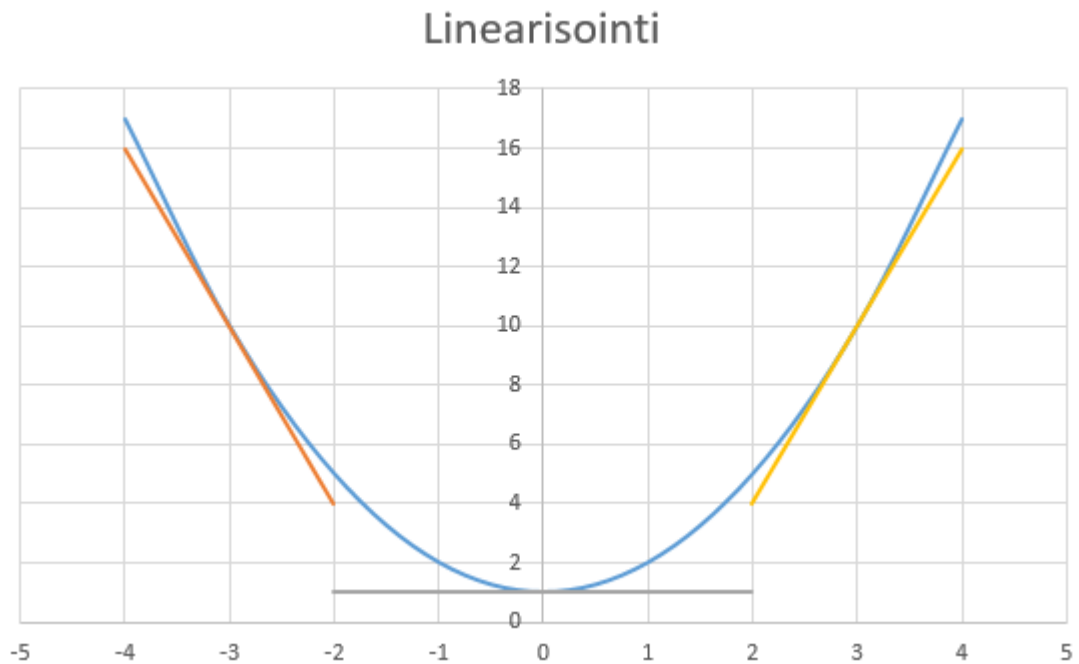
Tangentti on suora ja on muotoa

$$y = kx + c, \tag{14}$$

missä k on tangentin kulmakerroin ja c vakiotermi. Kun linearisointi tehdään pisteeseen $x = a$, tangentin kulmakerroin lasketaan kaavalla

$$k = f'(a) = 2a. \tag{15}$$

Kuvassa 9 esitetään, miten kaavan (12) funktio on linearisoitu pisteissä $x = -3$, $x = 0$ ja $x = 3$.



Kuva 9. Funktio $f(x) = x^2 + 1$ linearisoituna kolmeen pisteeseen.

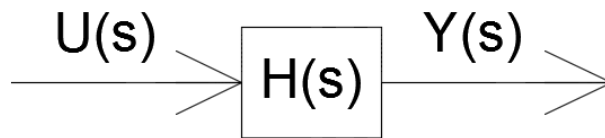
Kuvasta 9 nähdään, että linearisoinnit kuvaavat alkuperäistä epälineaarista funktiota hyvin vain linearisoitavien toimintapisteiden läheisyydessä. Epälineaarisisissa systeemeissä pätee sama asia. Jos halutaan mallintaa epälineaarinen systeemi hyvin koko toiminta-alueella, joudutaan linearisoimaan systeemi riittävän useaan toimintapisteeseen.

2.4.2 Siirtofunktio

Lineaarinen systeemi voidaan mallintaa myös siirtofunktiolla, joka kuvaa systeemin dynamiikkaa taajuustasossa. Taajuustason analysoinnin avulla voidaan selvittää, miten systeemin ulostulo käyttäytyy, kun sen sisäänmenosignaaleiksi syötetään sinimuotoisia tai eksponentiaalisia funktioita. Siirtofunktio määritellään kaavalla

$$H(s) = \frac{Y(s)}{U(s)}, \quad (16)$$

missä $Y(s)$ on ulostulon ja $U(s)$ sisäänmenon Laplace-muunnos [22]. Siirtofunktio voidaan muodostaa minkä vain kahden signaalin välille. Siirtofunktiomalleja kuvataan yleensä lohkokaavioiden avulla, jolloin signaalien väliset suhteet ja vuorovaikutukset on helpompi hahmottaa. Kuvassa 10 on havainnollistettu kaavan (16) siirtofunktiomallia lohkokaaaviona.



Kuva 10. Siirtofunktiomallin lohkokaaavioesitys.

Kuvassa 10 siirtofunktio $H(s)$ muokkaa herätteestä $U(s)$ vasteen $Y(s)$. Siirtofunktio kuvaa esimerkiksi prosessin, säätimen, anturin, venttiilin tai häiriön vaikutusta tarkasteltavaan signaaliin.

Siirtofunktiot kuvaavat systeemin käyttäytymistä yleensä helpommin kuin differentiaaliyhtälöt, sillä siirtofunktioissa ei ole derivaattoja tai integraaleja, jotka ovat vaikeita hahmottaa. Siirtofunktioissa on vain yhteen-, vähennys-, jako- ja kertolaskuja. [24] Laplace-muunnos lasketaan aikariippuvasta funktiosta kaavalla

$$F(s) = L\{f(t)\} = \int_0^{\infty} f(t)e^{-st} dt, \quad (17)$$

missä $f(t)$ on aikariippuva funktio, e on Neperin luku ja s on kompleksimuuttuja. Laplace-muunnoksen laskeminen kaavasta (17) on yleensä työlästä, jonka vuoksi valmiita muunnoksia on koottu taulukoihin. [24] Esimerkiksi kaavan (8) PID-säätimen siirtofunktio on

$$H_{PID}(s) = K_p + \frac{K_I}{s} + K_D s. \quad [19, s.11] \quad (18)$$

Suurin osa teollisuuden systeemeistä on epälineaarisia, mutta niitä voidaan mallintaa ensimmäisen tai toisen kertaluvun viiveellisillä malleilla. Ensimmäisen kertaluvun malli siirtofunktiomuodossa esitetään kaavalla

$$H(s) = \frac{Ke^{-Tds}}{Ts+1}, \quad (19)$$

missä K on systeemin vahvistus, Td on systeemin viive, T on systeemin aikavakio ja s on kompleksimuuttuja. Toisen kertaluvun siirtofunktiomalli esitetään kaavalla

$$H(s) = \frac{Ke^{-Tds}}{(T_1s+1)(T_2s+1)}, \quad (20)$$

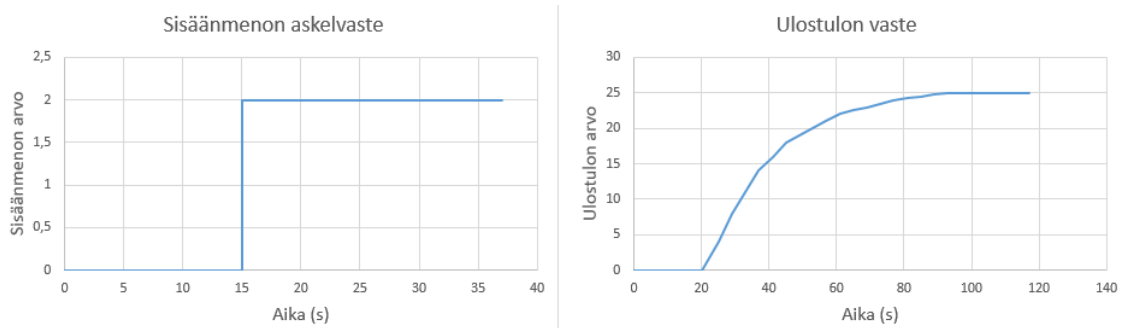
missä T_1 ja T_2 ovat systeemin aikavakiot. [25, s. 487] Ensimmäisen ja toisen kertaluvun mallien suurin ero on, ettei ensimmäisen kertaluvun mallin vaste koskaan värähtele.

Jos systeemi käyttäytyy ensimmäisen kertaluvun mallin mukaan, sen siirtofunktio voidaan muodostaa kaavan (19) avulla. Systeemin vahvistus, aikavakio ja viive voidaan arvioida askelvastekokeen avulla, jossa systeemin sisäänmeno ja ulostulo mitataan. Systeemin sisäänmenoon tehdään kokeessa jonkin suuruinen muutos, jonka jälkeen

ulostulon vaste muuttuu systeemin dynamiikan mukaisesti. Systeemin vahvistus saadaan laskettua ulostulon ja sisäänmenon muutosten suhteesta kaavalla

$$K = \frac{\Delta Y}{\Delta U}, \quad (21)$$

missä ΔY on ulostulon ja ΔU sisäänmenon muutos [26]. Aikavakio kuvaa, kuinka nopeasti systeemin ulostulon vaste muuttuu, kun sisäänmenoon tehdään askelmuutos. Aikavakio määritellään ajalla, mikä ulostulon vasteella kestää, että se on muuttunut 63,2 % kokonaisuutuksesta ΔY . Aikavakion laskeminen alkaa hetkestä, jolloin ulostulon vaste alkaa reagoida askelmuutokseen ja loppuu, kun muutoksen suuruus on $0,632\Delta Y$. Viive on aika, mikä ulostulon vasteella kestää ennen kuin se reagoi askelmuutokseen. Viiveestä käytetään myös nimitystä kuollut aika. [26] Kuvassa 11 on esimerkki askelkokeesta, jonka perusteella voidaan määrittää systeemin ensimmäisen kertaluvun malli.



Kuva 11. Ulostulon dynamiikka sisäänmenon funktiona.

Kuvan 11 tapauksessa sisäänmenon muutos $\Delta U = 2$ ja ulostulon muutos $\Delta Y = 25$. Systeemin vahvistus kaavan (21) mukaan on 12,5. Sisäänmenon askelmuutos tapahtuu ajan hetkellä 15s. Ulostulo alkaa reagoida askelmuutokseen ajan hetkellä 20 sekuntia, joten systeemin viive on 5 sekuntia. Ulostulon muutoksesta 63,2 % on 15,8. Ulostulo saavuttaa tämän arvon suunnilleen 41 sekunnin kohdalla, jolloin aikavakio $T = 41s - 20s = 21s$. Kuvan 11 systeemi voidaan kaavan (19) avulla esittää siirtofunktiona $H(s) = \frac{12,5e^{-5s}}{21s+1}$.

Prosessidataan perustuva black box -mallintaminen on huomattavasti helpompaa kuin fysikaalisiin ilmiöihin perustuva white box -mallintaminen. Black box -mallintamisessa ei tarvitse muodostaa vaikeita differentiaaliyhtälöitä eikä Laplace-muunnoksia, jotta saadaan muodostettua tutkittavan kohteen siirtofunktio malli. Prosessidataa ei kuitenkaan aina ole saatavissa tai mallinnettavan kohteen dynamiikka käyttäytyy useamman kertaluvun siirtofunktion tavoin, jolloin riittävän tarkan mallin luominen black box -mallintamisella on hankalaa. Tällöin white box -mallintaminen voi olla parempi vaihtoehto. White box -mallintaminen on hyvä vaihtoehto myös tilanteissa, joissa systeemiin vaikuttavat fysikaaliset ilmiöt tunnetaan.

2.4.3 Menoveden lämpötilan mallintaminen

AP:n kaukolämpöverkon menoveden lämpötilaa säädetään höyrylämmönsiirtimen avulla. Höyrylämmönsiirtimen sisällä on putkisto, jonka läpi virtaa tulistettu höyry. Putkiston ympärillä virtaa lämmitettävä vesi. Höyry lauhtuu putkistossa nesteeksi ja vapauttaa samalla suuren määrän lämpöenergiaa lämmitettävään veteen, jolloin veden lämpötila kasvaa. Lämmönsiirtimestä ulostulevan veden lämpötila riippuu lämmönsiirtimen hyötysuhteesta, höyryn virtausmäärästä ja entalpian muutoksesta sekä lämmitettävän veden virtausmäärästä, lämpötilasta ja ominaislämpökapasiteetista [9]. Jos hyötysuhde jätetään huomioimatta, lämmönsiirtimestä lähtevän veden lämpötila noudattaa kaavaa

$$T_{out} = \frac{F_h \Delta H}{F_v C_p} + T_{in}, \quad (22)$$

missä F_h on höyryn virtausmäärä, ΔH on höyryn entalpian muutos, F_v on lämmitettävän veden virtausmäärä, C_p on veden ominaislämpökapasiteetti ja T_{in} on lämmönsiirtimeen tulevan veden lämpötila [9]. Kaava (22) ei huomioi, miten kauan veden lämmitykseen menee aikaa, jolloin se ei kuvaa lämmönsiirtimen dynamiikkaa kovinkaan tarkasti. Tarkemman dynamiikan selvittämiseksi tehdään ramppivastekokeita, jotka esitetään luvussa 3. Dynamiikka on helpompi selvittää askel- kuin ramppivastekokeilla, mutta testattaviin toimilaitteisiin ei haluttu liian nopeita asentomuutoksia, jonka vuoksi testeissä päädyttiin ramppivastekokeisiin.

Kaava (22) osoittaa, että lämpötilan muutos on suoraan verrannollinen säädettävään muuttujaan eli höyryn virtausmäärään ja kääntäen verrannollinen lämmitettävän veden virtausmäärään. Tästä voidaan päätellä, että lämmönsiirtimen vahvistus on kääntäen verrannollinen veden virtausmäärään, jolloin pienillä virtausmäärillä lämpötilan muutos on suurempi kuin suuremmilla virtausmäärillä. Pienellä veden virtausmäärällä menee pidempi aika, että lämmitettävä vesi virtaa höyrylämmönsiirtimen läpi. Tästä johtuen myös lämmönsiirtimen aikavakio on kääntäen verrannollinen veden virtausmäärään. Lämpötilamittauksessa esiintyy myös viivettä, koska lämmitetyllä vedellä kestää virtausnopeudesta ja lämpötila-anturin sijainnista riippuen jokin aika ennen kuin se saavuttaa anturin. Mittausviiveen pituus on myös kääntäen verrannollinen virtausmäärään.

2.4.4 Keskipakopumpun paine-eron mallintaminen

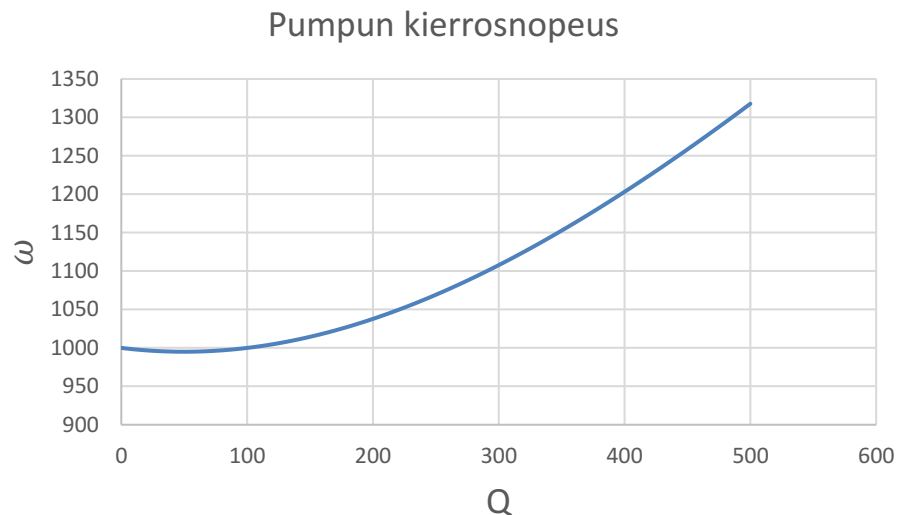
AP:n kaukolämpöverkon menoveden paine säädetään keskipakopumpun avulla. Pumpun tuottama tilavuusvirtaus, sekä tulo- ja lähtöpuolen paine-ero riippuu pumpun kierrosnopeudesta. Pumpun kierrosnopeuden ollessa vakio sen paine-ero kasvaa, kun tilavuusvirtaus pienenee. Keskipakopumppujen dynamiikka voidaan approksimoida kaavalla

$$\Delta p = a\omega^2 + b\omega Q + cQ^2, \quad (23)$$

missä Δp on pumpun paine-ero, ω on kierrosnopeus, Q on tilavuusvirtaus sekä a , b ja c ovat vakiokertoimia. Vakiokertoimet riippuvat pumpun tyypistä ja ominaisuuksista. Ne voidaan määrittää prosessidatasta identifioimalla, mikäli riittävät askelvastekokeet on toteutettu. [15, s. 570] Kerroin c on negatiivinen, sillä paine-ero pienenee tilavuusvirtauksen kasvaessa. Kaavasta (23) voidaan ratkaista kierrosnopeus toisen asteen yhtälön ratkaisukaavan avulla, jolloin saadaan

$$\omega = \frac{-bQ \pm \sqrt{(bQ)^2 - 4a(cQ^2 - \Delta p)}}{2a}. \quad (24)$$

Kaavan (24) ratkaisusta hyväksytään vain positiivinen, sillä kierrosnopeus ei voi olla negatiivinen. Kun pumpun paine-ero pidetään vakiona ja tilavuusvirtaus muuttuu, pumpun kierrosnopeutta kasvatetaan kuvan 12 tavalla.



Kuva 12. Keskipakopumpun kierrosnopeus tilavuusvirtauksen funktiona paine-eron ollessa vakio.

Kuvan 12 käyrä noudattaa kaavaa (24), missä kertoimet $a = 0,25$, $b = 0,1$ ja $c = -1$ sekä paine-ero on 250000. Kuvan 12 muuttujilla ei ole yksiköitä eikä niitä ole skaalattu, sillä käyrän tarkoitus on havainnollistaa pumpun kierrosnopeuden ja tilavuusvirtauksen riippuvuutta toisistaan. Muuttujien skaalaus ei vaikuta käyrän muotoon. Kertoimet a , b ja c on valittu sen perusteella, että kuvan 12 käyrä muistuttaisi keskipakopumpun vastaavaa ominaiskäyrää.

Jos pumpun paine-ero on vakio, tarpeeksi suurella tilavuusvirtauksella sen muutos on lähes suoraan verrannollinen kierrosnopeuden muutokseen. Muutosten välistä suhdetta voidaan approksimoida kaavalla

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2}, \quad (25)$$

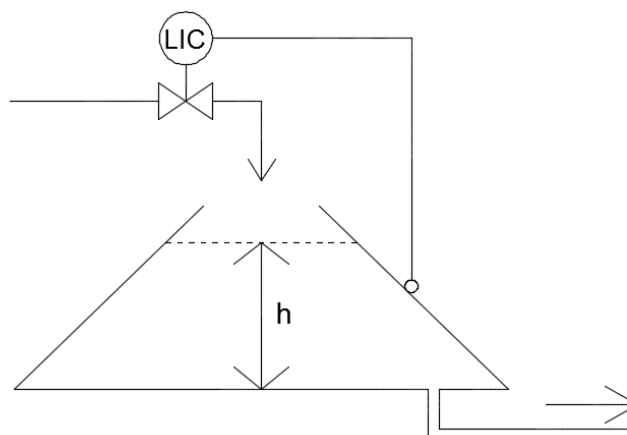
missä Q_1 ja Q_2 ovat pumpun tuottamia tilavuusvirtauksia ajan hetkillä t_1 ja t_2 sekä ω_1 ja ω_2 ovat pumpun kierrosnopeudet ajan hetkillä t_1 ja t_2 . [28, s. 5709] Mitä suurempi pumpun tuottama tilavuusvirtaus on, sen tarkempi kaavan (25) approksimaatio on. Kaavan (25) suhde on havaittavissa myös kuvasta 12, kun suurilla tilavuusvirtauksilla kierrosnopeus kasvaa lähes lineaarisesti tilavuusvirtauksen funktiona.

Kaukolämpöverkon paine voidaan säätää pumpun paine-eron avulla. Kun pumpun tuottama tilavuusvirtaus mitataan, voidaan mittauksen ja kaavan (25) avulla ennustaa, miten pumpun kierrosnopeutta täytyy muuttaa, jotta paine-ero pysyy lähellä vakiota. Tilavuusvirtausmittausta voidaan hyödyntää kaukolämpöverkon painesäädössä myötäkytken avulla.

2.5 Gain Scheduling -säätö

Gain scheduling -säätöä käytetään sellaisten systeemien säätämisessä, joissa systeemin dynamiikka vaihtelee yhden tai useamman muuttujan funktiona. Näitä muuttujia kutsutaan skedulointimuuttujiksi. Jos systeemin säädin on viritetty toimivaksi jollekin toiminta-alueelle, se ei välttämättä toimi, kun systeemin dynamiikka muuttuu. Gain scheduling -säädön avulla myös säätimen viritys vaihtuu skedulointimuuttujan funktiona, jolloin säätö toimii koko systeemin toiminta-alueella, vaikka dynamiikka muuttuisi. [29]

Gain skedulointi tarkkailee skedulointimuuttujan tilaa ja päivittää säätimen parametreja sen mukaan [29]. Säätimen parametrien päivitys voidaan toteuttaa jatkuvasti, eli muuttamalla parametreja koko ajan, kun skedulointimuuttujan tila vaihtuu. Päivitys voidaan toteuttaa myös taulukon avulla, josta järjestelmä lukee säätimen parametrit sen mukaan, millä arvovälillä skedulointimuuttuja on. Kuvassa 13 on esimerkki systeemistä, jossa Gain scheduling -säädöstä olisi hyötyä.



Kuva 13. Säiliön pinnankorkeuden säätö.

Kuvan 13 säiliön pinnankorkeus h muuttuu epälineaarisesti. Mitä korkeammalla pinnankorkeus on, sen nopeammin se muuttuu, kun virtaus pysyy vakiona. Jos venttiili on säädetty toimimaan hyvin pinnankorkeuden ollessa tankin puolessa välissä, säätö on liian hidas tankin ollessa lähes tyhjä ja liian nopea sen ollessa lähes täysi. Kuvan 13 systeemin Gain scheduling -säädessä pinnankorkeus olisi skedulointimuuttuja, jonka funktiona venttiilin säätimen parametrit virittäytyisivät, jolloin säätö toimisi pinnankorkeudesta riippumatta.

3. KAUKOLÄMPÖVERKON ENERGIATEHOKKUUDEN PARANTAMINEN

Tässä luvussa käsitellään, minkälainen AP:n kaukolämpöverkosto on ollut ennen projektin aloittamista ja miten se muuttuu projektin aikana. Luvussa käsiteltäviä asioita ovat kaukolämpöverkoston rakenne, säätörakenteet ja -menetelmät sekä ajotavat. Tavoitteena on, että kaukolämpöverkoston energiatehokkuutta parannetaan edellä mainittuja asioita kehittämällä.

3.1 AP:n kaukolämpöverkosto

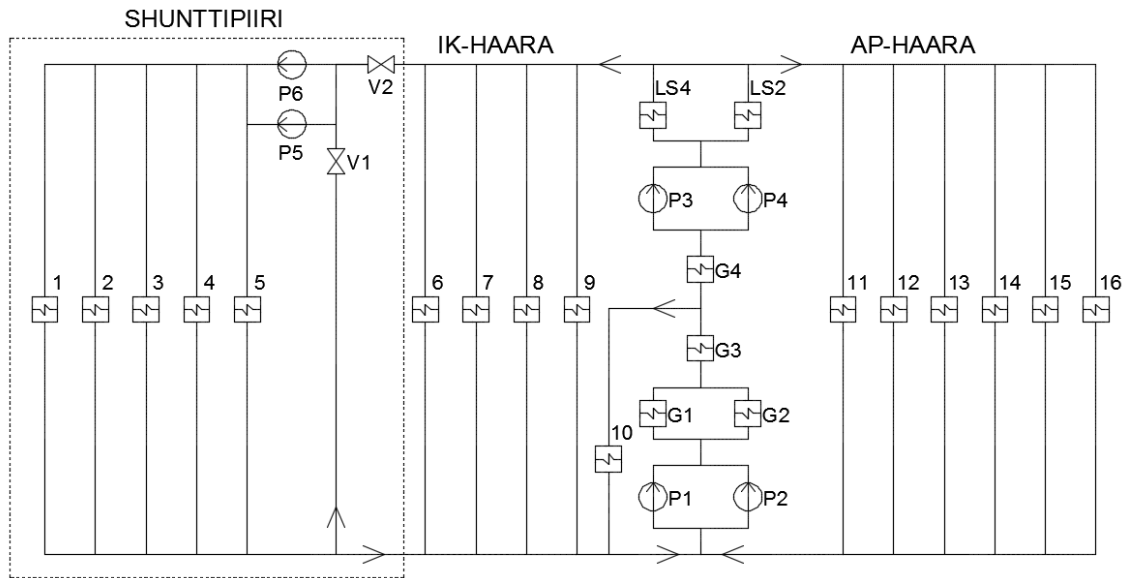
AP:n kaukolämpöverkosto koostuu kahdesta erillisestä kaukolämpöpiiristä, joilla on eri käyttökohteet. Piirejä kutsutaan TMP- ja PGW-piireiksi. TMP-piirissä (Thermomechanical pulp) on vuodenajasta, ulkoilman lämpötilasta ja AP:n prosessien hukkalämmön talteenottotehosta riippuen vaihtelevasti ylimääräistä energiaa, jota pyritään hyödyntämään PGW-piirissä (Pressure Groundwood).

Tässä projektissa asennetaan TMP- ja PGW-piirien välille lämmönsiirrin, jonka avulla TMP-piirin ylimääräinen energia voidaan siirtää PGW-piiriin. Lämmönsiirtoa voidaan tehdä myös toiseen suuntaan, jos PGW-piirissä on ylimääräistä energiaa ja sen lämpötila on korkeampi kuin TMP-piiriin. Piirien välisen lämmönsiirtimen lisääminen aiheuttaa säätötoimenpiteitä, joissa täytyy huomioida myös TMP-piirin mittauksia. Piirien välisen lämmönsiirtimen avulla saadaan ylimääräistä energiaa hyödynnettyä tehokkaammin, jolloin AP:n kaukolämpöverkon energiatehokkuus paranee.

Tässä työssä esitetään, miten TMP- ja PGW-piirin välinen lämmönsiirto toteutetaan kytkentöjen, säätöjen ja ajotapojen osalta. Muuten työssä käsitellään pelkästään PGW-piirin kehittämistä.

3.1.1 Alkuperäinen rakenne

PGW-piiri on kaukolämpöverkko, jolla lämmitetään AP:n ja IK:n prosessivesiä ja -tiloja, valvomoita, toimistoja sekä Anjalankosken ja Inkeröisen asuinalueita. PGW-piiri koostuu kahdesta osasta, jotka on nimetty IK- ja AP-haaroiksi. Piirin kuuma menovesi hajaantuu kahdeksi virtaukseksi, joista toinen virtaa IK:n ja toinen AP:n suuntaan. Kuvassa 14 on esitetty PGW-piirin rakenne pääpiirteittäin ennen projektia. Rakenne on yksinkertaistettu PI-kaavion pohjalta.



Kuva 14. PGW-piirin yksinkertaistettu PI-kaavio ennen projektia.

Kuvan 14 numerot 1-16 esittävät PGW-piirin kuluttajia, P1-P6 pumppuja, G1-G4 lämmöntalteenottimia ja LS2 sekä LS4 höyrylämmönsiirtimiä. Katkoviivalla rajoitettu alue on nimetty shunttipiiriksi, joka kuuluu IK-haaraan. Shunttipiiriin pumppujen P5 ja P6 tarkoitus on pitää piirin paine riittävän korkeana. Vain toinen pumpuista käy kerrallaan toisen ollessa varapumppuna. Venttiilien V1 ja V2 tehtävä on säätää shunttipiirin lämpötila sopivaksi.

Pumppujen P1 ja P2 tarkoitus on pumpata kaukolämpöverkon paluuvesi takaisin lämmöntalteenoton läpi pumppuille P3 ja P4. Pumput P1 ja P2 käyvät samaan aikaan. Ne ovat tehoiltaan saman suuruiset, joten niitä ajetaan samalla nopeusohjeella. Pumput P3 ja P4 ovat tehoiltaan saman suuruisia, mutta vain toinen pumpuista käy kerrallaan toisen ollessa varapumppuna. Niiden tarkoitus on pumpata lämmöntalteenotolla esilämmitetty menovesi höyrylämmönsiirtimien LS4 ja LS2 kautta IK- ja AP-haaroihin. Pumppujen P1, P2, P3 ja P4 tavoite on säätää menoveden paine sopivaksi. LS2 ja LS4 höyrylämmönsiirtimillä menovesi säädetään lopulliseen tavoitelämpötilaan, joka on erikseen asetettu IK- ja AP-haaroille. Shunttipiiriin lämpötilan ja menoveden paineen sekä lämpötilan säädöt esitetään tarkemmin luvussa 3.2.

Taulukossa 1 on lueteltu PGW-piirin kuluttajat ja niiden ryhmänumerot. Ryhmänumerot on määritelty numeroilla 1-16 vastaamaan kuvan 14 tilannetta. Samaan ryhmään kuuluvat kuluttajat sijaitsevat fyysisesti lähellä toisiaan kaukolämpöverkossa. Kuluttajia on oikeasti enemmän kuin 16, mutta projektin kannalta ei ole oleellista huomioida kaikkia yksilökohtaisesti, vaan suurempina kokonaisuuksina.

Taulukko 1. PGW-kaukolämpöpiirin kuluttajat.

Kuluttaja	Ryhmänro
Jätevesiasema	16
Sahan kuorimo	16
PK2 sähkötila	15
AP:n toimistot	15
AP:n korjaamot	15
Pastakeittiö	14
PK2 suihkuvesi	14
PK2 O-vesi	14
Kemikaaliosasto	13
Hiomo prosessivedet	12
Hiomo rakennuslämmitys	11
Kuorimo rakennuslämmitys	11
HV:n lisäveden lämmitys	10
Telahiomo	9
LS3	8
Kuljetusvälinekorjaamo	7
Asuinrakennukset	6
IK (JK)	5
IK (MK)	4
Inkeröisen taajama	3
IK rakennukset	2
IK massaosasto	2
Anjalan maatalousoppilaitos	1

Taulukon 1 kuluttajista ryhmät 8 ja 6 ovat merkittävimmät tekijät kaukolämpöverkon vaatimuksissa, joista kerrotaan tarkemmin luvussa 3.1.2. Kuvan 14 pumppujen P1-P6, lämmöntalteenottimien G1-G4, venttiilien V1 sekä V2 ja höyrylämmönsiirtimien LS2 sekä LS4 positiotunnukset ja sijainnit on lueteltu taulukossa 2.

Taulukko 2. PGW-kaukolämpöpiirin tärkeimmät pumput, lämmönsiirtimet ja venttiilit

Laite	Positio	Sijainti
P1	42-P111	Hiomo
P2	42-P112	Hiomo
P3	12-P264	Höyryvoimalaitos
P4	12-P265	Höyryvoimalaitos
P5	12-P266	IK
P6	12-P261	IK
G1	42-G820	Hiomo
G2	42-G821	Hiomo
G3	42-H202	Hiomo
G4	LS5	Kombivoimalaitos
V1	12-TV-9073.2	IK
V2	12-TV-9073.1	IK
LS2	12-H362	Höyryvoimalaitos
LS4	LS4	Höyryvoimalaitos

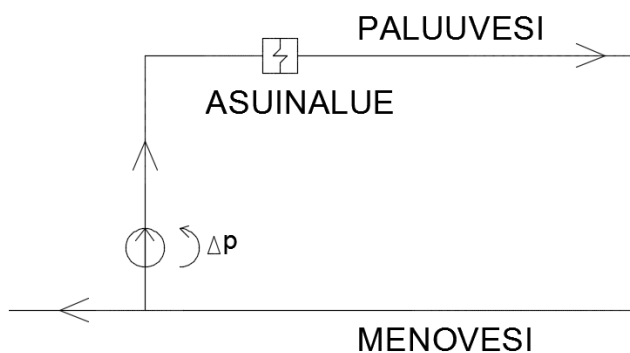
Alkuperäisen PGW-piirin rakenteen suurin heikkous energiatehokkuuden kannalta on IK- ja AP-haarojen yhteinen menovesiputki. Lämpötilan säätäminen kummallekin haaralle sopivaksi on haastavaa, sillä osa LS2:n ja LS4:n avulla lämmitetystä vedestä sekoittuu menovesiputkessa, jolloin kummankin haaran veden lämpötilat häiriintyvät. Yhteisen putken takia menoveden painetta ei myöskään voida säätää kummallekin haaralle erikseen, koska paine-ero pyrkii tasaantumaan putken sisällä. PGW-piirin energiatehokkuus on huono, koska AP-haara toimisi huomattavasti pienemmällä paineella ja matalammalla lämpötilalla kuin IK-haara. Tässä projektissa IK- ja AP-haarojen menovesilinjat eriytetään toisistaan, jolloin molempien haarojen lämpötila ja paine voidaan säätää erikseen. Eriyttäminen esitetään tarkemmin luvussa 3.1.3.

3.1.2 Kaukolämpöverkon kuluttajien asettamat vaatimukset

PGW-piiriä on ajettu ennen tätä projektia seuraavilla asetuksilla:

1. Menoveden paine 5,8 bar
2. LS4 jälkeinen lämpötilatavoite IK-haaralle ulkoilmalämpötilafunktiosta $f1$
3. Shunttipiirin lämpötilatavoite ulkoilmalämpötilafunktiosta $f2$
4. LS2 jälkeinen lämpötilatavoite AP-haaralle ulkoilmalämpötilafunktiosta $f3$

Menoveden paine on korkea, koska AP:n ja IK:n välisen asuinalueen (taulukko 1 ryhmä 6) lämmitys kaukolämpövedellä ei onnistu, jos paine on liian matala. Syy tähän esitetään kuvan 15 avulla.

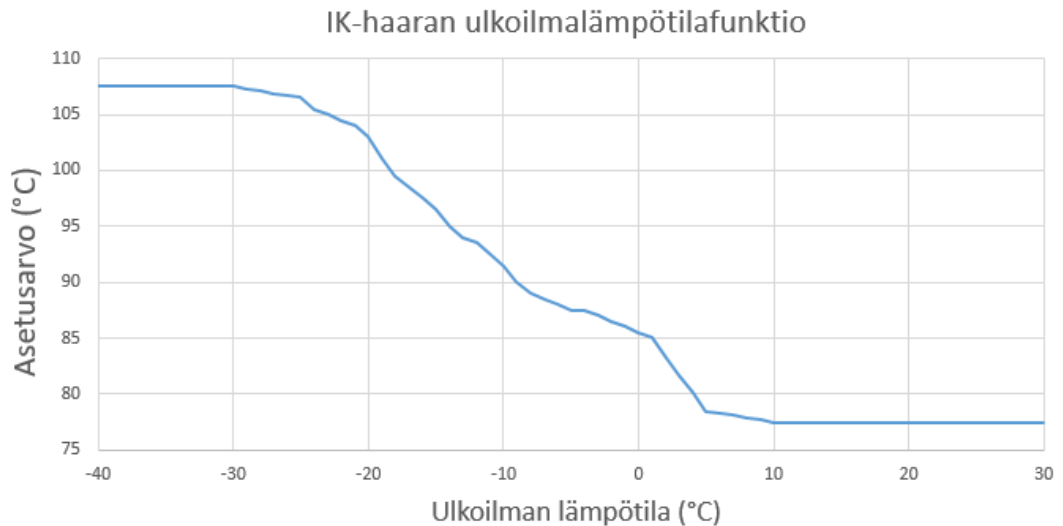


Kuva 15. Asuinalueen kytkentä PGW-kaukolämpöverkkoon.

Kuvan 15 esittämän asuinalueen lämmönjakokeskus on huomattavasti korkeammalla tasolla kuin menovesilinja, jolloin hydrostaattisen paine-eron takia asuinalueen paine on selvästi matalampi kuin menovesilinjassa. Kuvan 15 pumpun avulla paine voidaan nostaa tarpeeksi suureksi asuinalueelle, jos imupuolen paine on tarpeeksi korkea. Pumpun maksimiteho rajoittaa riittävän tilavuusvirtauksen tuottamisen asuinalueelle, jos pumpun imupaine on liian matala. Tästä syystä menoveden paineen on oltava riittävän korkea. Aiempiin kokemuksiin perustuen 5,8 bar on osoittautunut sopivaksi painetasoksi menovedelle, jolloin riittävä lämpöenergia on pystytty siirtämään asuinalueelle. Kaikki

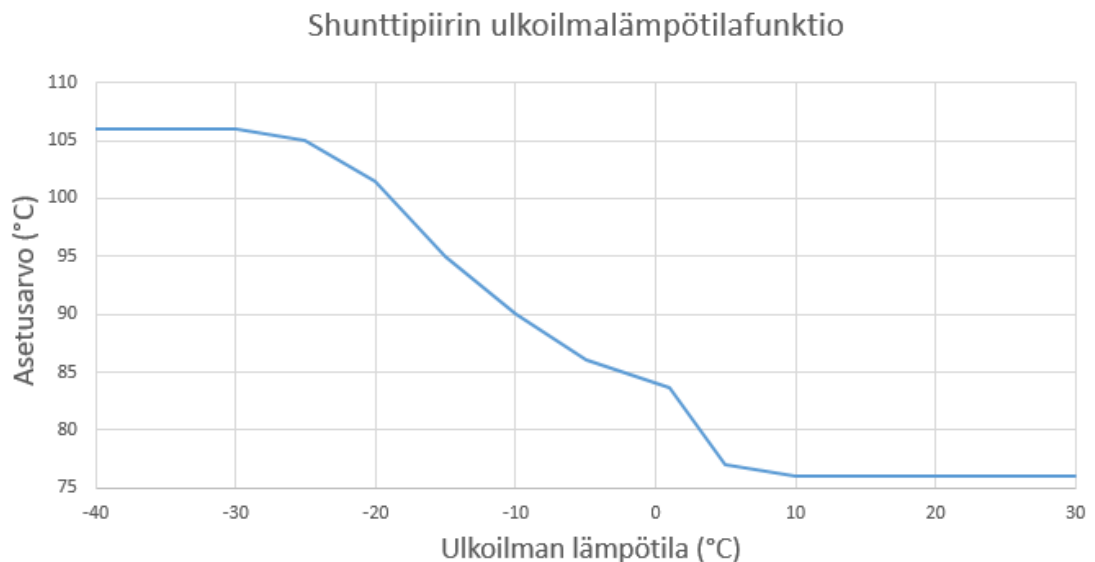
muut PGW-piirin kuluttajat pystyisivät hyödyntämään kaukolämpöverkkoa pienemmälläkin paineella. Menoveden linja on yhteinen kaikille kuluttajille, jolloin kriittisin kuluttaja määrittelee toimintavaatimukset.

IK-haaran menoveden lämpötila säädetään ulkolämpötilafunktion $f1$ avulla. Lämpötilasäädin saa asetusarvon funktiosta, jonka muuttuja on ulkoilman lämpötila ja tuloksena asetusarvo. Funktio $f1$ esitetään kuvassa 16.



Kuva 16. IK-haaran lämpötilasäädön asetusarvofunktio.

IK-haarassa sijaitsevan shunttipiirin lämpötila säädetään ulkoilmalämpötilafunktion $f2$ avulla, joka esitetään kuvassa 17.



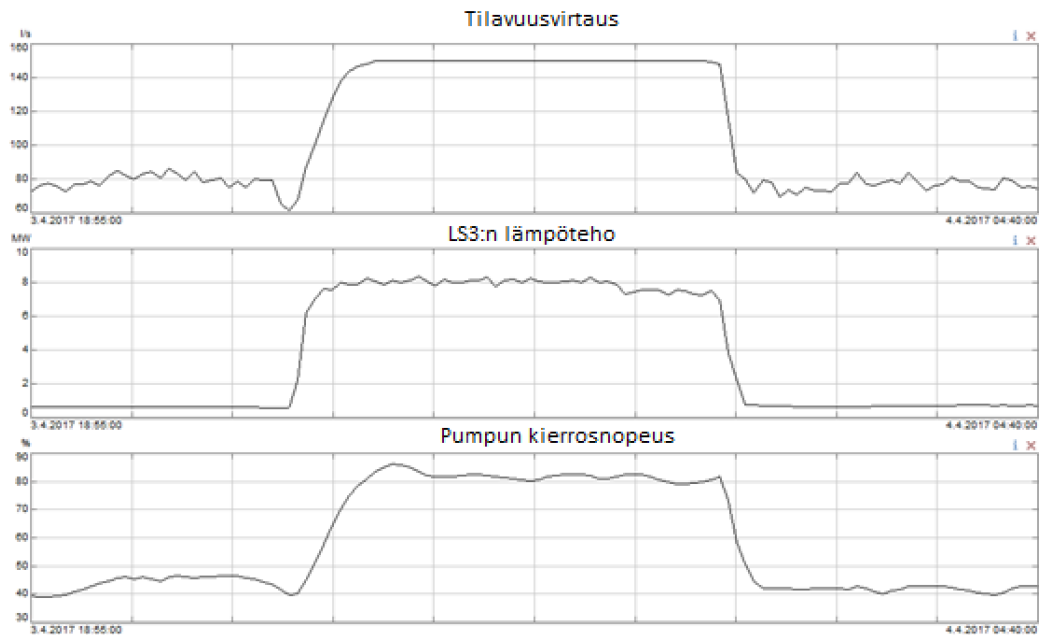
Kuva 17. Shunttipiirin lämpötilasäädön asetusarvofunktio.

IK-haaran osalta menoveden lämpötila on sopiva, jos shunttipiirin lämpötila on riittävä ja kuvassa 15 esitetty asuinalue saa riittävän lämpöenergian. Kuvista 16 ja 17 huomataan,

että IK-haaran tavoitelämpötila on hieman korkeampi kuin shunttipiirin. Välimatka IK-haaran alkupisteestä shunttipiirille on pitkä, jolloin matkan aikana menoveden lämpötila putoaa hieman lämpöhäviöiden takia. Toinen syy IK-haaran korkeampaan lämpötilaan on se, että asuinalue vaatii ajoittain korkeamman lämpötilan kuin shunttipiiri. Shunttipiirissä kiertävän menoveden lämpötila säädetään sopivaksi kuvan 14 venttiilien V1 ja V2 avulla. Shunttipiirin säätö esitetään tarkemmin luvussa 3.2.3.

IK-haaran menoveden lämpötilaa on aikaisempina vuosina pidetty huomattavasti korkeampana kuin kuvassa 16, jolloin riittävän lämpöenergian saanti on varmistettu kaikille kuluttajille kaiken aikaa. Kun kaukolämpöverkon energiatehokkuuteen alettiin kiinnittämään enemmän huomiota, IK-haaran menoveden lämpötilaa alennettiin. Lämpötilan alentaminen on aiheuttanut satunnaisesti ongelmia lämpöenergian siirtämisessä riittävän tehokkaasti. Suurin syy siihen on LS3-lämmönsiirtimen (taulukko 1 ryhmä 8) vaatima ajoittainen suuri lämmitysteho.

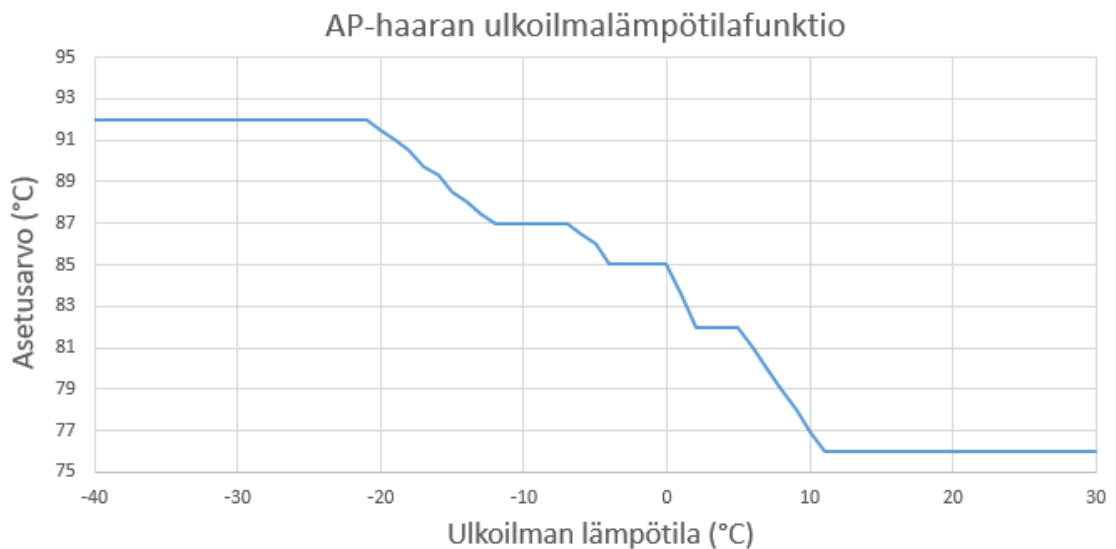
Kymijoesta pumpattu tuorevesi lämmitetään riittävään lämpötilaan LS3:n avulla, jotta sitä voidaan hyödyntää tehdasvesien valmistamisiin. Tuorevesi esilämmitetään savukaasupesurilla, joka toimii lämmöntalteenottimena. Esilämmityksen jälkeen tuorevesi lämmitetään lopulliseen tavoitelämpötilaan LS3:n avulla. Jos savukaasupesurin lämmöntalteenotto teho esimerkiksi likaantumisen takia pienentyy, LS3 ottaa menetetyn tehon PGW-piiristä. Pahimmillaan LS3 käyttää niin suurta lämmitystehoa, että PGW-piirin pääpumppu (kuva 14 P3 tai P4) toimii lähellä maksimipyörimisnopeuttaan. Kuva 18 havainnollistaa edellä mainittua tilannetta, jossa on käytetty järjestelmän mittausdataa hyväksi.



Kuva 18. LS3:n lämpötehon vaikutus IK-haaran paluuvirtaukseen ja pääpumpun P264 pyörimisnopeuteen.

Kuvassa 18 ylimmäinen kuvaaja on IK-haaran tilavuusvirtaus, keskimäinen on LS3:n käyttämä lämpöteho ja alimmainen on PGW-piirin pääpumpun nopeusohje pyörimisnopeudelle. Nopeusohjeen maksimi on 100 %. Kuvasta 18 huomataan, että LS3:n ottama teho PGW-piiristä kasvaa nopeasti, minkä seurauksena IK-haaran tilavuusvirtaus kasvaa, mikä voidaan osoittaa myös kaavalla (2). Kasvava virtaus pienentää menoveden painetta, johon PGW-piirin pääpumppu reagoi kasvattamalla kierrosnopeutta.

AP-haaran menoveden lämpötila säädetään ulkolämpötilafunktion f_3 avulla, joka esitetään kuvassa 19.



Kuva 19. AP-haaran lämpötilasäädön asetusrarvofunktio.

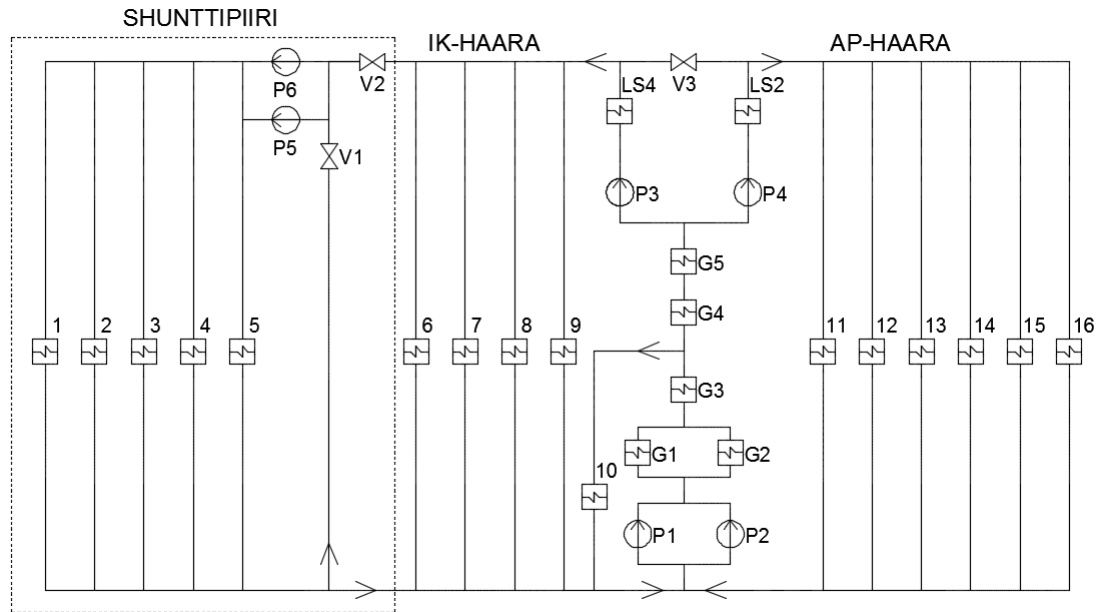
Kuvia 19 ja 16 vertailemalla huomataan, että AP-haaran tavoitelämpötila on huomattavasti matalampi kuin IK-haaralla. Ennen tätä projektia AP-haara on toiminut lähes kokonaan IK-haaran ehdoilla yhteisen menolinjan takia, vaikka AP-haara toimisi pienemmälläkin paineella ja lämpötilalla.

3.1.3 Muutoksen jälkeinen rakenne

Eriyttämällä IK- ja AP-haarat toisistaan voidaan kummallekin haaralle asettaa omat toimintavaatimukset, jolloin erityisesti AP-haaran energiatehokkuutta saadaan parannettua merkittävästi. Suurin syy siihen on, että AP-haaran menoveden lämpötilaa ja painetta voidaan alentaa verrattuna alkuperäiseen tilanteeseen. Projektin lähtötilanteessa pääpumppulla pumpattiin sekä IK- että AP-haaroihin, jolloin pumpun kierrosnopeus ja sen läpi virtaavan veden määrä olivat suuria. Eriyttämisen jälkeen molemmille haaroille otetaan käyttöön omat pääpumput, jolloin pääpumppujen kierrosnopeus pienenee alkuperäiseen tilanteeseen verrattuna. Myös IK-haaran energiatehokkuus paranee, koska

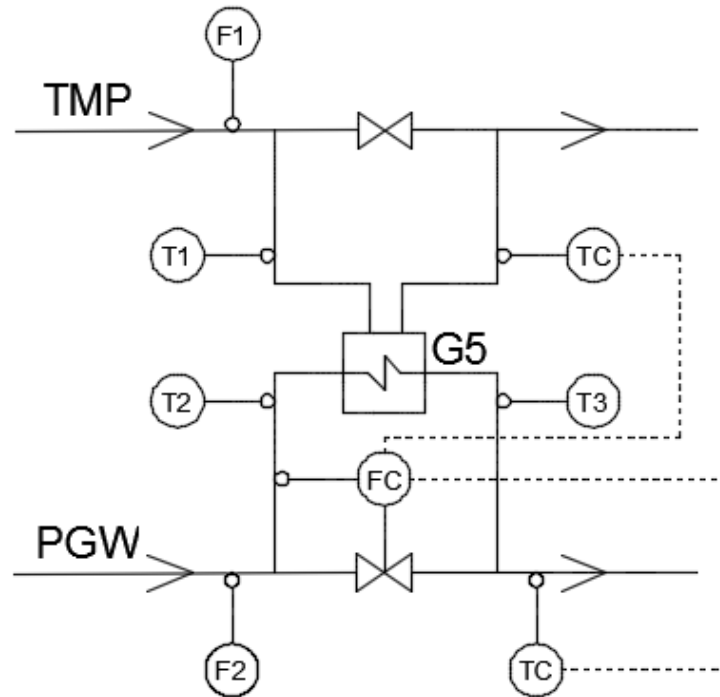
sen pääpumpulla on enemmän varaa nostaa kierrosnopeutta, jolloin menoveden lämpötilaa voidaan pudottaa lähemmäs shunttipiirin vaatimuksia.

PGW-piirin muutoksessa AP- ja IK-haarojen eriyttämisen lisäksi piiriin lisätään uusi lämmönsiirrin, jonka avulla siirretään ylimääräistä lämpöä PGW- ja TMP-piirien välillä. Lämmönsiirrin lisätään höyryvoimalaitoksessa PGW-piiriin ennen pääpumppuja. PGW-piirin rakenne muutoksen jälkeen esitetään kuvassa 20.



Kuva 20. PGW-piirin yksinkertaistettu PI-kaavio muutoksen jälkeen.

Kuvassa 20 G5 on uusi lämmönsiirrin, jolla siirretään lämpöä TMP- ja PGW-piirien välillä. Venttiili V3 on varoventtiili, joka on normaalisti kiinni ja se voidaan avata, jos pumppu P3 tai P4 hajoaa. Jos venttiili V3 avataan, palataan alkuperäiseen kaukolämpöverkon rakenteeseen. Uusi lämmönsiirrin kytketään TMP- ja PGW-piirien välille kuvan 21 esittämän PI-kaavio mukaisesti.



Kuva 21. TMP- ja PGW- piirien välisen lämmönsiirtimen kytkentä PI-kaaviona.

Kuvan 21 kytkennässä on tarkoitus, että kaikki TMP-piirissä kiertävä vesi kierrätetään lämmönsiirtimen G5 kautta. TMP-puolen venttiili on varoventtiili, joka aukeaa, jos TMP-puolen paine nousee liikaa. PGW-puolen säätöventtiilin tarkoitus on tarvittaessa kuristaa venttiilin läpivirtausta, jolloin osa vedestä virtaa lämmönsiirtimen läpi. Kun lämmönsiirtimen läpi virtaa vesi sekä TMP- että PGW-piiristä, lämpöä siirtyy lämpimämmästä vedestä viileämpään veteen. Lämpötilamittauksia T1, T2, T3 ja TC sekä virtausmittauksia F1, F2 ja FC hyödynnetään virtauksen säädössä. Tarkempi säätömenetelmä esitetään luvussa 3.3.

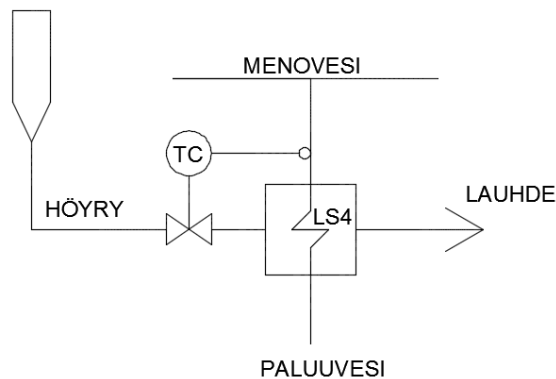
3.2 AP:n kaukolämpöverkoston säätäminen

AP:n kaukolämpöverkon säätöjen kehittäminen alkuperäisiä paremmiksi on yksi projektin tavoitteista. Kun säädöt toimivat paremmin, menoveden tavoitelämpötilaa ja -painetta on mahdollista alentaa, jolloin kaukolämpöverkon energiatehokkuus paranee. Mitä lähempänä säädettävä suure pysyy asetusarvoa, sen paremmin säätö toimii. Säätöjen tulee toimia myös niin, etteivät toimilaitteet rikkoudu liian nopeiden ohjausmuutosten takia.

Tässä luvussa käsitellään, miten PGW-piiriä on säädetty ennen projektia, ja miten säädöt ovat toimineet. Sen jälkeen esitetään parannetut säätömenetelmät, niiden viritykset ja simulointitulokset, joiden pohjalta säädöt asennetaan järjestelmään.

3.2.1 Alkuperäisen PGW-piirin lämpötilasäätö

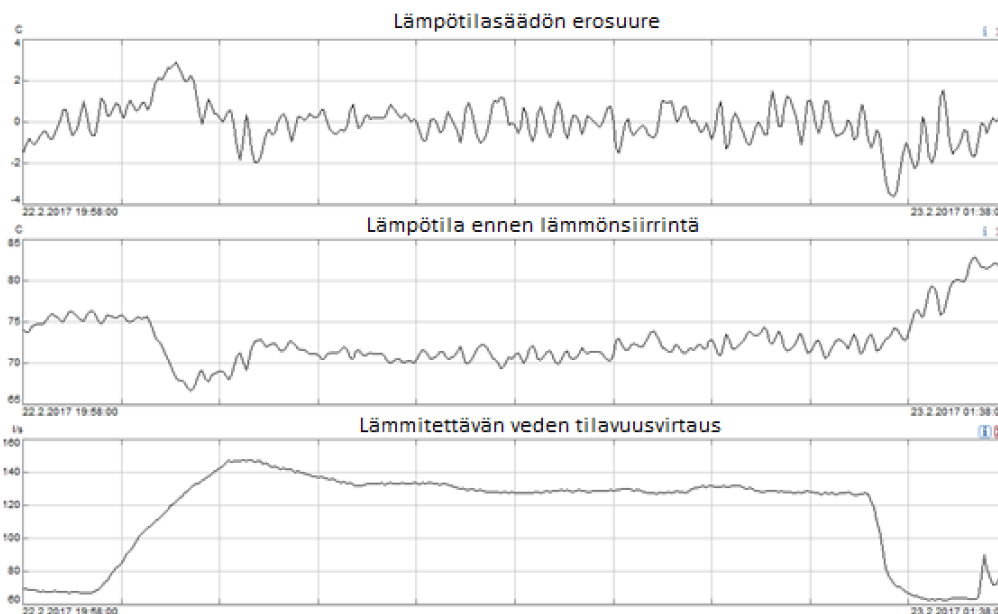
PGW-piirin menoveden lämpötila säädetään LS2 ja LS4 hörylämmönsiirtimien avulla. Kuten kuvat 14 ja 20 osoittavat, LS4:n avulla lämmitetään IK-haaran ja LS2:n avulla AP-haaran menovesi. Kaikki menovesi virtaa hörylämmönsiirtimien läpi. Jos menoveden lämpötila on matalampi kuin tavoitearvo, hörylämmönsiirtimen läpi ohjataan tulistettua höyryä, jolla lämmitetään menovettä. Tulistetun höryyn lämpötila on kylläistä höyryä korkeampi, jolloin sen lämpötilan on ensin pudottava kylläisen höryyn tasolle ennen lauhdumista [30]. Tulistetun höryyn entalpia on kylläistä höyryä korkeampi. Ennen tätä projektia IK-haaran menoveden lämpötila on säädetty kuvan 22 esittämällä tavalla.



Kuva 22. IK-haaran menoveden lämpötilasäätö ennen projektia.

Kuvan 22 säätörakenne esittää negatiivista takaisinkytkentää. Säädetävä suure on menoveden lämpötila ja ohjattava toimilaite on höyryventtiili. Höyryventtiiliä ohjataan PI-säätimellä, jonka ohjaus perustuu hörylämmönsiirtimen jälkeisen menoveden lämpötilan erosuureeseen. Sekä IK- että AP-haaran lämpötila on säädetty samalla tavalla. Kummankin haaran lämpötilasäädössä on käytetty PI-säätimen parametreina vahvistusta $K_p = 1$ ja integrointiaikaa $T_i = 100$.

IK-haaran lämpötilasäädön toimivuus esitetään kuvassa 23. Kuvassa esitetään säädetävän lämpötilan erosuure, lämmitettävän veden tilavuusvirtaus sekä hörylämmönsiirtimelle tulevan veden lämpötila. Kuva 23 havainnollistaa, miten tilavuusvirtauksen ja lämmitettävän veden lämpötilan muutokset häiritsevät lämpötilan säätämistä.

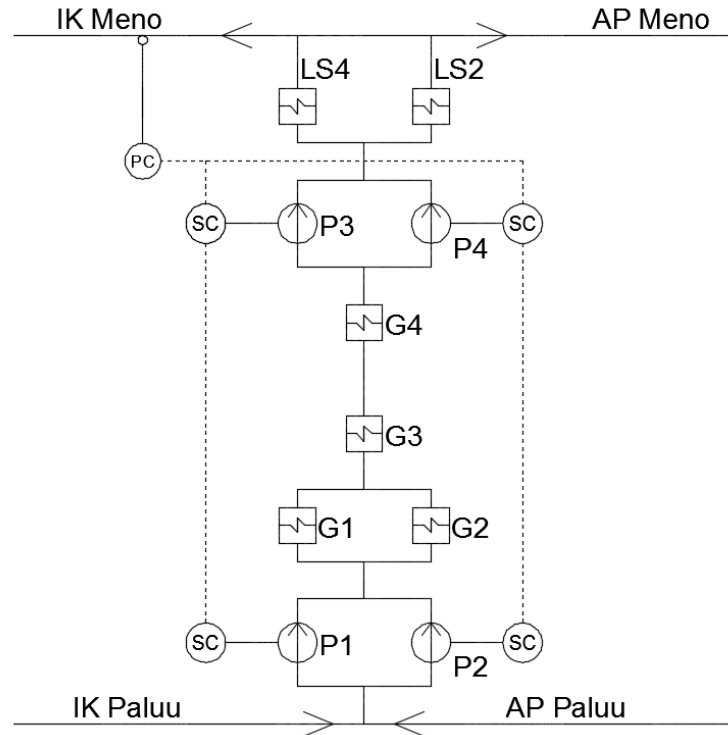


Kuva 23. IK-haaran lämpötilasäädön erosuure, lämmitettävän veden lämpötila ja höyrylämmönsiirtimeen tilavuusvirtaus.

Kuvasta 23 voidaan päätellä, että tilavuusvirtauksen ollessa lähes vakio, erosuure vaihtelee lähes samaan tahtiin kuin lämmitettävän veden lämpötila, mutta käänteisesti. Kuvasta huomataan myös, että tilavuusvirtauksen pienentyessä erosuure pienenee. Erosuure on lämpötilatavoitteen ja mitatun lämpötilan erotus. Kuvan 23 havainnot tukevat kaavan (22) väittämää, sillä erosuure kasvaa silloin kun mitattu lämpötila pienenee. Jos kaukolämpöveden lämpötilaa säädetään pelkällä negatiivisella takaisinkytkennällä, lämmitettävän veden lämpötila- sekä tilavuusvirtausvaihtelu häiritsevät säätöä niin voimakkaasti, ettei säätö toimi hyvin. Myös höyryn syötössä voi esiintyä häiriöitä, esimerkiksi höyrynpaineen vaihteluiden takia. Negatiivinen takaisinkytkentä ei toimi ainoana säätörakenteena tässä tilanteessa, koska häiriöt ehtivät vaikuttaa ulostuloon ennen kuin säädin tekee korjaavat toimenpiteet.

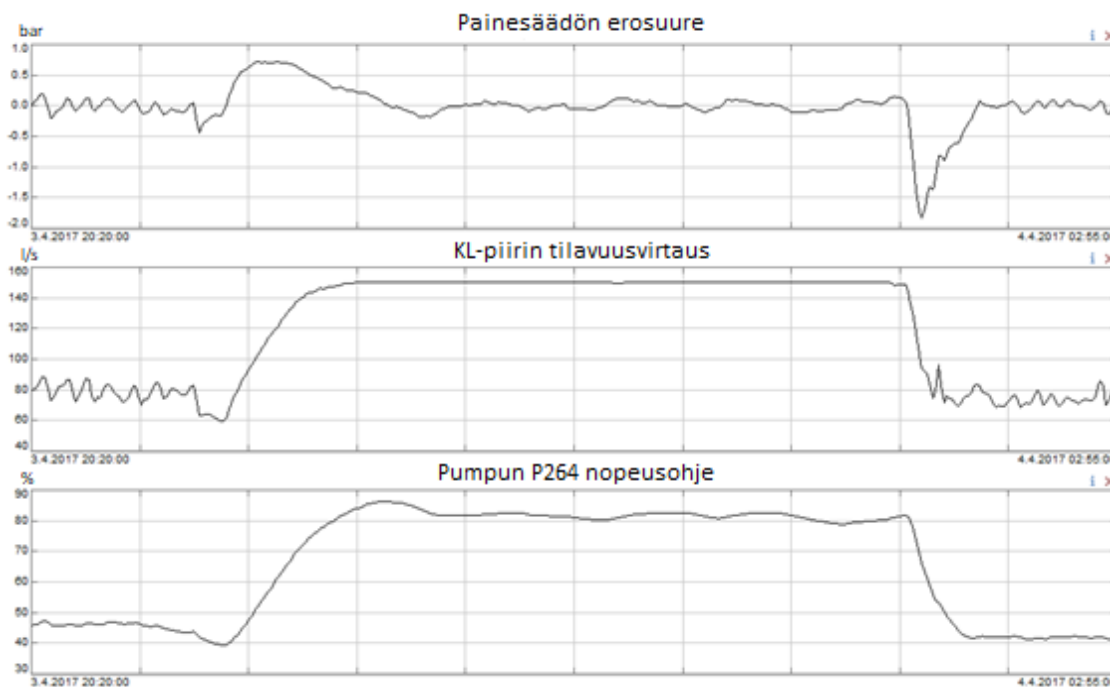
3.2.2 Alkuperäisen PGW-piirin painesäätö

PGW-piirin painetta on säädetty kuvan 14 pumppuilla P1-P4. Säätö on toteutettu negatiivisella takaisinkytkennällä. Säädessä on käytetty IK-haaran menoveden paineen mittausta, jonka avulla pumppujen kierrosnopeutta on ohjattu. Kasvattamalla pumppujen kierrosnopeutta myös paine kasvaa. Pumppujen kierrosnopeutta on säädetty PI-säätimellä, joka on paineen erosuureeseen perustuen säätänyt pumppuille nopeusohjeen, jonka mukaan pumppujen kierrosnopeudet määräytyvät. Säätimen ulostulo eli nopeusohje on jaettu jakosuhteen avulla pumppuille P1-P4 siten, että pumppupari P1 ja P2 on käyttänyt 56 % säätimen nopeusohjeesta ja pumppupari P3 ja P4 44 %. Jakosuhte oli valittu painesäädön toimivuuden perusteella. Käyttökokemusten perusteella oli huomattu, että säätö oli toiminut parhaiten 56 % jakosuhteella. Kuvassa 24 esitetään alkuperäisen PGW-piirin painesäätö PI-kaaviona.



Kuva 24. PGW-piirin painesäätö ennen projektia.

Kuvassa 24 pumppujen P1-P4 pyörimisnopeuksia säädetään painesäädön avulla. Kuten luvussa 3.1.1 mainittiin, pumput P1 ja P2 pyörivät samaan aikaan, mutta pumpuista P3 ja P4 vain toinen pyörii kerrallaan toisen ollessa varapumppuna. Kaavan (23) mukaan pumpun paine-ero johtuu kierrosnopeuden lisäksi myös tilavuusvirtauksesta. Kuvan 24 mukainen painesäätö ei reagoi tilavuusvirran muutoksiin riittävän nopeasti, jolloin virtauksen muuttuessa myös paine muuttuu. Kuvassa 25 havainnollistetaan, miten muuttuva tilavuusvirtaus häiritsee painesäätöä.



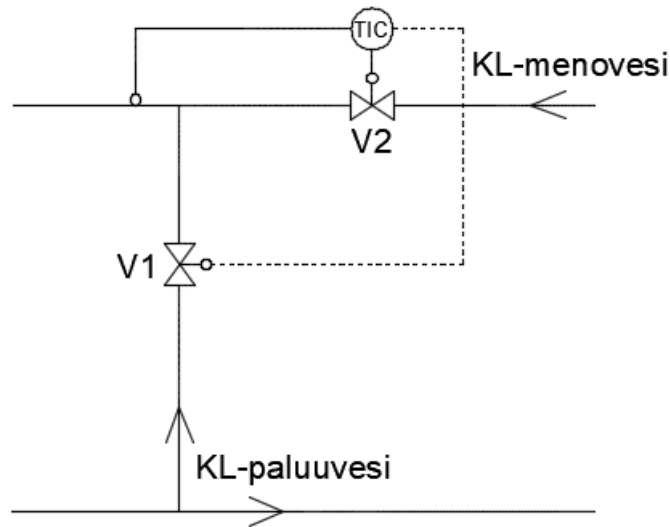
Kuva 25. PGW-piirin painesäädön eroisuure, pumppujen tilavuusvirtaus ja pääpumpun nopeusohje.

Kuvasta 25 huomataan, että painesäädön eroisuure muuttuu lähes samaan aikaan kuin tilavuusvirtaus. Pelkkä negatiivinen takaisinkytkentä ei riitä kompensoimaan tilavuusvirtauksen muutoksen vaikutusta paineeseen tarpeeksi nopeasti. Painesäädössä on käytetty PI-säätimen parametreina vahvistusta $K_p = 0,35$ ja integrointiaikaa $T_i = 100$. Pienestä vahvistuksesta ja suuresta integrointiajasta johtuen PI-säädin ohjaa pumppujen kierrosnopeutta liian hitaasti, jotta tilavuusvirtauksen muutos kompensoituisi. Säädin on viritetty hitaaksi, jotta säätö ei aiheuttaisi värähtelyä paineeseen.

Kuvasta 25 voidaan myös päätellä, että jos paluuvirtaus kasvaa nopeasti, painesäädön eroisuure kasvaa, mikä tarkoittaa mitatun paineen putoamista. Jos paine putoaa liikaa, kaukolämpöverkon lämmönsiirtoteho heikentyy.

3.2.3 Shunttipiirin lämpötilasäätö

Shunttipiirin lämpötila on säädetty kuvan 14 venttiileillä V1 ja V2. Säätörakenteena on käytetty negatiivista takaisinkytkentää, jossa venttiilejä on ohjattu veden lämpötilan perusteella. Shunttipiirin vanha säätötapa esitetään kuvassa 26.



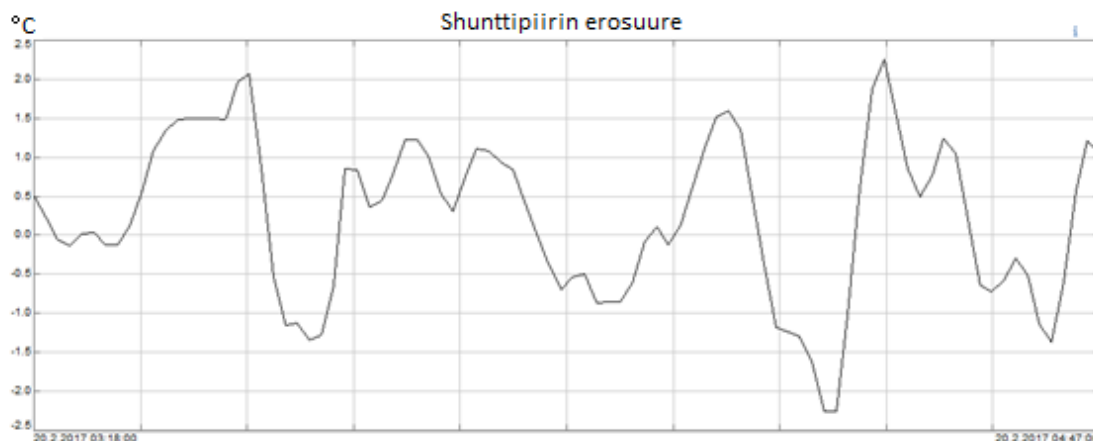
Kuva 26. Shunttipiirin lämpötilasäätö ennen projektia.

Kuvan 26 shunttipiirin venttiileitä on säädetty shunttipiirin lämpötilan erosuureen perusteella. Säätimen asetusarvo on määritelty kuvan 17 ulkolämpötilafunktion avulla. Erosuureen ollessa positiivinen mitattu lämpötila on pienempi kuin asetusarvo. Positiivisella erosuureella säädin on ohjannut venttiiliä V2 enemmän auki ja venttiiliä V1 enemmän kiinni. Negatiivisella erosuureella ohjaus toimii toisin päin. Venttiilin V2 läpi virtaa kuuma menovesi ja venttiilissä V1 viileämpi shunttipiirissä kiertänyt paluuvesi. Venttiileiden ohjaukset on toteutettu siten, että venttiilien asentotietojen summa on aina 100 %. Venttiileiden asentojen maksimi- ja minimiarvot ovat olleet 88 % ja 12 %.

Shunttipiirin lämpötilasäädön tavoite on ollut rajoittaa koko PGW-piirin tilavuusvirtausta ja vähentää lämpöhäviöitä. Kun osa paluvedestä kierrätetään uudestaan shunttipiirissä, saadaan shunttipiirin lämpötilaa alennettua, jolloin lämpöhäviöt pienenevät.

Shunttipiirin PI-säätimen vahvistuskerroin on ollut $K_p = 0,3$ ja integrointiaika $T_i = 80s$. Mittausviive venttiililtä lämpötila-anturille testattiin askelvastekokeella ja viiveeksi mitattiin 240 sekuntia. Viive muuttuu tilavuusvirtauksen funktiona kaavan (4) mukaisesti. Muuttuvan viiveen takia säädön täytyy olla riittävän hidas, jotta lämpötilasäätö pysyy stabiilina myös pienellä tilavuusvirtauksella. Vastaavasti isommalla virtauksella säätö voisi olla nopeampi, koska viive on silloin pienempi.

Säädön kehittämisessä voisi käyttää Gain schedulointia, jossa kuvan 26 venttiilin V2 läpivirtausta käytettäisiin skedulointimuuttujana. Menetelmällä pystyisi virittämään lämpötilasäädön nopeammaksi, kun virtausnopeus kasvaa. Kyseinen virtausmittaus puuttuu ja sen hankkiminen on liian kallis verrattuna hyötyyn. Edullisempi keino kehittää säätöä olisi lämpötilamittauksen lisääminen kuvan 26 venttiilin V1 etupuolelle, jolloin lämpötilatietoa voisi hyödyntää myötäkytkennän avulla. Shunttipiirin lämpötilasäädön toimivuus esitetään kuvassa 27.



Kuva 27. Shunttipiirin lämpötilasäädön eroisuure.

Kuvasta 27 huomataan, että shunttipiirin lämpötilasäätö värähtelee huomattavasti. Kaukolämmön kuluttajat ovat kuitenkin saaneet riittävän lämpöenergian shunttipiiristä, koska säädön asetusarvo on tarpeeksi korkea. Shunttipiirin pitkän ja vaihtuvan viiveen vuoksi sen virittäminen merkittävästi paremmaksi ilman uusia investointeja koettiin liian vaikeaksi, minkä takia sen säätö päätettiin jättää alkuperäiseksi siksi aikaa, kunnes uusia investointeja tehdään.

Shunttipiirin vaihteleva lämpötila aiheuttaa vaihtelua myös shunttipiiristä palaavan veden tilavuusvirtaukseen, sillä kaukolämpöveden ollessa korkeammassa lämpötilassa kuluttajat tarvitsevat vähemmän vettä, jolloin tilavuusvirtaus pienenee. Tämän voi todeta myös kaavan (2) avulla. Vaihteleva paluuvirtaus häiritsee painetasoa ja menoveden lämpötilan säätämistä.

Jos shunttipiirin lämpötilasäädön ottaisi pois käytöstä, PGW-piirin tilavuusvirtauksen vaihtelu vähenisi, jolloin paine- ja lämpötilasäätöjen hallinnasta tulisi helpompaa. Säädön poistaminen saattaisi kuitenkin aiheuttaa ongelmia KL-verkon pumppaustehon riittämiseen.

3.2.4 Lämpötilasäädön kehittäminen PGW-piirissä

Suurimmat ongelmat alkuperäisessä kaukolämpöveden lämpötilasäädössä johtuivat häiriöistä. Häiriöitä ovat lämmönsiirtimeille tulevan veden lämpötilan ja virtauksen muutokset sekä höyryn virtauksen ja entalpian muutokset. Alkuperäinen säätö oli toteutettu pelkästään negatiivista takaisinkytkentää hyödyntäen, jolloin häiriöt ehtivät vaikuttaa lämmönsiirtoon ja säädettävä lämpötila värähteli häiriöiden vaikutuksesta, kuten kuvasta 23 huomataan.

Lisäämällä alkuperäiseen säätörakenteeseen lämpötilasäädön lisäksi höyryvirtauksen säätö saadaan kaskadisäädin, jonka sekundäärisäätönä toimii höyryvirtauksen säätö ja primäärisäätönä lämpötilan säätö. Kaskadisäädön avulla voidaan kompensoida

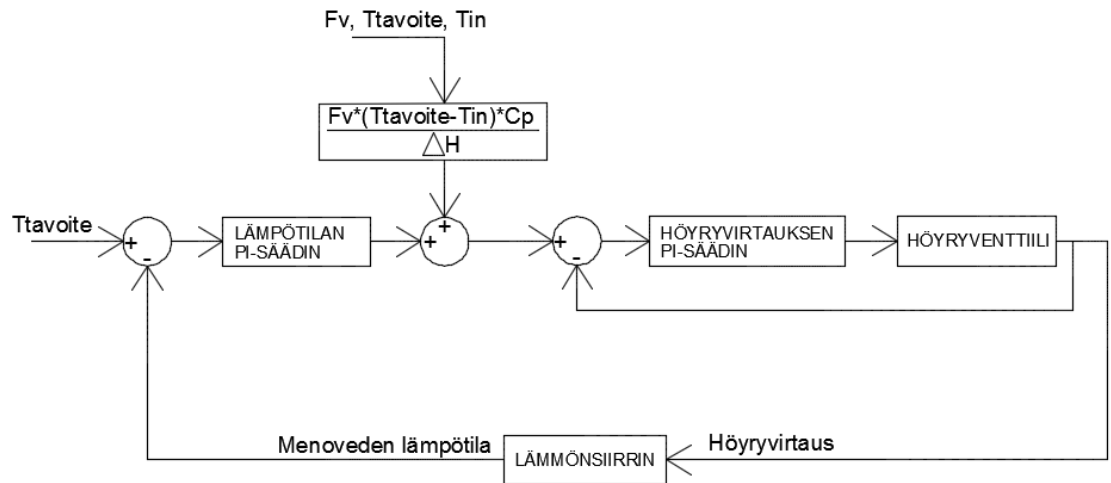
höyryvirtauksessa esiintyneet häiriöt. Jos höyryvirtaus muuttuu jonkin häiriön, esimerkiksi höyrynpaineen vaihtelun takia, höyryvirtauksen säätö kompensoi häiriön vaikutuksen säätämällä virtauksen takaisin asetusarvoon. Höyrysäädin kompensoi häiriön vaikutuksen nopeasti, jolloin häiriö ei ehdi merkittävästi vaikuttaa lämmönsiirtimeltä lähtevän veden lämpötilaan.

Kaavasta (22) voidaan laskea, kuinka paljon höyryä täytyy ohjata lämmönsiirtimen läpi, jotta lähtevän veden lämpötila saavuttaa jonkin tavoitelämpötilan. Tarvittavaksi höyryvirtaukseksi saadaan

$$F_h = \frac{F_v(T_{tavoite} - T_{in})c_p}{\Delta H}. \quad (26)$$

Käytetyn höyryn paine on noin 2,2 bar ja lämpötila 156 °C. Entalpian muutostaulukosta saadaan höyryn entalpiamuutokseksi $\Delta H \approx 2200 \text{ kJ/kg}$ [31]. Veden ominaislämpökapasiteetti on $c_p = 4,19 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$ [32]. IK- ja AP-haaroihin lähtevän veden tilavuusvirtaus mitataan, joten kaavan (26) virtaus F_v voidaan määrittää. Höyrylämmönsiirtimille LS4 ja LS2 tulevan veden lämpötila mitataan myös, jolloin kaavan (26) lämpötilatieto T_{in} voidaan määrittää. Kaavan (26) kaikki tekijät voidaan määrittää, jolloin tarvittava virtaus F_h tietylle lämpötilatavoitteelle $T_{tavoite}$ voidaan laskea. Näin ollen kaavaa (26) voidaan käyttää lämpötilasäädössä myötäkitykentalgoritmina kuvan 7 kaltaisesti.

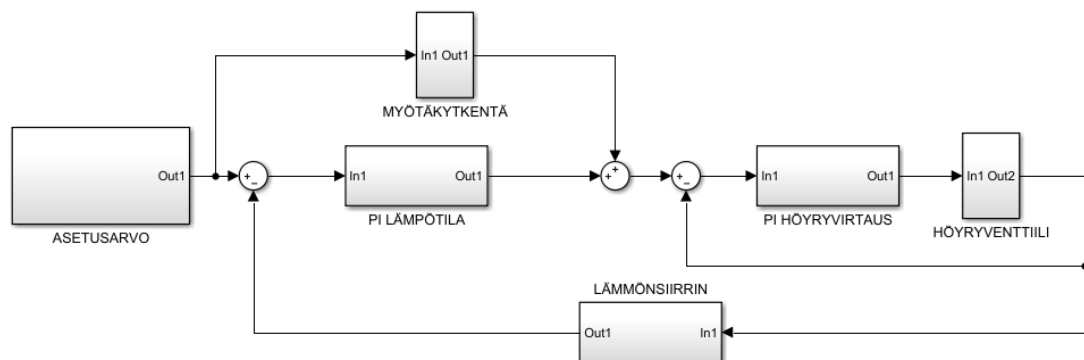
Myötäkitykentä ei riitä pelkästään ohjaamaan virtaussäädön asetusarvoa, jos halutaan lämmönsiirtimeltä lähtevän veden lämpötilan pysyvän tavoitteessa. Syynä tähän on antureiden mittausvirheet, kaavan (26) mallinnusvirheet sekä lämmönsiirtimen hyötysuhde, jota kaavassa ei huomioida. Kaikkea laskennallisesti määriteltyä höyryn lauhumisenergiaa ei saada siirrettyä veteen, sillä lämmönsiirrossa syntyy lämpöhäviöitä, eikä kaikki siirtimen sisällä oleva höyry välttämättä lauhdu. Myötäkitykennän lisäksi tarvitaan lämpötilasäädin, joka ohjaa höyryvirtaussäätimen asetusarvoa lämmönsiirtimeltä lähtevän veden lämpötilan perusteella. Virtaussäädön asetusarvoa ohjataan sekä myötäkitykennän että lämpötilasäätimen avulla. PGW-piirin lämpötilasäätö toteutetaan yhdistämällä kaskadisäätö, myötäkitykentä ja negatiivinen takaisinkytkentä. Lämpötilasäädön säätörakenne esitetään kuvassa 28 lohkokaaviomuodossa.



Kuva 28. PGW-piirin menoveden lämpötilasäädön kehitetty säätörakenne.

Kuvan 28 mukaista säätörakennetta voidaan käyttää sekä IK- että AP-haaran menoveden lämpötilasäädössä. Myötäkytkennän tarkoitus on kompensoida häiriöiden F_v ja T_{in} vaikutukset menoveden lämpötilaan ohjaamalla höyrystäimen asetusarvoa sen mukaisesti, miten häiriöt muuttuvat. Esimerkiksi tilavuusvirtauksen F_v kasvaessa höryvirtauksen asetusarvo kasvaa ja tulevan veden lämpötilan T_{in} kasvaessa asetusarvo pienenee.

Lämpötilasäätö mallinnetaan Matlab-ohjelmistolla, jolla voidaan simuloida, miten säädöt toimivat. Simuloinnin avulla voidaan arvioida lämpötilasäädön dynamiikkaa sekä havainnollistaa, mitä ongelmia uuden säätömenetelmän käytössä voi ilmetä. Matlabilla toteutettu simulointimalli noudattaa kuvan 28 säätörakennetta. Simulointimalli on toteutettu Simulinkilla, joka on Matlabin graafinen simulointiin tarkoitettu ympäristö. Simulointimalli esitetään kuvassa 29.

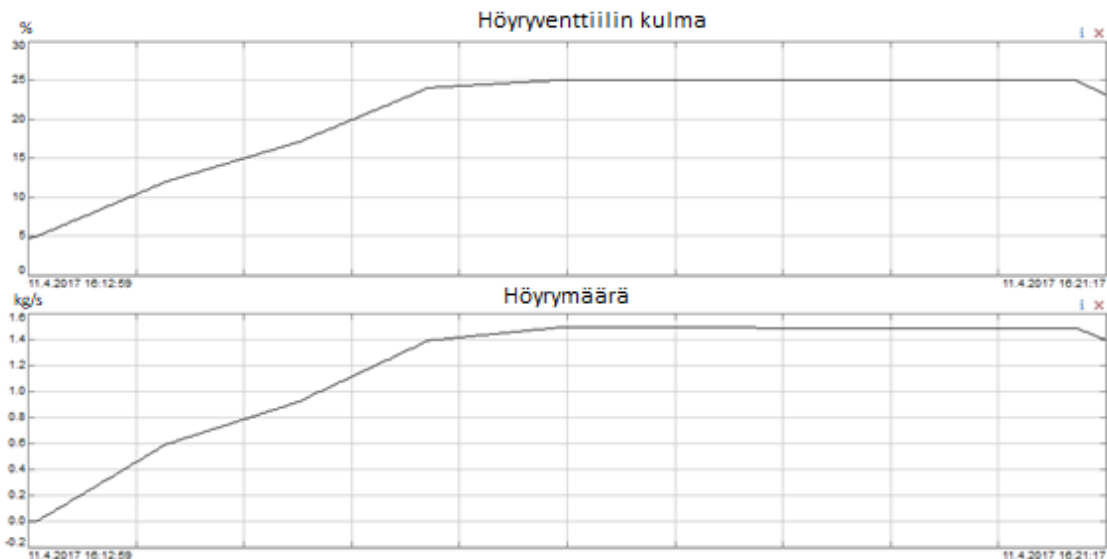


Kuva 29. PGW-piirin lämpötilasäädön simulointimalli.

Kuvan 29 simulointimallin höyryventtiili ja lämmönsiirrin voidaan esittää ensimmäisen kertaluokan siirtofunktiomalleina. Höyryventtiilin sisäänmeno on venttiilin avautumiskulma ja ulostulo höryvirtauksen määrä. Lämmönsiirtimen sisäänmenoja ovat

höryvirtauksen määrä, lämmitettävän veden virtausmäärä sekä lämpötila ja ulostulo on lämmitetyn veden lämpötila. Lämmönsiirtimen sisäänmenoista höryvirtauksen määrä on säädettävä suure ja lämmitettävän veden virtausmäärä sekä lämpötila ovat häiriöitä. Häiriöt voidaan mitata, jolloin niiden vaikutusta voidaan kompensoida myötäktykennän avulla. Kuvan 29 simulointimalliin on lisätty edellä mainittujen häiriöiden vaikutukset lämmönsiirrin- ja myötäktykentälohkojen sisälle, joten niitä ei näe suoraan kuvasta. Kuvan 29 säätörakennemalli vastaa samaa mallia, jonka mukaan Shady Yehia suosittelee artikkelissaan säätämään menoveden lämpötilaa hylsyn muotoisella hörylämmönsiirtimellä [9].

Lämmönsiirtimiä LS2 ja LS4 ohjaaville höryventtiileille tehtiin ramppivastekokeet, joiden avulla määritettiin höryventtiilien siirtofunktiomallit. Kuvassa 30 on lämmönsiirrintä LS4 ohjaavan höryventtiilin ramppivastekoe.



Kuva 30. LS4:n höryventtiilin ramppivastekoe.

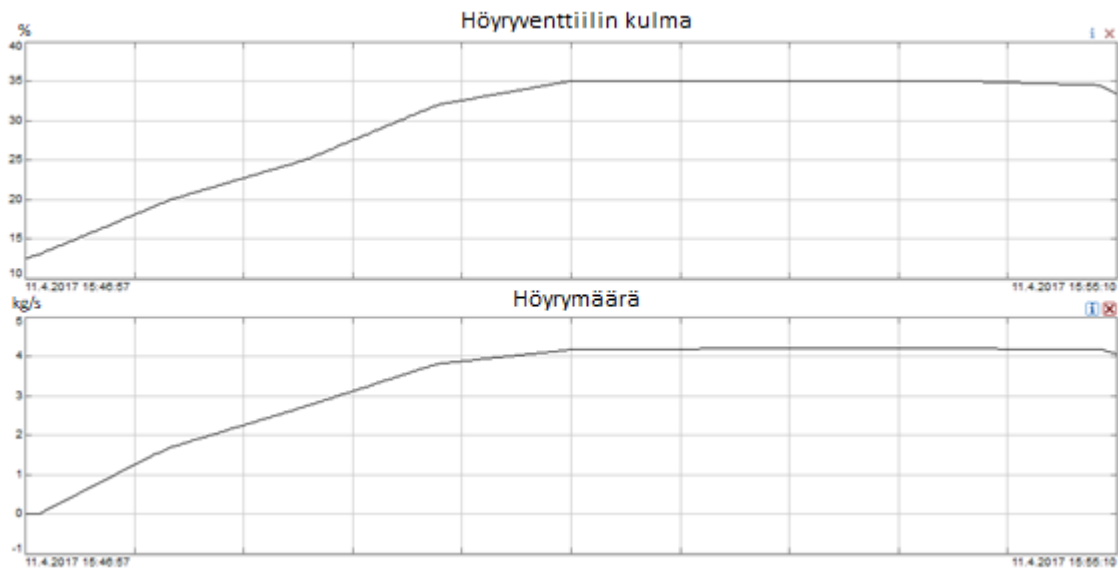
Kuvassa 30 ylempi kuvaaja esittää venttiilin kulmaa ja alempi venttiilin höryvirtausmäärää ajan suhteen. Kuvasta huomataan, että viive ohjauksen ja mittauksen välillä on pieni, sillä mittaus reagoi ohjauksen muutokseen nopeasti. Kuvasta huomataan myös, että höryvirtauksen mittaus reagoi ohjaukseen vasta, kun ohjaus on yli 5 %. Säädessä täytyy huomioida venttiilin kuollut alue, joka on välillä 0-5 %. Kuollut alue voi johtua esimerkiksi virtausmittauksessa olevasta maskista, jolla suodatetaan pienet virtausarvot pois. Se voi johtua myös venttiilin nollakohdan väärästä paikasta, jota pystytään venttiilistä muuttamaan.

Venttiilin vahvistus lasketaan samalla tavalla kuin kuvan (11) esimerkissä. Ohjauksen muutos $\Delta U = 20\%$ ja ulostulon muutos $\Delta Y = 1,5\text{ kg/s}$. Kaavan (21) avulla saadaan vahvistukseksi $K_{LS4\text{venttiili}} = \frac{1,5}{20} = 0,075$. Höryvirtaus muuttuu lähes samaan aikaan

lineaarisesti ohjauksen kanssa, jolloin venttiilin aikavakio on pieni. Valitsemalla venttiilin aikavakioksi 1 s ja virittämällä säätö sille sopivaksi, säätö ei ole liian nopea, vaikka aikavakio olisi todellisuudessa pienempi. Kuvan 30 perusteella höyryventtiilin ohjauksen ja höyrymittauksen välinen viive on alle 1 s. Virittämällä säädin stabiiliksi 1 sekunnin viiveelle, se on stabiili myös pienemmälle viiveelle. LS4:n höyryventtiilin siirtofunktio malliksi saadaan kaavan (19) avulla

$$H(\text{LS4venttiili}) = \frac{0,075e^{-1s}}{1s+1}. \quad (27)$$

Kuvassa 31 on lämmönsiirrintä LS2 ohjaavan höyryventtiilin ramppivastekoe.



Kuva 31. LS2:n höyryventtiilin ramppivastekoe.

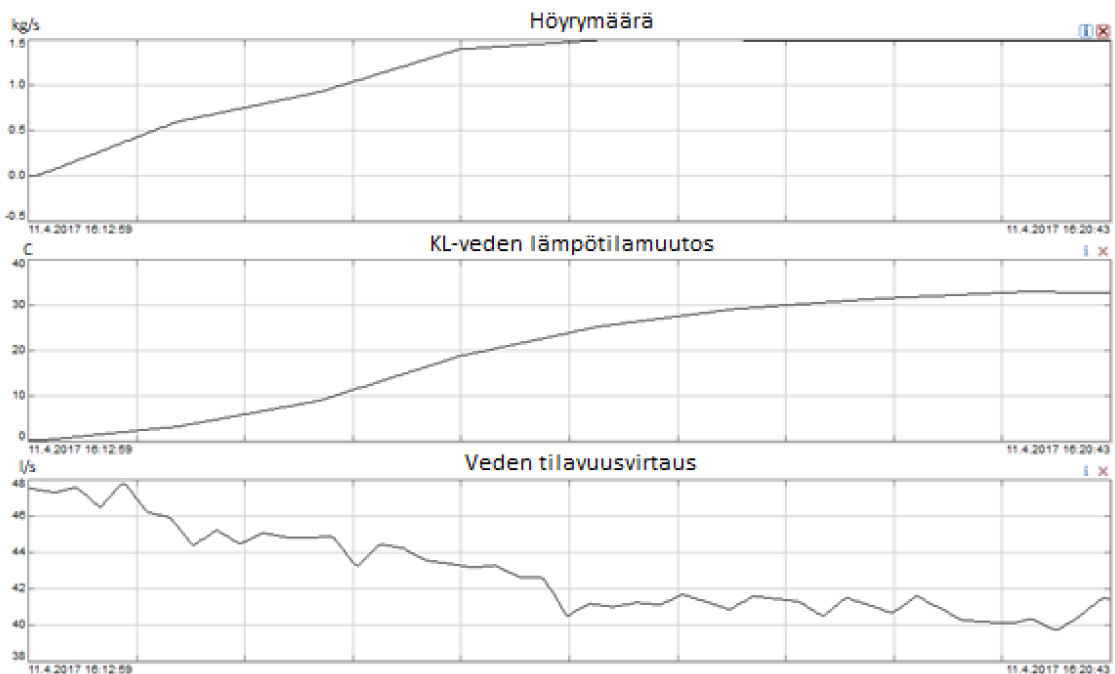
Kuvan 31 ja kaavan (21) perusteella LS2:n höyryventtiilin siirtofunktio mallin vahvistukseksi saadaan $K_{\text{LS2venttiili}} = \frac{4,2}{35-13} \approx 0,19$. Aikavakioksi ja viiveeksi valitaan 1 s samoin perustein, kuten tehtiin LS4:n höyryventtiilin kanssa. Venttiilin kuollut alue on 0-13 %, koska höyryvirtauksen mittaus reagoi vasta, kun venttiilin asento ylittää 13 %. LS2:n höyryventtiilin siirtofunktio malliksi saadaan kaavan (19) avulla

$$H(\text{LS2venttiili}) = \frac{0,19e^{-1s}}{1s+1}. \quad (28)$$

Kuvista 30 ja 31 voidaan arvioida, että LS2:n ja LS4:n höyryventtiilit toimivat lineaarisesti toiminta-alueellaan, jolloin siirtofunktio mallit (27) ja (28) kuvaavat niiden toimintaa koko toiminta-alueella. Siksi voidaan olettaa, että siirtofunktio malleille (27) ja (28) viritetyt PI-säätimet toimivat myös venttiilien koko toiminta-alueella.

Höyryventtiileille tehtyjen ramppivastekokeiden avulla voidaan määrittää myös lämmönsiirtimien LS2 ja LS4 siirtofunktio mallit. Siirtofunktio mallin sisäänmenona on höyryn virtausmäärä ja ulostulona lämmitettävän veden lämpötilamuutos.

Siirtofunktioimallien vahvistus ja aikavakio riippuvat myös lämmitettävän veden virtausmäärästä. Mitä suurempi virtausmäärä on, sitä pienempi on vahvistus ja aikavakio. Suuremmalla virtausmäärällä lämmitettävä vesi kulkee lämmönsiirtimen läpi nopeammin, minkä takia se ei ehdi lämmitä niin paljon. Lämmönsiirtimien vahvistus riippuu kaavan (22) mukaisesti höyryn entalpiamuutoksesta, veden ominaislämpökapasiteetista ja lämmitettävän veden virtausmäärästä. Lämmönsiirtimen aikavakio riippuu lämmönsiirtimen tilavuudesta sekä veden virtausmäärästä. Aikavakio kuvaa, kuinka nopeasti lämmitettävä vesi virtaa lämmönsiirtimen läpi. Lämmönsiirtimeltä lähtevän veden lämpötilamittauksessa on pieni viive, joka riippuu kaavan (4) tavoin veden tilavuusvirtauksesta. Kuvassa 32 on lämmönsiirtimen LS4 ramppivastekoe, jossa testataan, miten lämmönsiirtimen läpi virtaavan veden lämpötilamuutos käyttäytyy höyryvirtauksen funktiona.

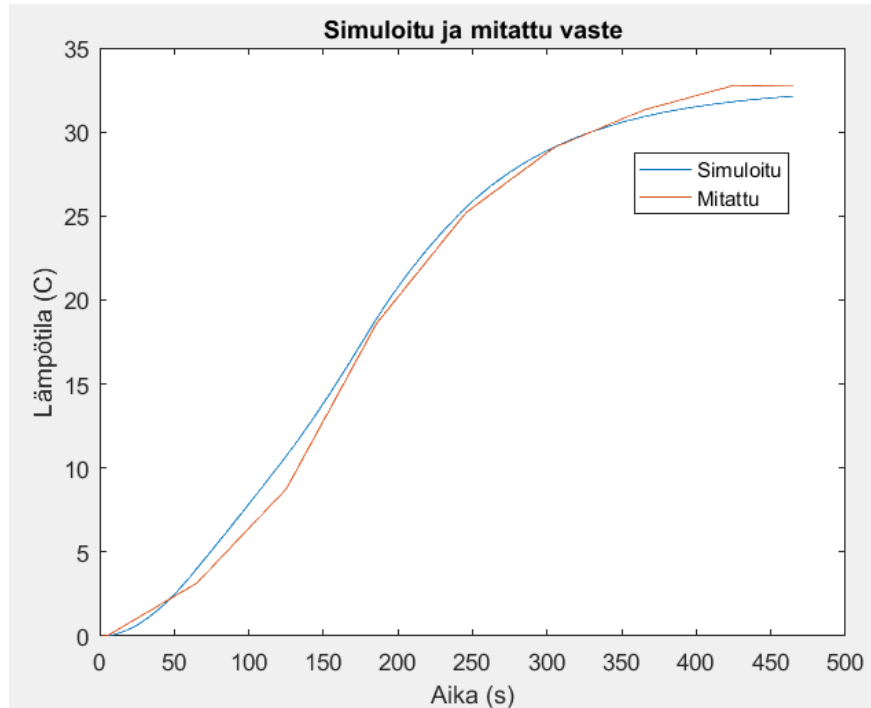


Kuva 32. Lämmönsiirtimen LS4 ramppivastekoe.

Kuvassa 32 on myös lämmitettävän veden tilavuusvirtaus, koska se vaikuttaa lämmönsiirtimen siirtofunktioimalliin. Kuvasta 32 voidaan määrittää lämmönsiirtimen LS4 vahvistus, kun tilavuusvirtaus on noin 41 l/s. Kaavan (21) avulla saadaan lämmönsiirtimen LS4 vahvistukseksi $K_{LS4} = \frac{33}{1,5} = 22$. Kuvasta 32 on vaikea määrittää lämmönsiirtimen aikavakiota, sillä höyrymäärää on nostettu ramppimaisesti, jolloin selkeää kuvan 11 kaltaista askelvastetta ei ole. Aikavakio voidaan identifioida Matlabin avulla simuloimalla. Tehdään kuvan 32 höyrymäärää vastaava herätefunktio ja kokeillaan siirtofunktioimallille sopivia aikavakioita, että siirtofunktion ulostulosta saadaan kuvan 32 lämpötilamuutosta kuvaava funktio. Aikavakiolla 85 lämmönsiirtimen LS4 siirtofunktioksi ilman viivettä saadaan

$$H(LS4) = \frac{22}{85s+1}, \quad (29)$$

kun käytetään kaavaa (19) ja tilavuusvirtaus on 41 l/s. Simuloimalla siirtofunktiota (29) kuvan 32 höyrymääräfunktiolla, saadaan siirtofunktion ulostuloksi lämmitetyn veden lämpötilamuutos. Simuloitua lämpötilamuutosta verrataan todelliseen mitattuun muutokseen kuvassa 33.



Kuva 33. Lämmönsiirtimen LS4 simuloitu lämpötilamuutos verrattuna todelliseen lämpötilamuutokseen.

Kuvasta 33 voidaan päätellä, että siirtofunktioimalli (29) kuvaa todellista lämmönsiirintä melko hyvällä tarkkuudella, joten siirtofunktiota voidaan hyödyntää säätöjen simuloinneissa. Punainen käyrä on lämmönsiirtimeltä mitattu lämpötilamuutos eli sama käyrä, kuin kuvassa 32 keskimmaisessä kuvaajassa. Mittausarvot on siirretty ensin järjestelmästä Exceliin, josta ne on siirretty Matlabin. Sininen käyrä on simuloinnin tuloksena saatu lämmönsiirtimen lämpötilamuutosta kuvaava vaste. Vaste on saatu siirtofunktioimallin (29) ulostulosta, kun sen sisäänmenona on ollut kuvan 32 ylimmäinen käyrä eli höyrymääräfunktio.

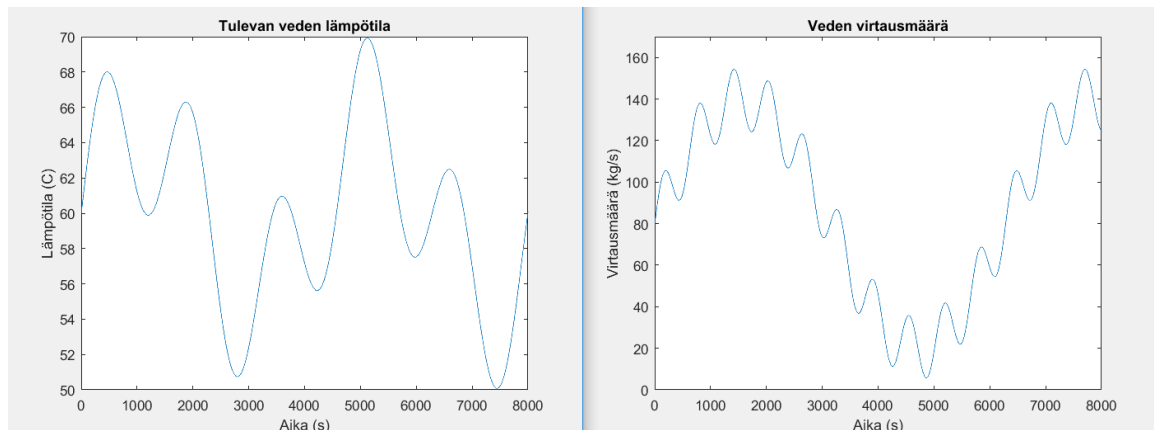
Kuvan 32 mittausdatan perusteella huomataan, että lämpötilamuutos reagoi pienellä viiveellä höyryvirtauksen muutokseen. Jotta lämpötilasäätö saadaan viritettyä stabiiliksi, arvioidaan viive hieman suuremmaksi kuin se todellisuudessa on. Oletetaan kuvan 32 perusteella viiveeksi 3 sekuntia, kun veden virtaus on 41 l/s. Koska tilavuusvirtaus vaikuttaa käänteisesti lämmönsiirtimen siirtofunktion vahvistukseen, aikavakioon ja viiveeseen, saadaan lämmönsiirtimen LS4:n siirtofunktioimalliksi tilavuusvirran funktiona

$$H(LS4) = \frac{22 * \frac{41}{Q} * e^{-3s * \frac{41}{Q}}}{85s * \frac{41}{Q} + 1}, \quad (30)$$

missä Q on lämmitettävän veden tilavuusvirtaus.

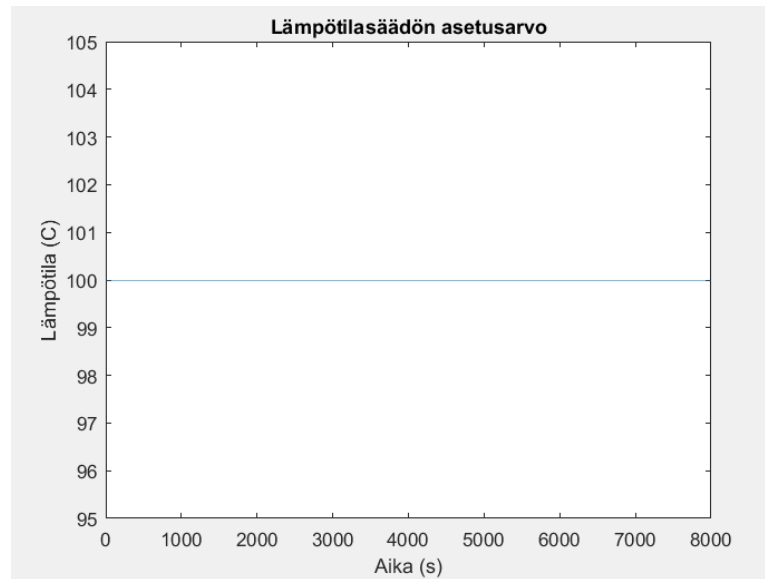
Höyryvirtauksen PI-säätimen vahvistukseksi valitaan alustavasti $Kp_{höyry} = 1$ ja integrointiajaksi $Ti_{höyry} = 1$. Näillä parametreilla säätö toimii riittävän nopeasti, kun simuloidaan höyryvirtauksen säätöä. Vaste ei värähtele ja parametreissa on kiristysvaraa. Kiristysvaralla tarkoitetaan, että vahvistusta voidaan suurentaa ja integrointiaikaa pienentää ja säätö pysyy silti stabiilina. Lämpötilan PI-säätimen vahvistukseksi valitaan $Kp_{lämpötila} = 0,32$ ja integrointiajaksi $Ti_{lämpötila} = 100$. Parametrien valinnat on tehty siten, että simulointituloksista käy ilmi, miten säätö käyttäytyy tilavuusvirtauksen muuttuessa.

Kuvan 29 säätörakennetta simuloidaan käyttämällä höyryventtiilin siirtofunktiona kaavaa (27), lämmönsiirtimen siirtofunktiona kaavaa (30) ja höyryvirtauksen sekä lämpötilan PI-säätimen parametreina virityksiä, jotka esitetään edellisessä kappaleessa. Lämmönsiirtimen sisäänmenoina käytetään kuvan 34 funktioita, jotka esittävät lämmitettävän veden lämpötilaa ja virtausmäärää.



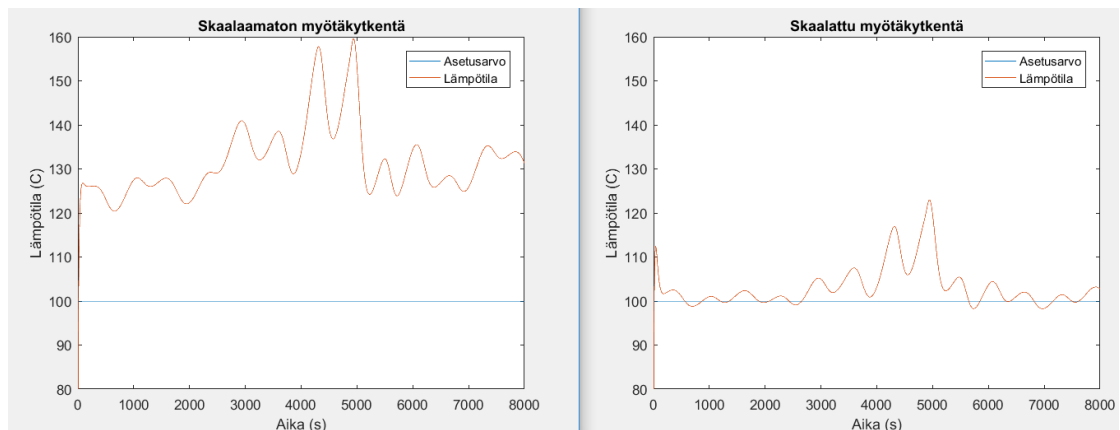
Kuva 34. Lämmönsiirtimelle menevän veden lämpötilä sekä virtausmäärä lämpötilasäätöjen simuloinneissa.

Kuvan 34 funktiot ovat lämmönsiirtimen sisäänmenoja, jotka häiritsevät lämpötilan säätämistä. Siirtofunktio (30) muuttuu kuvan 34 virtausmäärän funktiona, jolloin simuloitavan lämmönsiirrimallin dynamiikka muuttuu virtauksen funktiona. Simuloinneissa säätöjen tavoitteina on, että lämmönsiirtimeltä lähtevän veden lämpötila seuraa asetusrvofunktiota, joka esitetään kuvassa 35.



Kuva 35. Lämpötilasäädön asetusrvo lämpötilasäätöjen simuloinneissa.

Simuloidaan säädettävää lämpötilaa ensin kytkemällä lämpötilan PI-säädin irti ohjauksesta, jolloin höyryvirtauksen säätö saa asetusrvon pelkästään myötäkytkentälohkosta. Kuvasta 36 nähdään, miten lämpötilan säätö toimii pelkällä myötäkytkentälohkosta tulevalle avoimella ohjauksella, kun lämpötilan PI-säädin ei ole käytössä.

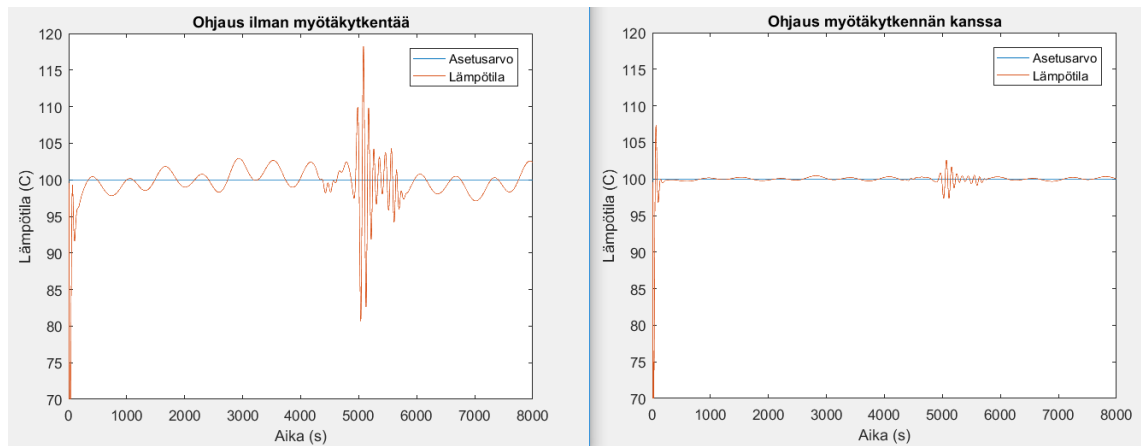


Kuva 36. Simuloitu LS4:n menoveden lämpötilasäätö ilman lämpötilan PI-säätimen ohjausta skaalaamattomalla ja skaalatulla myötäkytkennällä.

Kuvan 36 tarkoitus on havainnollistaa, miten lämpötilasäätö toimii ilman lämpötilan PI-säädintä. Vasemman puoleisessa kuvaajassa myötäkytkentää ei ole skaalattu ja oikean puoleisessa kuvaajassa myötäkytkennän ohjaus on kerrottu skaalauskerroimella 0,6. Skaalauskerrointa voidaan tarvita, koska myötäkytkentä määrittää ohjauksen laskennallisesti mittausten perusteella, jolloin laskennassa saattaa esiintyä virheitä monistakin syistä, joita tämän luvun alussa on esitetty. Kuten kuvasta 36 nähdään, skaalauskerroimen avulla myötäkytkentä voidaan saada toimimaan huomattavasti paremmin. Kuvasta 34 huomataan, että virtausmäärä vähenee merkittävästi 4000-5000

sekunnin kohdalla, jonka takia myös kuvan 36 vasteet värähtelevät suuremmalla amplitudilla samalla aikavälillä.

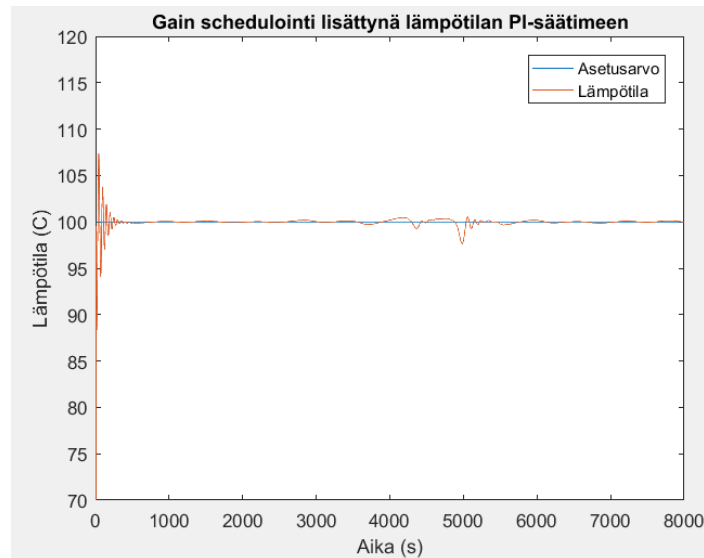
Kuvassa 37 on esitelty simulointitulokset, jossa kuvan 29 säätörakennetta on simuloitu ensin myötäkylälohko kytkettynä irti ohjauksesta ja sen jälkeen kiinni kytkettynä. Kuvan 37 tarkoitus on havainnollistaa, miten myötäkylälohko vaikuttaa säädön toimintaan pelkkään PI-säätimen verrattuna.



Kuva 37. Simuloitu LS4:n menoveden lämpötilasäätö ilman myötäkylälohkoa ja sen kanssa.

Kuvasta 37 voidaan päätellä, että myötäkylälohkon avulla voidaan huomattavasti parantaa säädön toimintaa. Vertaamalla kuvia 37 ja 34 huomataan, että säätö toimii paremmin suuremmilla virtausmäärillä, jolloin lämmönsiirtimen aikavakio ja viive ovat pienemmät.

Lämpötilan PI-säätimelle voidaan tehdä Gain-schedulointi, jolloin virtausmäärän kasvaessa suurennetaan PI-säätimen vahvistuskerrointa. Vahvistukseksi valittiin $Kp_{\text{lämpötila}} = 0,32$ ja integrointiajaksi $Ti_{\text{lämpötila}} = 100$. Valinnat oli suunniteltu virtaukselle $Q = 41 \text{ l/s}$. Gain-schedulointi tehdään siten, että PI-säätimen vahvistus muuttuu tilavuusvirtauksen funktiona eli $Kp_{\text{lämpötila}} = 0,32 * \frac{Q}{41 \text{ l/s}}$ ja integrointiaika pysyy vakiona. Vahvistus voidaan rajoittaa johonkin minimi- ja maksimiarvoon, jolloin virtausmäärän mittauksessa esiintyvät häiriöt eivät tee säädöstä epästabiilia tai liian hidasta. Kuvassa 38 esitetään menoveden lämpötilasäädön simulointitulokset, kun Gain-schedulointi on lisätty lämpötilan PI-säätimen toimintaan.



Kuva 38. Simuloitu LS4:n menoveden lämpötilan säätö kuvan 29 säätörakenteella, johon on lisätty Gain schedulointi.

Vertaamalla kuvaa 38 aiempiin menoveden lämpötilasäädön simulointituloksiin huomataan, että paras säätötulos saavutetaan, kun yhdistetään kaskadisäätö, myötäkkytkentä ja lisätään lämpötilan PI-säätimeen Gain schedulointi.

Todellisessa lämpötilasäädössä Gain schedulointi kannattaa toteuttaa viritystaulukon avulla, jossa eri tilavuusvirtauksen arvoilla lämpötilan PI-säädin viritetään toimivaksi sille virtaukselle. Kyseisellä toiminnalla varmistetaan, että mallinnusvirheiden takia säädöstä ei tehdä epästabiilia tai huonosti toimivaa väärin perustein valituilla parametreilla. Simulointi ei aina vastaa täysin todellista systeemiä, jonka vuoksi simulointituloksiin kannattaa suhtautua kriittisesti.

Tässä luvussa simuloitiin LS4 höyrylämmönsiirtimen uuden säätömenetelmän toimintaa. LS4:n ja LS2:n höyryventtiilien siirtofunktiomallit (27) ja (28) ovat hyvin samalaiset ja lämmönsiirtimet LS4 ja LS2 toimivat samalla tavalla. Näistä syistä voidaan olettaa, että jos uusi säätömenetelmä toimii LS4 lämmönsiirtimelle, se toimii myös LS2:lle. Tässä projektissa uutta säätömenetelmää testataan LS4:n säädössä. Jos uusi menetelmä on vanhaa parempi, se voidaan ottaa käyttöön myös LS2:n säädössä.

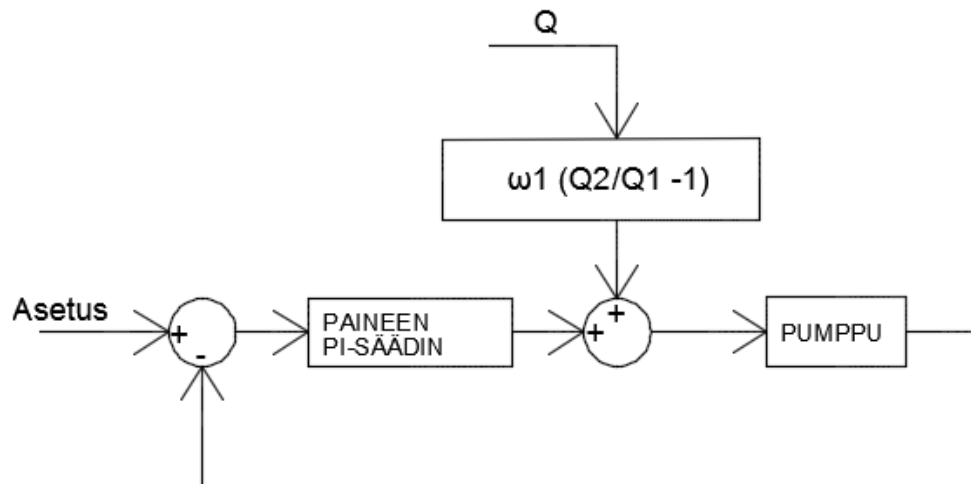
3.2.5 Painesäädön kehittäminen PGW-piirissä

Suurin ongelma alkuperäisessä kaukolämpöverkon painesäädössä johtui tilavuusvirtauksen vaihtelusta. Tilavuusvirtauksen vaihtelu häiritsee paineen säätämistä, jonka kuva 25 ja kaava (23) osoittavat. Alkuperäinen säätö oli toteutettu pelkästään negatiivista takaisinkytkentää hyödyntäen, jolloin säätö ei ehtinyt kompensoida vaihtelevan tilavuusvirtauksen aiheuttamaa häiriötä.

Tilavuusvirtauksen vaihtelun aiheuttamaa häiriötä voidaan kompensoida painesäädössä lisäämällä alkuperäiseen säätörakenteeseen myötäkylkentä. Myötäkylkentän avulla pumpun kierrosnopeutta muutetaan kaavan (25) mukaisesti siten, että tilavuusvirtauksen muuttuessa myötäkylkentäalgoritmi pienentää tai suurentaa pumpun ohjausta. Myötäkylkentäalgoritmi voidaan johtaa kaavasta (25), jolloin se on

$$\omega_2 = \frac{\omega_1 Q_2}{Q_1} - \omega_1 = \omega_1 \left(\frac{Q_2}{Q_1} - 1 \right), \quad (31)$$

missä ω_2 on myötäkylkentän ohjaus, ω_1 on pumpun edellinen nopeusohje, Q_2 on sen hetkinen ja Q_1 on edellinen tilavuusvirtamittaus. Painesäätö toteutetaan kuvan 7 säätörakenteella, jossa myötäkylkentäalgoritmi noudattaa kaavaa (31) ja mitattu häiriö on pumppujen tilavuusvirtaus. Painesäädön PI-säätimen parametreiksi asetetaan alustavasti $K_p = 0,35$ ja $T_i = 180$, jotka ovat alkuperäisessäkin toteutuksessa. Alkuperäisillä parametreilla painesäätö oli stabiili ja toimi hyvin ilman häiriötä, joten samat parametrit valitaan alustavasti uudessakin toteutuksessa. Kehitetyn painesäädön lohkokaaviomalli esitetään kuvassa 39.



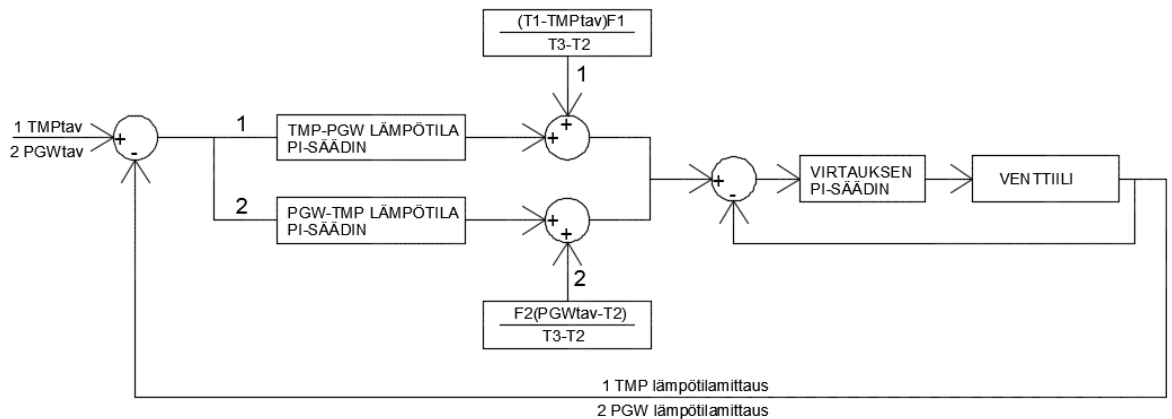
Kuva 39. PGW-piirin menoveden painesäädön kehitetty säätörakenne.

Kuvan 39 painesäädön toimintaperiaate on, että tilavuusvirtausmittauksen Q avulla myötäkylkentäalgoritmi laskee, kuinka paljon pumpun ohjausta pitää muuttaa, jotta muuttuva tilavuusvirtaus ei vaikuttaisi paineeseen. Säädön tavoite on kompensoida myötäkylkentän avulla suurimmat painevaihtelut ja sallia vähäisen virtausvaihtelun aiheuttamat matala-amplitudiset painevaihtelut. Tavoite toteutetaan lisäämällä myötäkylkentäalgoritmin virtausmittaukseen hystereesitoimilohko, jonka avulla säätö reagoi virtausmittaukseen, kun se on muuttunut riittävästi johonkin suuntaan. Kaukolämpöverkon veden virtausmittauksissa esiintyy jonkin verran kohinaa, jota ei haluta pumppujen ohjaukseen. Hystereesitoimilohkoa käytetään kohinan takia, jonka avulla se saadaan suodatettua pois ohjauksesta. Vähäiset painevaihtelut sallitaan, koska ne eivät vaikuta merkittävästi kaukolämpöverkon toimintaan. Toisaalta pumppujen

ohjauksessa esiintyvä kohina voi lyhentää pumppujen tai niitä ohjaavien taajuusmuuttajien elinikää, minkä vuoksi ylimääräinen kohina suodatetaan ohjauksesta pois.

3.3 Lämmönsiirron säätö TMP- ja PGW-piirien välillä

Kuvassa 21 on PI-kaavio TMP- ja PGW-piirien välisestä lämmönsiirrosta. Lämmönsiirto toteutetaan siten, että lämpöä voidaan siirtää sekä TMP-piiristä PGW-piiriin että PGW-piiristä TMP-piiriin. Lämmönsiirron suunta valitaan kytkentälogiikan avulla sen mukaan kummasta piiristä lämpöä on mahdollista siirtää. Lämmönsiirron tavoitteena on, että kaikki ylimääräinen lämpö pyritään siirtämään toiseen piiriin. Piirissä on ylimääräistä lämpöä, jos kaukolämpöveden lämpötila on korkeampi kuin sille asetettu tavoitearvo, jonka järjestelmä lukee ulkoilman lämpötilafunktiosta. Kuvassa 40 esitetään lämmönsiirron säätörakenne lohkokaaviomuodossa.



Kuva 40. TMP- ja PGW-piirien välisen lämmönsiirron säätörakenne.

Kuvan 40 parametrit $T1$, $T2$, $T3$, $F1$ ja $F2$ ovat kuvan 21 PI-kaaviota vastaavat mittaukset. $TMPTav$ ja $PGWtav$ ovat TMP- ja PGW-piirien lämpötilatavoitteet. Numerot 1 ja 2 tarkoittavat kytkentälogiikan ulostuloa eli valintaa, siirretäänkö lämpöä TMP-piiristä PGW-piiriin vai toisinpäin. Virtaussäätö on sama molemmissa tapauksissa. Virtaussäädön asetusarvo muuttuu riippuen kumpaan suuntaan lämpöenergiaa siirretään.

Kuvan 40 myötäkytkentäalgoritmit on johdettu energiayhtälöstä (2) hyödyntämällä PI-kaavioon (kuva 21) merkittviä mittauksia. Energiayhtälön mukaan lämmönsiirrosta luovutettu energia on yhtä suuri kuin vastaanotettu energia, jolloin TMP-piiristä siirrettäessä lämpöä PGW-piiriin PI-kaavion mittauksille (kuva 21) pätee yhtälö

$$(T1 - TMPTav)F1 * C_p = (T3 - T2)FC * C_p \leftrightarrow FC = \frac{(T1 - TMPTav)F1}{T3 - T2}. \quad (32)$$

Lämpöä siirrettäessä PGW-piiristä TMP-piiriin kuvan 21 mittauksille pätee myös yhtälö

$$PGW_{tav} * F2 * C_p = T3 * FC * C_p + (F2 - FC)T2 * C_p \leftrightarrow FC = \frac{F2(PGW_{tav}-T2)}{T3-T2}. \quad (33)$$

Kaavoja (32 ja 33) käytetään myötäkyläalgoritmeina kuvan 40 lämmönsiirrossa.

Virtaussäädön asetusarvolle asetetaan yläraja johtuen lämmönsiirtimen koosta, joka rajoittaa maksimivirtausta. Säätoventtiilille asetetaan alustavasti alarajaksi 30 %, jonka alapuolelle venttiilin sulkeutuminen estetään. Lämmönsiirrin on mitoitettu TMP-piirin virtauksen mukaan ja PGW-piirin virtaus on huomattavasti korkeampi, minkä vuoksi liian korkea PGW-piirin virtaus lämmönsiirtimen läpi rajoitetaan. Rajoituksilla ehkäistään lämmönsiirtimen hajoamisriski tilanteissa, joissa sen läpi virtaa liian suuri tilavuusvirtaus.

Säätoventtiili on rajoitettu välille 30-100 %, minkä vuoksi on mahdollista, että säädössä esiintyy windup -ilmiö, josta kerrottiin tarkemmin luvussa 2.3.1. Windup -ilmiö syntyisi esimerkiksi tilanteessa, jossa venttiilin kulma olisi ohjautunut tilaan 30 % ja säädetty lämpötila ei olisi asetusarvossa. Lämpötilasäädin edelleen ohjaisi virtaussäädön asetusarvoa ja se ohjautuisi lopulta maksimiarvoon. Windup -ilmiön estämiseksi säätöalgoritmiin on tehty kytkentälogiikka, jolla estetään lämpötilasäätimen ohjauksen kasvaminen, kun venttiilin ohjaus on minimirajalla. Vastaavanlainen anti-windup on tehty myös tilanteeseen, jolloin venttiili on tilassa 100 % ja lämpöä siirretään jompaan kumpaan suuntaan. Kun venttiili on tilassa 100 %, lämmönsiirtimen läpi ohjautuu jonkin verran vettä myös PGW-piiristä johtuen ohitusventtiilin suuresta painehäviöstä. Tästä syystä voisi syntyä tilanne, jossa venttiili on 100 % tilassa ja säädetävä lämpötila olisi asetusarvon alapuolella, jolloin lämpötilasäädin vähitellen ohjaisi virtaussäädön asetusarvon nolnaan.

3.3.1 Lämmönsiirron kytkentälogiikka

Järjestelmä tekee valinnan, siirretäänkö lämpöä TMP-piiristä PGW-piiriin, PGW-piiristä TMP-piiriin vai ei ollenkaan. Valinta perustuu kytkentälogiikkaan, joka toteutetaan logiikkakaaviona. Logiikkakaaviossa vertaillaan erilaisia ehtoja, joiden perusteella valitaan, mihin suuntaan lämmönsiirto tapahtuu. Kytkentälogiikan lähtö on 1, jos lämpöä siirretään TMP-verkosta PGW-verkkoon. Jos lähtö on 2, siirto tapahtuu toiseen suuntaan. Lähtö voi olla myös 0, jolloin lämpöä ei siirretä kumpaakaan suuntaan ja ohitusventtiili lukittuu 100 % auki tilaan.

Kytkentälogiikan lähtö on 1, jos kaikki seuraavat ehdot toteutuvat samaan aikaan:

1. TMP-verkon lämpötila ennen lämmönsiirrintä > TMP-verkon tavoitelämpötila +2 °C
2. TMP-verkon lämpötila ennen lämmönsiirrintä -1 °C > PGW-verkon lämpötila ennen lämmönsiirrintä
3. PGW-verkon tavoitelämpötila > PGW-verkon lämpötila lämmönsiirtimen jälkeen

Kytkentälogiikan lähtö on 2, jos kaikki seuraavat ehdot toteutuvat samaan aikaan:

1. PGW-verkon lämpötila ennen lämmönsiirrintä $>$ PGW-verkon tavoitelämpötila $+2$ °C
2. PGW-verkon lämpötila ennen lämmönsiirrintä -1 °C $>$ TMP-verkon lämpötila ennen lämmönsiirrintä
3. TMP-verkon tavoitelämpötila $>$ TMP-verkon lämpötila lämmönsiirtimen jälkeen

Jos kytkentälogiikan lähtö ei ole 1 tai 2, se on 0. Yksinkertaistettuna logiikka tutkii ja vertailee seuraavia asioita:

1. Onko kummassakaan kaukolämpöverkossa ylimääräistä lämpöenergiaa, jonka voisi siirtää toiseen verkkoon?
2. Onko kaukolämpöverkon lämpötila riittävästi korkeampi kuin toisen verkon lämpötila, jotta lämpöä on mahdollista siirtää?
3. Onko toisessa kaukolämpöverkossa tarvetta vastaanottaa ylimääräistä lämpöenergiaa?

Kytkentälogiikan ehdot on valittu siten, että logiikan tila ei voi vaihtua tilojen 1 ja 2 välillä ilman, että se käy ensin nollassa. Jokaisessa logiikan ehdossa on jonkin verran hystereesiä, jonka avulla estetään logiikan lähdön nopea vaihtuminen edestakaisin eri tilojen välillä. Hystereesiä on hyödynnetty niin, että kun mikä tahansa ehto toteutuu sen vertailurajassa, raja muuttuu ehdon toteutumisen jälkeen sille asetetun hystereesin verran eri kohtaan.

Kuvan 40 PI-säätimien ohjaukset on lukittu kytkentälogiikalla seuraavasti:

1. Kytkentälogiikan lähdöllä 0 lämpötilasäätimien ohjaukset on lukittu seuraamaan virtausmittausta ja virtaussäädön ohjaus on lukittu tilaan 100 %.
2. Logiikan lähdöllä 1 TMP-PGW-lämpötilasäätimen ohjauksen lukitus vapautuu, PGW-TMP-lämpötilasäätimen ohjaus on lukittu seuraamaan virtausmittausta ja virtaussäädön ohjauksen lukitus vapautuu.
3. Logiikan lähdöllä 2 PGW-TMP-lämpötilasäätimen ohjauksen lukitus vapautuu, TMP-PGW-lämpötilasäätimen ohjaus on lukittu seuraamaan virtausmittausta ja virtaussäädön ohjauksen lukitus vapautuu.

Lukitukset on suunniteltu niin, ettei logiikan tilan vaihtuessa säätimien ohjauksissa tapahdu liian nopeita muutoksia. Lukitusten avulla eliminoidaan myös windup -ilmiön mahdollisuus, jolloin säätimet reagoivat logiikan tilan muutoksiin ilman viivettä.

3.4 Kaukolämpöverkon ajotapojen kehittäminen

Kaukolämpöverkon ajotapoja kehittämällä säästetään energiaa. Liian suuren painetason tai korkean lämpötilan pitäminen verkossa aiheuttaa häviöitä, jotka voidaan välttää paremmin valituilla paine- ja lämpötilatasoilla. Luvussa 2.2.2 perusteltiin, että kaukolämpöverkon energiatehokkuuden parantamisessa on tärkeää alentaa menoveden lämpötilaa, jolloin lämpöhäviöt pienentyvät. Menettelystä seuraa, että kaukolämpöverkon tilavuusvirtaus kasvaa, jolloin painehäviöt lisääntyvät. Tilavuusvirtauksen kasvaessa liian suureksi kaukolämpöverkon pumppujen kierrosnopeus saavuttaa maksimi-arvon, jolloin pumput eivät saa nostettua verkon painetta riittävälle tasolle. Tämän takia verkon menoveden lämpötilaa ei voi tiputtaa liian matalaksi, jotta paine saadaan pidettyä riittävän korkeana. Jos lämpötila putoaa liian matalaksi, myöskään kuluttajien käyttöveden lämpötilaa ei pystytä kasvattamaan tavoitearvoon, vaikka KL-veden virtausnopeus olisi äärettömän suuri.

Kaukolämpöverkon energiatehokkuutta saadaan parannettua, kun menoveden painetta ja lämpötilaa pienennetään. Niitä ei voi kuitenkaan pienentää liikaa, jotta kaukolämpöverkko toimisi. Paine on riittävän suuri, jos kaukolämpöverkon kuluttajien lämmönsiirtimet toimivat. Paineen suurentaminen kasvattaa pumppujen kierrosnopeutta ja lisää painehäviöitä, minkä vuoksi liian suurta painetasoa ei kannata käyttää. Pumpun kierrosnopeuden muutoksen vaikutus pumppaustehoon approksimoidaan kaavalla

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{\omega_1}{\omega_2}\right)^3, \quad (34)$$

missä P_1 ja P_2 ovat pumppaustehot kierrosnopeuksilla ω_1 ja ω_2 [28, s. 5709]. Kaavasta (34) huomataan, että pienikin kierrosnopeuden kasvu voi suurentaa pumppaustehoa merkittävästi, sillä pumppausteho muuttuu kierrosnopeuden muutoksen kuutiossa. Kun kaukolämpöverkon painetaso valitaan järkevästi, voidaan säästää huomattavasti pumppauskustannuksissa.

Sopiva painetaso kaukolämpöverkolle voidaan valita tutkimalla, miten erilaiset painetasot vaikuttavat kaukolämpöverkon kuluttajien lämmönsiirtimien toimintaan. Valinnassa huomioidaan myös painesäädön toimivuus. Hyvin toimiva painesäätö antaa mahdollisuuden pudottaa painetasoa lähemmäs sopivaa tasoa.

Menoveden lämpötila on riittävän korkea, jos kuluttajat pystyvät ottamaan kaukolämpöverkosta sen lämpöenergian, jonka ne tarvitsevat. Jos menoveden lämpötila tai paine-ero kuluttajan lämmönsiirtimen läpi on liian matala, lämmönsiirtimen säätöventtiili aukeaa vähitellen kokonaan eikä kuluttaja silloin saa riittävää lämpöenergiaa kaukolämpöverkosta. Lämmönsiirtimen säätöventtiilillä tarkoitetaan kuvan 2 venttiiliä. Menoveden lämpötila on liian matala myös silloin, jos kaukolämpöverkon tilavuusvirtaus kasvaa liian suureksi. Tällöin jokin

kaukolämpöverkon pumpuista saavuttaa maksimikierronnopeuden ja verkon painetta ei pystytä pitämään tavoitearvossa.

Kaavasta (3) voidaan laskea, miten menoveden lämpötilan alentaminen vaikuttaa putkiston lämpöhäviöihin. Kun menoveden lämpötila on T_1 , lämpöhäviö on Φ_1 ja lämpötilalla T_3 lämpöhäviö on Φ_3 . Kaavan (3) avulla saadaan lämpöhäviöiden suhteeksi

$$\frac{\Phi_1}{\Phi_3} = \frac{\frac{2\pi\lambda L}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}(T_1-T_2)}{\frac{2\pi\lambda L}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}(T_3-T_2)} = \frac{(T_1-T_2)}{(T_3-T_2)}. \quad (35)$$

Kaavasta (35) lasketaan, että alentamalla $0\text{ }^\circ\text{C}$ asteisessa ulkoilman lämpötilassa menoveden lämpötilaa $100\text{ celsiusasteesta}$ $95\text{ celsiusasteeseen}$, lämpöhäviöiden suhde on $95/100$. Vastaavassa tilanteessa lämpöhäviöt pienenevät 5% .

PGW-kaukolämpöverkossa lämpöhäviöiden osuus on merkittävän iso, koska verkko on laaja. Iso osa putkilinjasta on sijoitettu viileään ympäristöön, jolloin lämpöä johtuu enemmän putkesta ympäristöön. Kaavan (35) avulla voidaan arvioida, että alentamalla menoveden lämpötilaa muutamalla asteella, on mahdollisuus pienentää lämpöhäviöitä merkittävästi.

Kaukolämpöveden paluulämpötila on merkittävä tekijä energiatehokkuuden kannalta. Kaukolämpöverkosta saadaan energiatehokkaampi, kun paluueden lämpötilaa alennetaan. Kuluttajien lämmönsiirtimien toimivuus vaikuttaa paluueden lämpötilaan. Mitä paremmin lämmönsiirtimet mitoitetaan ja valitaan käyttökohteiden mukaan, sen suuremmaksi niiden hyötysuhde kasvaa. [33, s. 16]

Kun lämmönsiirtimen hyötysuhde paranee, sen lämmitysteho kasvaa. Suurentunut lämmitysteho kasvattaa lämmitettävän käyttöveden lämpötilaa. Lämmönsiirtimen lämpötilasäädin reagoi kasvaneeseen lämpötilaan kuristamalla kaukolämpöveden virtausta, koska säädin pyrkii pitämään lämpötilan asetusarvossa. Kaavasta (2) voidaan päätellä, että kaukolämpöveden virtausnopeuden alentuessa myös paluulämpötila pienenee, jos tulevan veden lämpötila ja lämmönsiirtimen lämmitysteho pysyvät vakioina. Parantamalla kaukolämpöverkon lämmönsiirtimien hyötysuhteita säästetään sekä pumppauskustannuksissa että lämpöhäviöissä.

Lämmönsiirtimissä voi olla vikoja, jotka pienentävät niiden hyötysuhteita. Vika voi olla kuluttajan huomattavissa, jos käyttövesi ei lämpene tarpeeksi ja lämmitettävät kohteet kylmenevät. Vika voi olla myös sellainen, jota kuluttaja ei helposti huomaa. Tällöin lämmönsiirrin siirtää kuluttajalle tarvittavan lämmön kaukolämpöverkosta, mutta huonolla hyötysuhteella. Tämän tyyppiset viat kasvattavat kaukolämpöverkon virtausmäärää ja paluueden lämpötilaa, jolloin koko kaukolämpöverkon hyötysuhde pienenee. [33, s. 18]

Tavallisimmat viat kuluttajien lämmönsiirtimissä ovat vaurioituneet säätöventtiilit, väärin valitut parametrit venttiilien säätimissä sekä väärin mitoitettut tai väärän tyyppiset lämmönsiirtimet [33, s. 18]. Jotta tällaiset viat huomattaisiin, tarvitaan kaukolämpöveden lämpötilan mittaus lämmönsiirtimen jälkeen ja säätöventtiilin asentotieto. Seuraamalla edellä mainittuja mittauksia voidaan lämmönsiirtimen vikaantuminen havaita hyvissä ajoin. Jos mittaukset alkavat poiketa merkittävästi aikaisemmista mittauksista ilman selvää syytä, se voi olla merkki lämmönsiirtimen vioittumisesta.

3.4.1 IK-haaran ajotapojen kehittäminen

IK-haaran menoveden lämpötilaa ei voida alentaa shunttipiirin vaatimuksia (kuva 17) alemmaksi, koska Stora Ensolla on sopimus, että shunttipiirin lämpötilan tulee olla tietyllä tasolla ulkoilman lämpötilasta riippuen.

IK-haaran painetasovaatimuksen määrittelee pelkästään IK:n ja AP:n välinen asuinalue, joka vaatii muita kuluttajia selvästi suuremman paineen toimiakseen. Asuinalueen painevaatimuksen syy esitetään kuvassa 15. IK-haaran painesäädön asetusarvo on ollut aikaisemmin noin 5,8 bar. Jos IK-haaran lämpötilaa alennetaan, painetasoa joudutaan nostamaan, jotta asuinalue saa kaukolämpöverkosta tarvitsemansa lämpöenergian.

IK-haaran ajotapoja pystytään kehittämään säätämällä menoveden lämpötila mahdollisimman lähelle shunttipiirin vaatimusta, jolloin lämpöhäviöt pienenevät. Paineen asetusarvo nostetaan riittävän korkeaksi, jotta asuinalue saa tarvitsemansa lämpöenergian. Paineen asetusarvon nostossa tulee huomioida IK-haaraan pumppaavan pumpun kierrosnopeus, joka ei saa nousta liian lähelle maksimirajaa. Jos kierrosnopeus on liian lähellä maksimirajaa, kaukolämpöveden kulutuksen kasvaessa pumppu ei kykene pitämään painetta asetusarvossa.

Menoveden lämpötilalle voidaan etsiä sopiva asetusarvo haravoimalla arvoja läheltä shunttipiirin tavoitelämpötilaa. Haravointi tapahtuu siten, että ensin kokeillaan hieman shunttipiirin tavoitetta suurempaa arvoa. Painesäätö valitaan asuinalueen mukaan, kuten edellisessä kappaleessa selitetään. Jos IK-haaran pumpun kierrosnopeus ylittää haravoinnille asetetun tavoiterajan, nostetaan menoveden lämpötilan asetusarvoa vähän ja haravoidaan uudestaan. Haravointia jatketaan niin kauan, kunnes pumpun kierrosnopeus asettuu tavoiterajan alapuolelle. Ulkolämpötilan muuttuessa shunttipiirin tavoitelämpötila muuttuu, jolloin haravointi tulee suorittaa uudestaan.

Haravointi kannattaa toistaa esimerkiksi ulkolämpötilan muuttuessa kolmen asteen välein. Haravointipisteiden väliset alueet voidaan interpoloida lineaarisesti, jolloin jokaista ulkolämpötilaa vastaavaa tavoitelämpötilaa menovedelle ei tarvitse erikseen haravoida. Haravoinnin tuloksena saadaan kuvan 16 kaltainen funktio, jossa funktion arvot ovat lähempänä shunttipiirin arvoja.

Haravoinnissa sopivan tavoitearvon määrittäminen pumpun kierrosnopeudelle vaatii käyttökokemusta kaukolämpöverkosta, jotta nähdään miten paljon IK-haaran kaukolämpöveden kulutus vaihtelee päivittäin. Vaihteleva kulutus vaikuttaa pumpun kierrosnopeuteen. Kierrosnopeuden tavoitearvo kannattaa valita siten, ettei suurillakaan kaukolämpöveden kulutuspiikeillä pumpun kierrosnopeus kasva maksimiin.

Kuvassa 18 esitetään IK-haarassa olevan LS3:n vaikutus kaukolämpöverkon toimintaan. LS3 aiheuttaa hyvin suuren piikin kaukolämpöveden virtaukseen ja pumpun kierrosnopeuteen. Jos LS3 otetaan käyttöön, tässä luvussa esitelty menetelmä ajotapojen parantamisesta ei toimi. LS3 nostaa hetkellisen kaukolämpöveden kulutuksen liian suureksi, jolloin pumpun kierrosnopeus kasvaa maksimiin. LS3 otetaan käyttöön harvoin, joten sen käyttö on poikkeustilanne.

LS3:n vaikutuksen kompensoimiseksi voidaan suunnitella kytkentälogiikka, joka aktivoituu kun LS3 otetaan käyttöön. Aktivoitumisen seurauksena logiikka vaihtaa menoveden lämpötilasäädön asetusarvoksi joitakin asteita korkeamman lämpötilan ja samalla pudottaa painesäädön asetusarvoa. Koska menoveden lämpötilaa kasvatetaan, asuinalue saa riittävän lämpöenergian matalammalla paineella, jolloin painetta voidaan alentaa.

Sopiva lämpötilatason nosto ja painetaso lasku voidaan selvittää testaamalla. LS3:n käyttöönotto on säädetty hitaaksi, jolloin uudet lämpötila- ja painetasot ehtivät vaikuttaa pumpun kierrosnopeuteen ennen LS3:n vaikutusta. Lämpötilatason nosto vähentää kaukolämpöveden virtausta, jolloin pumpun kierrosnopeus vähenee. Kun lämpötilatasoa nostetaan ja painetasoa alennetaan sopivasti, pumppu pystyy pitämään paineen asetusarvossa, vaikka LS3 on käytössä.

3.4.2 AP-haaran ajotapojen kehittäminen

AP-haaran menoveden ja painetaso säättämisessä voidaan hyödyntää lämmönsiirtimien säätöventtiilien asentotietoja sekä lämmönsiirtimien jälkeen mitattuja kaukolämmön paluuv veden lämpötiloja. Venttiilien asentotietojen perusteella voidaan tarkkailla, ovatko kuluttajat saaneet kaukolämpöverkosta tarvitsemansa lämpöenergian. Jos säätöventtiili avautuu 100 %:n tilaan, kuluttaja ei saa riittävästi lämpöenergiaa. Tällöin kaukolämpöverkon paine tai lämpötila on liian matala. Paluuv veden lämpötilojen avulla voidaan tarkkailla, miten lämmönsiirtimet toimivat ja havaita niiden vikaantumiset.

AP-haaran painetaso kannattaa säätää mahdollisimman matalaksi, jotta pumppujen käyttämä teho olisi mahdollisimman alhainen. Toisaalta painetaso on oltava riittävän korkea, jotta kaukolämpövesi virtaisi kaikkien piirissä olevien lämmönsiirtimien läpi. Sopiva painetaso voidaan selvittää testaamalla. Myös kaukolämpöveden lämpötilan on oltava riittävän korkea, kun painetasoa testataan. Tällä tavalla varmistetaan, että jos lämmönsiirtimen säätöventtiili aukeaa 100 %:n tilaan, se johtuu liian matalasta paineesta

eikä lämpötilasta. Kun kriittinen painetaso selviää, valitaan kaukolämpöverkon painetasoksi jonkin verran kriittistä tasoa suurempi paine. Näin varmistetaan, että paineen hetkellinen aleneminen ei aiheuta lämmönsiirrossa ongelmia.

Sopiva lämpötilataso AP-haaralle voidaan määritellä ulkolämpötilan funktiona, kuten aikaisemminkin on tehty. Vanhoja arvoja voidaan pienentää hyödyntämällä lämmönsiirtimien säätöventtiilien asentotietoja. AP-haaran lämpötilatavoite kannattaa laskea mahdollisimman alhaiseksi huomioiden, että lämmönsiirtimien säätöventtiilit eivät avautuisi kokonaan. AP-haaran pumpun kierrosnopeus ei saa myöskään kasvaa maksimiin.

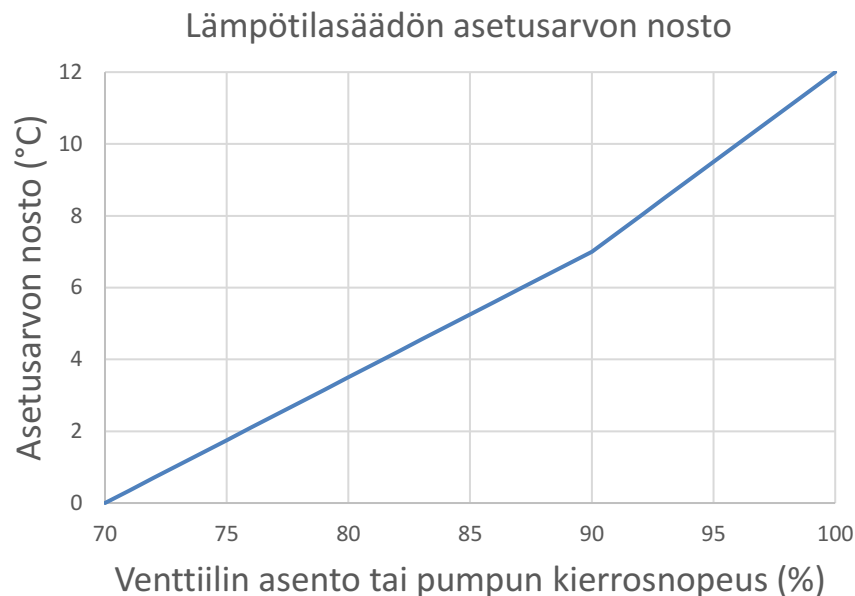
AP-haaran lämpötilan asetusarvon perustaso valitaan ulkolämpötilafunktiosta. Perustaso valitaan siten, että normaalilla AP-haaran kaukolämpöveden kulutuksella kaikki lämmönsiirtimien säätöventtiilit ovat alle 70 % auki ja pumpun kierrosnopeus asettuu 70 %:n alapuolelle. 70 %:n raja valitaan alustavasti, koska silloin säätöventtiileillä ja pumpulla on säätövaraa vähintään 30 %. Säätövaraa tarvitaan, jos kaukolämpöveden kulutus kasvaa. Kulutuksen kasvaessa venttiilit aukeavat lisää ja pumpun kierrosnopeus kasvaa. Jos kaukolämpöveden lämpötilaa ei lisätä, voi kaukolämpöverkon kulutuksen kasvu aiheuttaa säätöventtiilien avautumisen 100 %:n tilaan tai pumpun kierrosnopeuden kasvun maksiminopeuteen. Näiltä ongelmilta vältytään, jos nostetaan kaukolämpöveden lämpötilaa samalla kun sen kulutus kasvaa.

AP-haaran lämpötilasäädön asetusarvo määritellään siten, että sen perustaso valitaan ulkolämpötilafunktiosta. Kaukolämpöveden kulutuksen kasvaessa asetusarvon perustasaan tehdään lisäys, joka määritellään lämmönsiirtimien venttiilitietojen ja pumpun kierrosnopeuden perusteella. Lämpötilan asetusarvon nostamisella vastataan kasvaneeseen kaukolämpöveden kulutukseen, johon pelkkä perustaso ei riitä.

Kaukolämpöveden kulutuksen kehittymistä voidaan mitata lämmönsiirtimien venttiilien asentotiedoilla sekä pumpun kierrosnopeudella. Kun venttiilit avautuvat tai pumpun kierrosnopeus kasvaa, kaukolämpöveden kulutus suurenee. Tämän vuoksi lämpötilasäädön asetusarvon perustasaan tuleva lisäys tehdään venttiilien asentotietojen sekä pumpun kierrosnopeuden perusteella. Lämpötilasäädön asetusarvon perustason valinnassa tavoitteena on, että venttiilien asennot ja pumpun kierrosnopeus ovat alle 70 %:n tilassa. Kun jonkin AP-haaran kuluttajan lämmönsiirtimen venttiilin asento tai pumpun kierrosnopeus ylittää 70 %:n tilan, lämpötilasäädön asetusarvoon tehdään lisäys.

Lisäys toteutetaan funktiolla, jossa syöteenä on AP-haaran lämmönsiirtimien venttiilien suurin asentotieto tai pumpun kierrosnopeus ja ulostulona on lämpötilamuutos, joka lisätään perustasaan. Funktion syötteeksi valitaan venttiilien suurin asentotieto, koska kaukolämpöverkon on tuotettava tarvittava lämpöenergia kaikille kuluttajille. Venttiili, jolla on suurin asentotieto, on sillä hetkellä kriittisin kuluttaja kaukolämpöverkossa, jolloin se määrittelee kaukolämpöverkon vaatimuksen. Funktion syötteeksi valitaan

suurin asentotieto tai pumpun kierrosnopeus riippuen siitä, kumpi muuttujista on suurempi valintahetkellä. Lämpötilatason kasvattamisella pyritään estämään lämmönsiirtimien venttiilien avautuminen kokonaan tai pumpun maksimikierrosnopeuden saavuttaminen. Menetelmällä mahdollistetaan, että kaikki AP-haaran kuluttajat saavat kaukolämpöverkosta tarvitsemansa lämpöenergian. Funktio esitetään kuvassa 41.



Kuva 41. AP-haaran lämpötilasäädön asetusarvon nosto kaukolämpöveden kulutuksen funktiona.

Kuvan 41 funktion käytössä täytyy huomioida, että lämmönsiirrossa on viivettä, mikä selitettiin luvussa 2.2.3. Viiveen takia kaukolämpöveden lämpötilan muuttaminen vaikuttaa lämmönsiirtimien venttiilien asentoihin vasta jonkin ajan kuluessa. Viiveen pituus vaihtelee virtausmäärän mukaan. Viive voi haitata funktion käyttöä, jos venttiilit on säädetty toimimaan nopeasti verrattuna viiveen pituuteen. Ongelma ilmenee esimerkiksi, kun jokin kuluttaja tarvitsee lämpöenergiaa lisää. Silloin kuluttajan lämmönsiirtimen säätöventtiili avautuu enemmän. Kun venttiili avautuu yli 70 %:n tilaan, kaukolämpöveden lämpötila alkaa nousta kuvan 41 funktion mukaan. Jos venttiili avautuu nopeasti, myös lämpötilan asetusarvo kasvaa nopeasti. Nopeasta venttiilin avautumisesta johtuen kaukolämpöveden lämpötila saattaa nousta liian korkeaksi, koska lämpötilatason nosto vaikuttaa venttiilin asentoon vasta viiveen kuluttua.

Funktiota käytettäessä viiveen vaikutusta voidaan kompensoida hidastamalla säätöventtiileitä, jos käyttökohteet sen mahdollistavat. Toinen vaihtoehto on, että funktiosta luetaan uusi arvo viivästettynä, jolloin säätöventtiilit ehtivät reagoimaan edelliseen lämpötilamuutokseen ennen kuin uusi funktion arvo luetaan. Funktion arvon viivästämisen huono puoli on se, että myös lämpöenergian siirtäminen viivästyy.

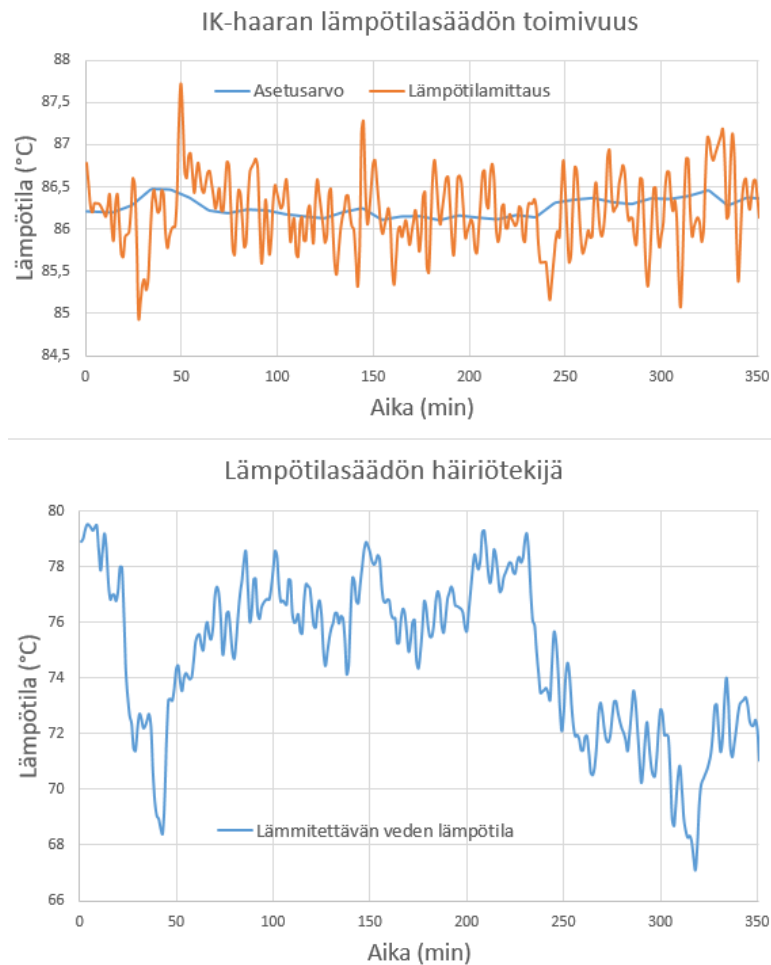
AP-haaran kuluttajat ovat erilaisia keskenään, jolloin niiden vaatimat kaukolämpöveden virtausmäärätkin vaihtelevat. Tästä syystä kuvan 41 kaltainen funktio kannattaa luoda erikseen kaikille AP-haaran lämmönsiirtimien venttiileille. Funktioiden arvot voidaan kokemusten lisääntyessä määritellä sopivaksi kaikille kuluttajille, jolloin AP-haaran energiatehokkuutta saadaan parannettua.

4. TULOKSET

Tässä luvussa esitetään tulokset, miten työn aikana uusitut säätömenetelmät toimivat verrattuna alkuperäisiin menetelmiin. Uusittuja säätömenetelmiä on testattu IK-haaran kaukolämpöveden lämpötila- ja painesäädöissä sekä AP-haaran kaukolämpöveden painesäädössä. Luvussa esitetään myös tulokset, miten tehtaan kaukolämpöverkon energiatehokkuus on kehittynyt tämän työn aikana.

4.1 IK-haaran lämpötilasäädön kehittyminen

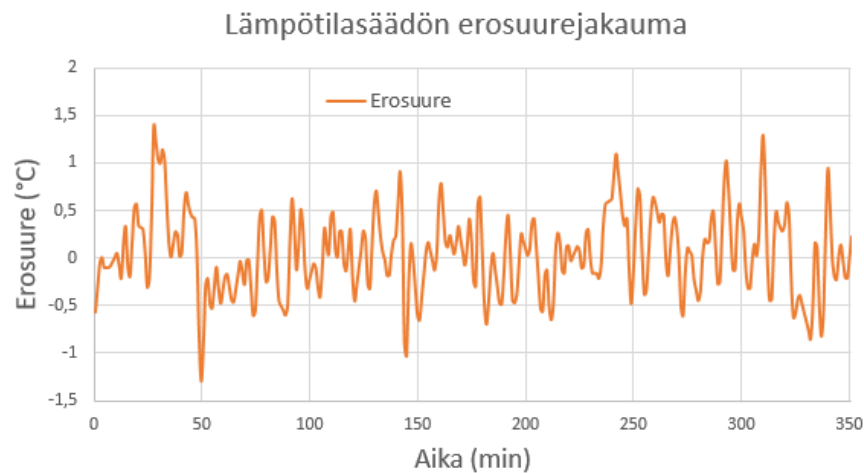
IK-haaran alkuperäiseen lämpötilasäätöön lisättiin kaskadisäätö ja myötäkytkentä, kuten luvussa 3.2.4 esitettiin. Kuva 28 havainnollistaa, miten uusi säätömenetelmä toteutettiin ja kuva 22, miten vanha menetelmä oli toteutettu. Kuvassa 42 esitetään, miten uusi säätömenetelmä toimii.



Kuva 42. IK-haaran lämpötilasäädön toimivuus uudella säätömenetelmällä. Alemmassa kuvaajassa on lämmönsiirtimelle tulevan veden lämpötilä, jonka vaihtelevuus häiritsee lämpötilasäätöä.

Kuvassa 42 ylempi kuvaaja esittää, miten uudella menetelmällä säädetty IK-haaran kaukolämpöveden lämpötila seuraa säädön asetusarvoa. Samalta aikaväliltä on mitattu myös lämmönsiirtimelle tulevan veden lämpötila, joka esitetään kuvan 42 alemmassa kuvaajassa. Lämmönsiirtimelle tulevan veden lämpötilan vaihtelut häiritsevät lämpötilasäätöä. Häiriöiden vaikutukset näkyvät kuvassa 42 lämmönsiirtimeltä lähtevän veden lämpötilan värähtelynä. Mitä vähemmän säädetty lämpötila värähtelee, sen paremmin säätö toimii.

Otosvarianssilla voidaan kuvata, miten tutkittava jakauma on jakautunut sen keskiarvon ympäristöön. Mitä suurempi otosvarianssi on, sitä enemmän tutkittavan jakauman arvot poikkeavat keskiarvosta. [34] Säädön tavoite on, että sen erosuure olisi mahdollisimman lähellä nollaa, jolloin säädön toimivuutta voidaan arvioida erosuurejakauman otosvarianssin avulla. Mitä pienempi otosvarianssi on, sen paremmin säätö toimii. Hyödyntämällä kuvan 42 mittausdataa voidaan erosuurejakauma määrittää vähentämällä lämpötilamittaus asetusarvosta. Erosuurejakauma esitetään kuvassa 43.



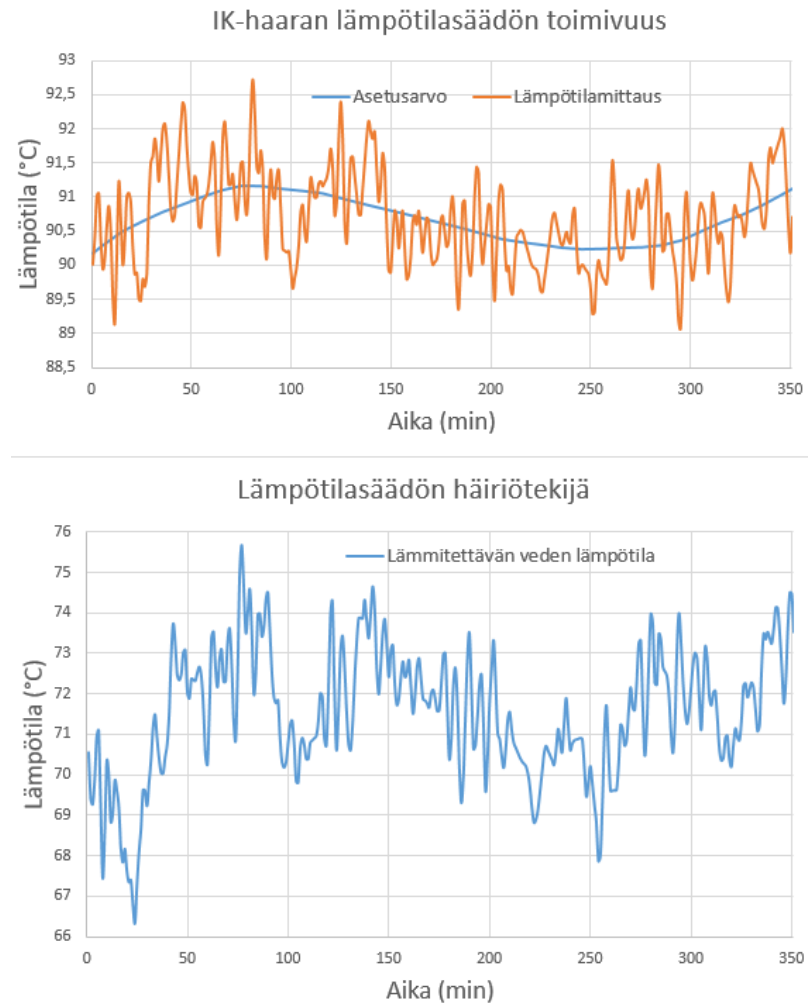
Kuva 43. IK-haaran lämpötilasäädön erosuurejakauma. Säätö on toteutettu uudella menetelmällä ja erosuurejakauma on muodostettu kuvan 42 asetusarvon ja lämpötilamittauksen erotuksesta.

Otosvarianssi lasketaan kaavalla

$$var = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}{N-1}, \quad (36)$$

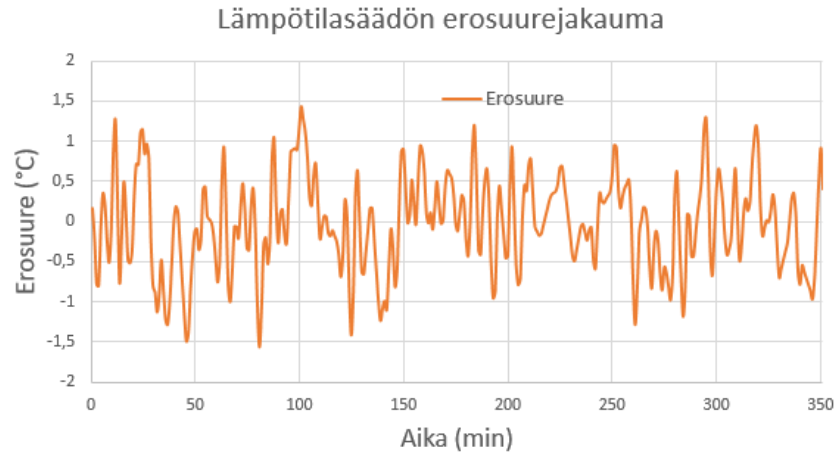
missä X_i on jakauman yksittäisen mittauksen arvo, \bar{X} on jakauman keskiarvo ja N on jakauman otosten lukumäärä. [34] Otosvarianssi voidaan laskea esimerkiksi Excelin VAR.S-funktiolla. Kuvan 43 erosuurejakauman otosvarianssiksi saadaan noin 0,176.

Kuvassa 44 esitetään, miten vanha säätömenetelmä on toiminut.



Kuva 44. *IK-haaran lämpötilasäädön toimivuus vanhalla säätömenetelmällä. Alemmassa kuvaajassa on lämmönsiirtimelle tulevan veden lämpötila, jonka vaihtelevuus häiritsee lämpötilasäätöä.*

Kuvan 44 mittausdatasta saadaan vanhalla menetelmällä toteutetun lämpötilasäädön erosuurejakauma, joka esitetään kuvassa 45.



Kuva 45. IK-haaran lämpötilasäädön erosuurejakauma vanhalla säätömenetelmällä.

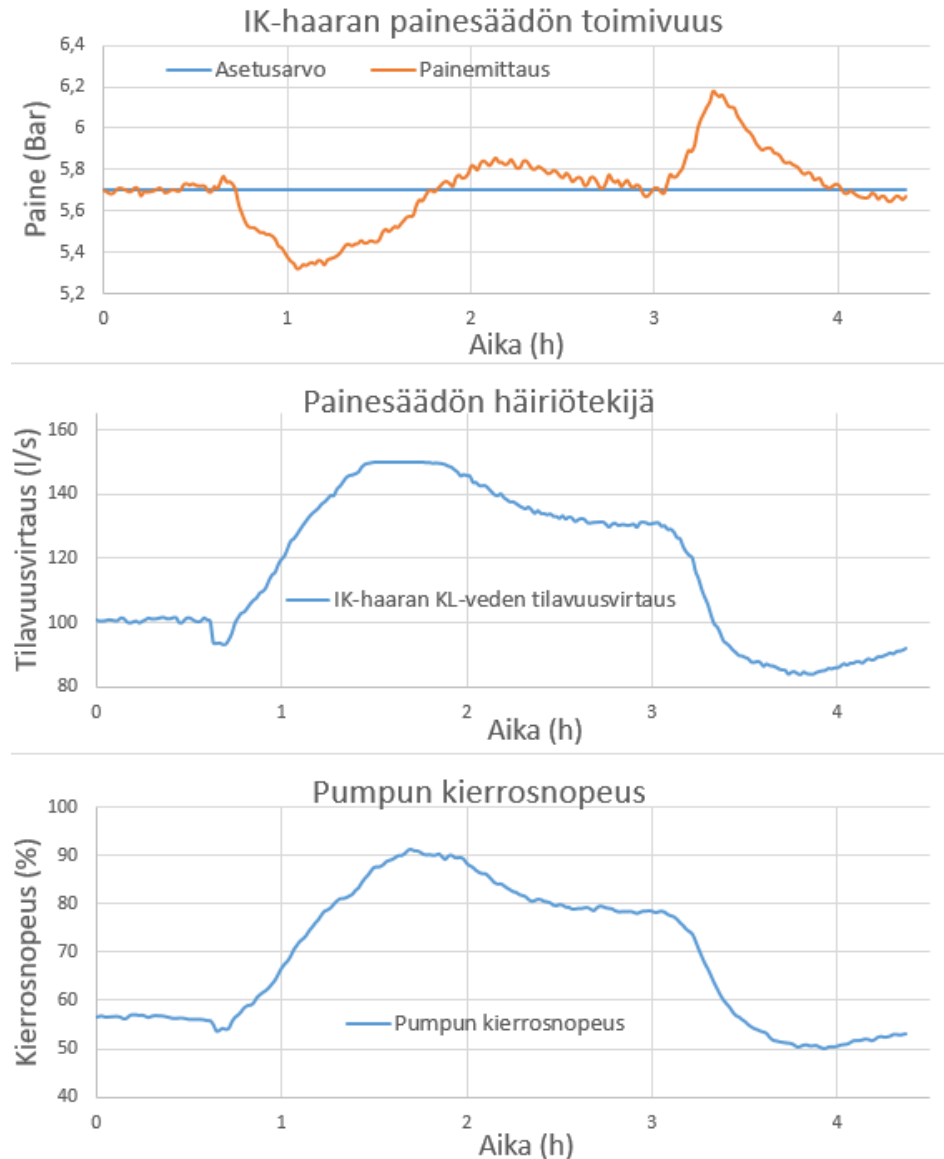
Kuvan 45 erosuurejakauman otosvarianssiksi saadaan kaavalla (36) noin 0,340. Kuvien 42 ja 44 mittausdatat on valittu siten, että vanhan ja uuden säätömenetelmän vertailussa häiriötekijät olisivat keskenään samaa suuruusluokkaa, jolloin säätömenetelmien paremmuutta voidaan vertailla luotettavammin.

Vertaamalla uuden ja vanhan säätömenetelmän erosuurejakaumien otosvariansseja toisiinsa todetaan, että uudella menetelmällä otosvarianssi on pienempi. Tämä osoittaa, että hyödyntämällä kaskadisäätöä ja myötäkytkentää kaukolämpöveden lämpötilan säädössä saadaan säädöstä parempi verrattuna pelkällä negatiivisella takaisinkytkennällä toteutettuun säätöön. Samaan lopputulokseen oli päästy myös kirjallisuuslähteissä, jotka esitettiin johdantoluvussa 1.3.

4.2 IK-haaran painesäädön kehittyminen

IK-haaran alkuperäiseen painesäätöön lisättiin myötäkytkentä, jonka avulla kompensoidaan kaukolämpöveden virtauksen vaihtelusta johtuvaa häiriötä paineeseen. AP-haaran painesäätö toteutettiin samalla tavalla. Tässä luvussa verrataan, miten IK-haaran painesäätö on kehittynyt suhteessa alkuperäiseen säätöön.

Uusi säätömenetelmä esitettiin kuvassa 39, jossa negatiivisella takaisinkytkennällä toteutettuun alkuperäiseen säätömenetelmään on lisätty myötäkytkentäalgoritmi. Kuvassa 46 havainnollistetaan, miten painesäätö toimii uudella säätömenetelmällä.



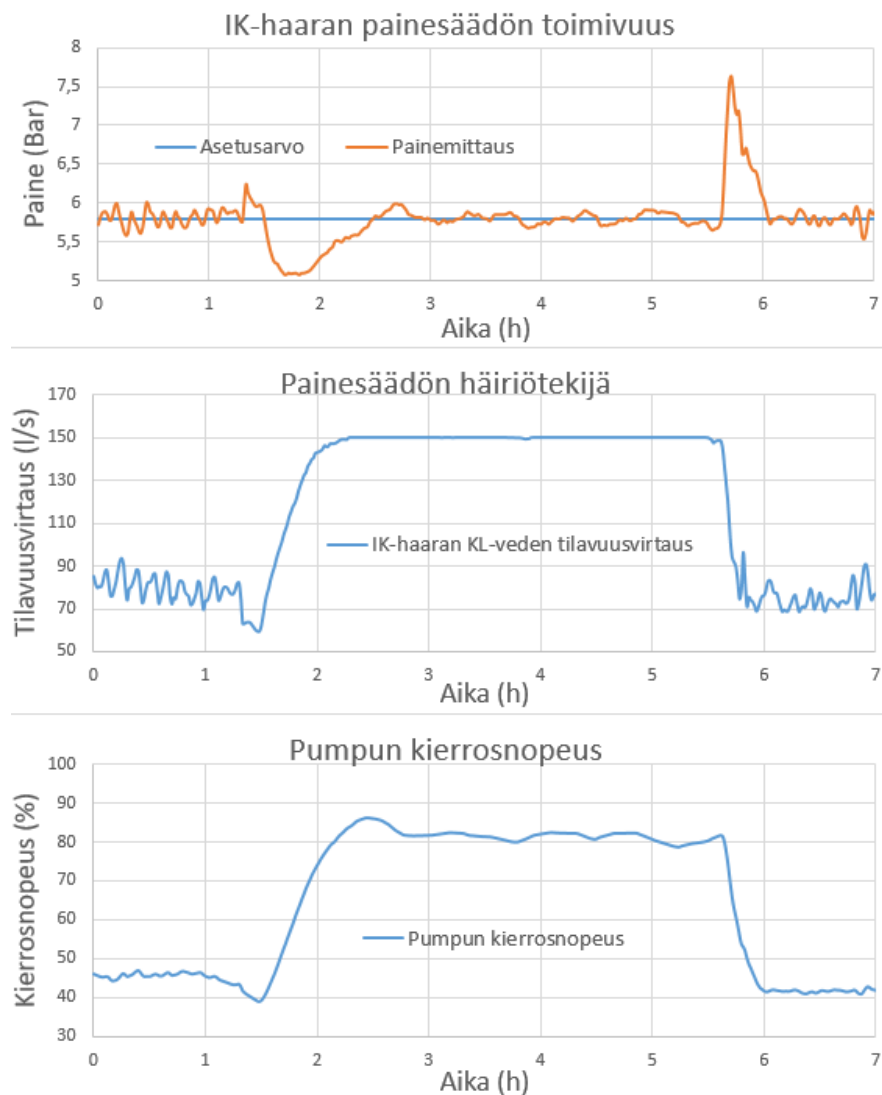
Kuva 46. IK-haaran painesäädön toimivuus uudella säätömenetelmällä. Alimmassa kuvaajassa on säädön ohjaus eli pumpun kierrosnopeus. Keskimmäisessä kuvaajassa on säätöä häiritsevä KL-veden tilavuusvirtaus. Ylimmässä kuvaajassa on painesäädön asetusarvo ja painemittaus.

Kuvasta 46 huomataan, että myötäkystennästä huolimatta säädön häiriöitä ei pystytä kompensoimaan kokonaan. Esimerkiksi kaukolämpöverkon venttiilin nopea avautuminen aiheuttaa paineen äkillisen alenemisen, johon säätö ei ehdi reagoida riittävän nopeasti. Säädin reagoi häiriöihin vasta sen jälkeen, kun tilavuusvirtausmittaus tai painemittaus muuttuu.

Myötäkystennän korjauskerrointa voidaan kasvattaa, jolloin säätö reagoi nopeammin tilavuusvirtauksen muutokseen. Korjauskertoimen liika kasvattaminen voi aiheuttaa tilanteen, jossa virtauksen kasvaessa myös paine alkaa kasvaa. Kertoimen valinnassa täytyy huomioida, että pumpun kierrosnopeudesta riippuen tilavuusvirtauksen muutos vaikuttaa eri tavalla pumpun paine-eroon, mikä osoitetaan myös kuvassa 12 ja kaavassa

(23). Myötäkytkennän korjauskerrointa valittaessa voidaan hyödyntää Gain-schedulointia, jonka avulla korjauskerrointa muutetaan pumpun kierrosnopeuden funktiona. Gain-scheduloinnin avulla myötäkytkennän positiivista vaikutusta säätöön voidaan tehostaa, kun korjauskerroin on sopiva koko pumpun toiminta-alueella.

Kuvassa 47 esitetään, miten vanha säätömenetelmä toimi. Vanhassa säätömenetelmässä ei ollut myötäkytkentää.



Kuva 47. IK-haaran painesäädön toimivuus vanhalla säätömenetelmällä. Alimmassa kuvaajassa on säädön ohjaus eli pumpun kierrosnopeus. Keskimmaisessä kuvaajassa on säätöä häiritsevä KL-veden tilavuusvirtaus. Ylimmässä kuvaajassa on painesäädön asetussarvo ja painemittaus.

Vertailemalla kuvia 46 ja 47 huomataan, että kuvassa 47 pumpun kierrosnopeus ei seuraa tilavuusvirtausta yhtä nopeasti kuin kuvassa 46. Kuvassa 47 kasvava tilavuusvirtaus pienentää paineen huomattavasti alhaisemmaksi kuin kuvassa 46, koska kuvan 47 säätömenetelmässä ei ole myötäkytkentää kompensoimassa tilavuusvirtausta.

Kuvat 46 ja 47 osoittavat, että myötäkystennän avulla painesäädöstä saadaan huomattavasti parempi. Samaan lopputulokseen päädyttiin myös kaavan (25) avulla.

4.3 Kaukolämpöverkon energiatehokkuuden kehittyminen

Tämän työn perimmäinen tavoite oli tehtaan kaukolämpöverkon energiatehokkuuden kehittäminen höyryn kulutusta vähentämällä. Tehtaan kaukolämpöverkon tuottama lämpöteho koostuu lämmön talteenottotehosta ja höyryllä tuotetusta lämpötehosta. Energiatehokkuus paranee, jos lämpötehon kokonaistuottoa vähennetään tai lämmöntalteenottotehoa lisätään, jolloin höyryllä tuotetun lämpötehon osuus pienenee.

Ulkolämpötila vaikuttaa merkittävästi kaukolämpöverkon tehotarpeeseen. Jotta energiatehokkuuden kehittymistä voidaan tutkia, täytyy huomioida myös ulkolämpötilan vaikutus. Energiatehokkuuden kehitystä voidaan tutkia tekemällä kaukolämpöverkon tehon tuotoista taulukot ja kuvaajat, joiden avulla kuvataan tilannetta projektin aikana ja ennen projektia. Vertailemalla taulukoita ja kuvaajia keskenään, voidaan arvioida mihin suuntaan energiatehokkuus on kehittynyt. Taulukoissa ja kuvaajissa on laskettu tehon tuotto ulkolämpötilan funktiona.

Taulukossa 3 esitetään, miten ulkolämpötila on vaikuttanut 7.11.2016–7.4.2017 välisenä aikana tehtaan kaukolämpöverkon lämmöntalteenottotehoon, höyrylämmitystehoon ja paluuvien lämpötilaan sekä tilavuusvirtaukseen.

Taulukko 3. KL-verkon lämmitystehojakauma ja paluuvien lämpötila sekä tilavuusvirtaus ulkolämpötilan funktiona. Tulokset kuvastavat KL-verkon tilannetta ennen projektia.

Tout	Otos(h)	P(LTO)	P(LS4)	P(LS2)	P(TMP-h)	P(h)	P	Tpal	F
-9	5	9,2	4,7	5,3	1,3	11,3	20,5	65,5	187,4
-8	8	9,0	4,3	5,1	1,2	10,6	19,5	65,2	180,6
-7	20	9,6	4,3	4,5	1,2	10,0	19,6	63,5	173,6
-6	58	9,9	3,8	5,2	1,2	10,1	20,0	62,4	174,3
-5	78	9,9	3,9	4,5	0,8	9,2	19,1	61,6	170,0
-4	113	9,1	4,2	4,9	1,0	10,0	19,2	60,5	168,8
-3	90	9,6	3,3	4,8	0,7	8,8	18,4	60,2	163,3
-2	92	9,5	3,7	3,5	0,3	7,5	17,0	59,1	153,4
-1	119	10,4	3,2	2,4	0,5	6,1	16,5	58,1	145,2
0	146	10,4	3,0	2,4	0,4	5,7	16,1	56,8	141,5
1	231	10,3	3,0	2,3	0,3	5,6	15,8	55,2	135,6
2	316	10,5	2,4	2,2	0,3	4,9	15,4	54,6	132,9
3	238	11,4	1,8	1,8	0,3	3,9	15,3	53,4	129,1
4	151	10,9	1,5	2,2	0,2	3,9	14,8	53,0	122,0

Taulukossa 3 Tout tarkoittaa ulkoilman lämpötilaa. Otos kuvastaa mittausten lukumäärää, joita on käytetty samalla rivillä olevien arvojen määrittämiseen. Taulukossa olevat arvot ovat otosten keskiarvoja. P(LTO) tarkoittaa PGW-piirin lämmöntalteenottotehoa. P(LS4) ja P(LS2) tarkoittavat LS4- ja LS2-höyrylämmönsiirtimien tehoja. P(TMP-h) tarkoittaa TMP-piirin höyrylämmönsiirtimien kokonaistehoa. P(h) tarkoittaa koko tehtaan KL-verkon höyrylämmönsiirtimien kokonaistehoa ja P kokonaislämmitystehoa, johon on laskettu yhteen PGW-piirin lämmöntalteenottoteho ja kaikkien höyrylämmönsiirtimien lämmitystehot. Tpal tarkoittaa paluuveden lämpötilaa ja F tilavuusvirtausta. Taulukossa olevien tehojen yksikkö on MW, lämpötilojen yksikkö °C ja tilavuusvirtauksien yksikkö l/s.

Taulukossa 4 esitetään muuten samat asiat kuin taulukossa 3, mutta tarkasteltava ajankohta on 7.11.2017–8.2.2018. Taulukko 4 kuvaa tilannetta, jossa kaikki projektin aikana tehdyt muutokset kaukolämpöverkkoon on tehty.

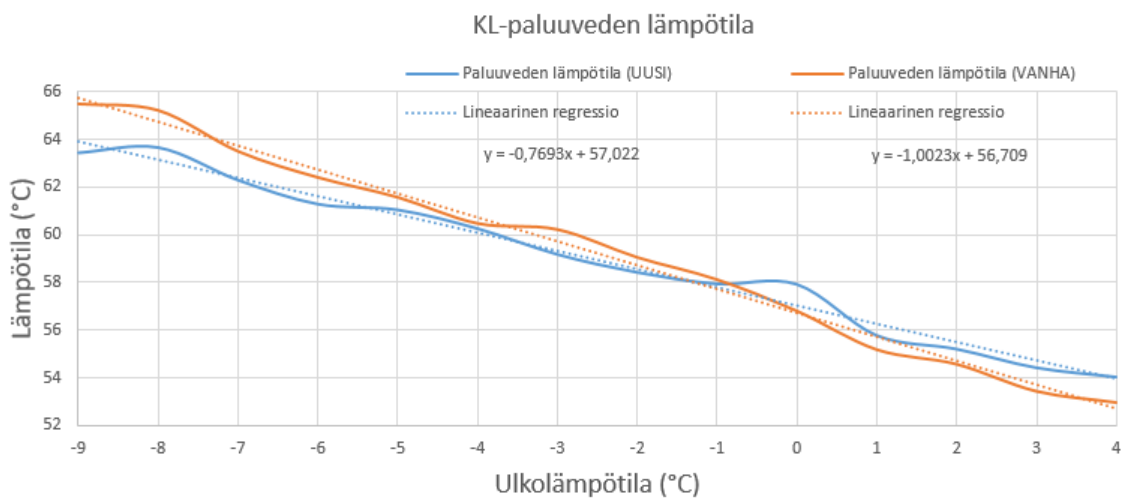
***Taulukko 4.** KL-verkon lämmitystehojakauma ja paluuveden lämpötila sekä tilavuusvirtaus ulkolämpötilan funktiona. Tulokset kuvastavat KL-verkon tilannetta projektissa tehtyjen muutosten jälkeen.*

Tout	Otos(h)	P(LTO)	P(LS4)	P(LS2)	P(TMP-h)	P(h)	P	Tpal	F
-9	23	10,4	3,9	3,4	1,1	8,4	18,8	63,5	181,4
-8	24	11,3	3,0	2,2	0,7	5,9	17,2	63,7	174,1
-7	22	10,8	3,2	2,7	0,5	6,5	17,2	62,3	171,4
-6	30	9,7	3,5	3,5	0,5	7,5	17,2	61,3	171,0
-5	54	9,5	3,1	3,1	0,4	6,6	16,1	61,1	163,9
-4	59	10,3	2,7	2,7	0,3	5,7	15,9	60,3	162,3
-3	63	9,5	3,1	3,5	0,2	6,8	16,3	59,2	165,4
-2	75	10,7	2,6	2,6	0,1	5,3	16,0	58,4	158,2
-1	52	11,6	2,2	2,3	0,2	4,7	16,3	58,0	153,7
0	92	13,5	1,1	1,1	0,3	2,5	16,0	57,9	141,8
1	191	13,9	1,0	1,2	0,2	2,4	16,3	55,8	128,7
2	262	12,7	1,1	1,3	0,3	2,7	15,4	55,2	121,7
3	209	13,5	0,8	1,0	0,2	2,0	15,5	54,4	118,7
4	234	13,6	0,4	0,5	0,0	0,9	14,5	54,1	108,5

Taulukoiden 3 ja 4 tärkeimmät muuttujat energiatehokkuuden vertailussa ovat lämmöntalteenottoteho, höyrylämmitysteho, kokonaislämmitysteho sekä paluuveden lämpötila ja tilavuusvirtaus. Näiden muuttujien kehitystä projektin aikana vertaillaan kuvissa 48–53. Taulukoiden 3 ja 4 datoista on poistettu niiden aikavälien vaikutukset, jolloin kaukolämpöverkossa on ollut poikkeustilanne. Poikkeustilanteita ovat LS3:n käyttö, lämmöntalteenottimien huoltotyöt, kombilaitoksen käyttö ja tehtaan seisokit. Poikkeustilanteiden vaikutukset poistettiin, jotta sattuman vaikutus taulukoiden arvoihin saatiin pienemmäksi.

Kuvissa 48–53 on piirretty katkoviivalla lineaariset regressiomallit, jotka esittävät taulukoiden 3 ja 4 avulla tehdyt kuvaajat lineaarisesti. Lineaarinen regressiomalli muodostetaan pienimmän neliösumman menetelmällä, jossa minimoidaan regressiomallin ja mallinnettavan kuvaajan välisten residuaalien eli jäännösvirheiden neliöiden summa. Minimoinnin seurauksena regressiomalli kuvaa mallinnettavaa kuvaajaa optimaalisella tarkkuudella. Optimaalisella tarkoitetaan tässä sitä, ettei millään muulla suoralla pystytä mallintamaan kuvaajaa tarkemmin. [35] Kuvissa 48–53 sinisellä värillä olevat kuvaajat esittävät KL-verkon muutosten jälkeistä tilannetta ja punaisella värillä alkuperäistä tilannetta.

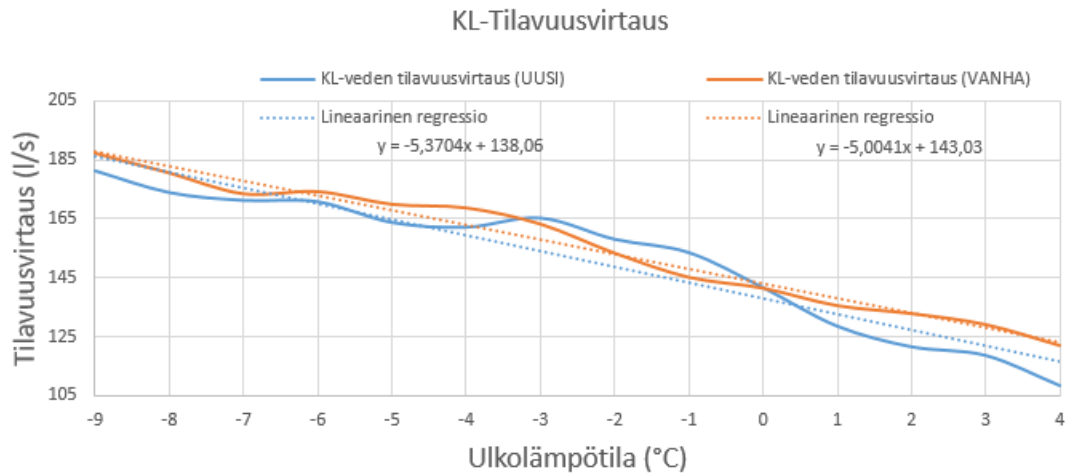
Kuvassa 48 esitetään, miten projektissa tehdyt muutokset kaukolämpöverkkoon näkyvät paluuvien lämpötilassa.



Kuva 48. Kaukolämpöverkon paluuvien lämpötilojen vertailu ulkolämpötilan funktiona. Sininen käyrä kuvaa taulukon 4 ja punainen käyrä taulukon 3 tilannetta.

Kuvasta 48 voidaan päätellä, että mitä kylmempi ulkolämpötila on ollut, sen enemmän paluuvien lämpötila on pudonnut projektin aikana verrattuna ajankohtaan ennen projektia. Tästä voidaan päätellä kaavan (2) avulla, että paluulämpötilan pienentyessä ja tilavuusvirtauksen ollessa vakio, voidaan tuottaa yhtä suuri teho pienemmällä menoveden lämpötilalla. Kuvan 48 perusteella kaukolämpöverkon energiatehokkuus on kehittynyt kylmemmillä ulkolämpötiloilla, koska paluuvien lämpötila on pudonnut.

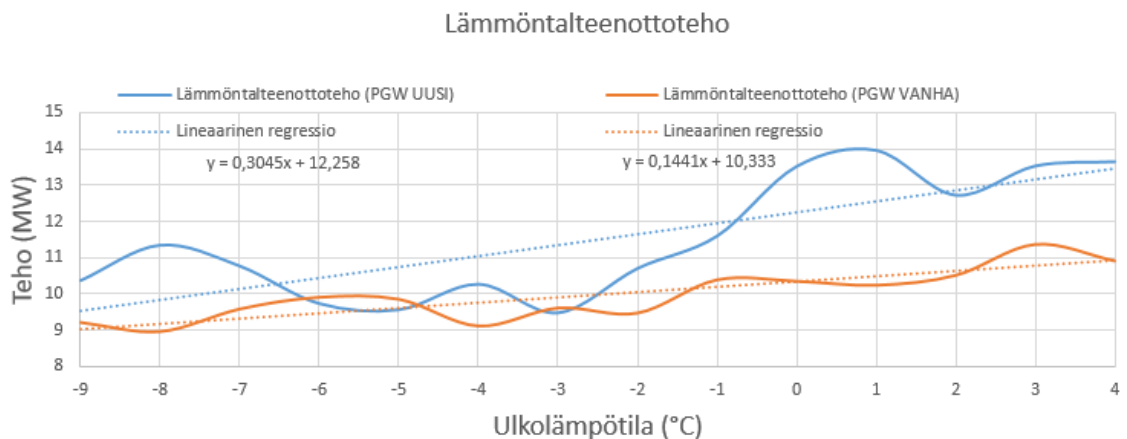
Kuvassa 49 esitetään, miten KL-verkon tilavuusvirtaus on muuttunut projektin muutosten jälkeen.



Kuva 49. Kaukolämpöveden tilavuusvirtausten vertailu ulkolämpötilan funktiona. Sininen käyrä kuvaa taulukon 4 ja punainen käyrä taulukon 3 tilannetta.

Kuvan 49 mukaan KL-veden tilavuusvirtaus on hieman pienentynyt projektin muutosten jälkeen varsinkin, kun ulkoilman lämpötila on ollut korkeampi. Ulkolämpötilan kylmetessä tilavuusvirtausten välinen ero pienenee. Tämä johtuu siitä, että lämpimillä keleillä lämmöntalteenotto on parantunut projektin aikana uuden lämmönsiirtimen ansiosta. Tämän takia on useammin ollut tilanne, että lämmöntalteenotto on lämmittänyt menoveden tavoitetta korkeampaan lämpötilaan. Koska menoveden lämpötila on ollut korkeampi, tilavuusvirtaus on pienentynyt, mikä voidaan todeta myös kaavan (2) avulla.

Kuvassa 50 esitetään, miten projektissa tehdyt muutokset kaukolämpöverkkoon näkyvät PGW-piirin lämmöntalteenottotehossa.

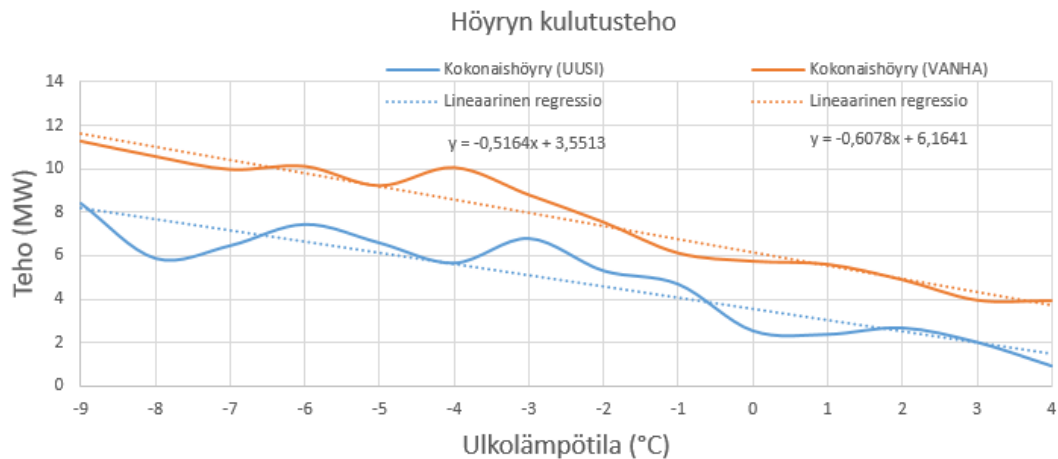


Kuva 50. PGW-piirin lämmöntalteenottotehojen vertailu ulkolämpötilan funktiona. Sininen käyrä kuvaa taulukon 4 ja punainen käyrä taulukon 3 tilannetta.

Kuvasta 50 on havaittavissa, että lämpötilan kasvaessa lämmöntalteenottoteho paranee. Kylmemmillä keleillä kuvan 50 sininen käyrä saavuttaa punaista käyrää ja niiden välinen ero kaventuu. Kuvan ilmiöt johtuvat uudesta lämmönsiirtimestä TMP- ja PGW-piirien

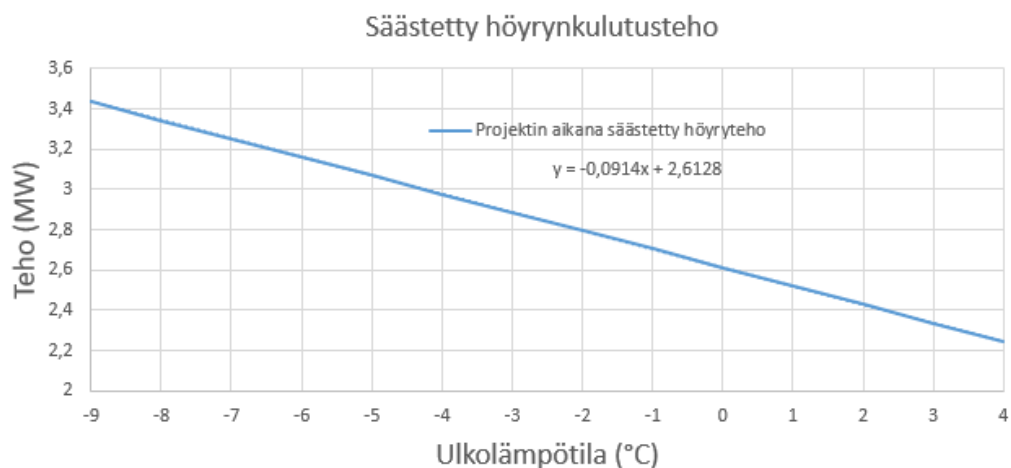
välissä. Lämpimillä keleillä TMP-piirissä on ollut enemmän hukkalämpöä kuin kylmillä keleillä, jolloin lämpimillä keleillä hukkalämpö on siirtynyt lämmönsiirtimen avulla PGW-piiriin.

Kuvassa 51 esitetään, miten KL-verkon höyrylämmitysteho on muuttunut projektin muutosten jälkeen.



Kuva 51. Tehtaan KL-verkon höyrylämmitystehojen vertailu. Sininen käyrä kuvaa taulukon 4 ja punainen käyrä taulukon 3 tilannetta.

Kuvasta 51 havaitaan, että höyrynkulutus on pienentynyt merkittävästi projektin aikana. Vähentämällä kuvan 51 ylemmästä lineaarisesta regressiosta alempi, saadaan erotus, joka arvioi ulkolämpötilan funktiona, minkä verran höyrynkulutustehoa on onnistuttu projektin aikana vähentämään. Säästetty höyrynkulutusteho esitetään kuvassa 52.



Kuva 52. Höyrynkulutusteho ulkolämpötilan funktiona, joka on säästetty projektin aikana tehtyjen muutosten jälkeen verrattuna tilanteeseen ennen muutoksia.

Kuvan 52 ja taulukon 4 tietojen perusteella voidaan arvioida kokonaisenergiämäärä, joka on projektin aikana tehtyjen muutosten avulla onnistuttu säästämään. Kuvassa 52 näkyy suoran yhtälö $y = -0,0914x + 2,6128$, jonka avulla voidaan arvioida säästetty

höyrynkulutusteho ulkolämpötilan funktiona. Säästetty kokonaisenergia lasketaan kaavalla

$$W = P * t, \quad (37)$$

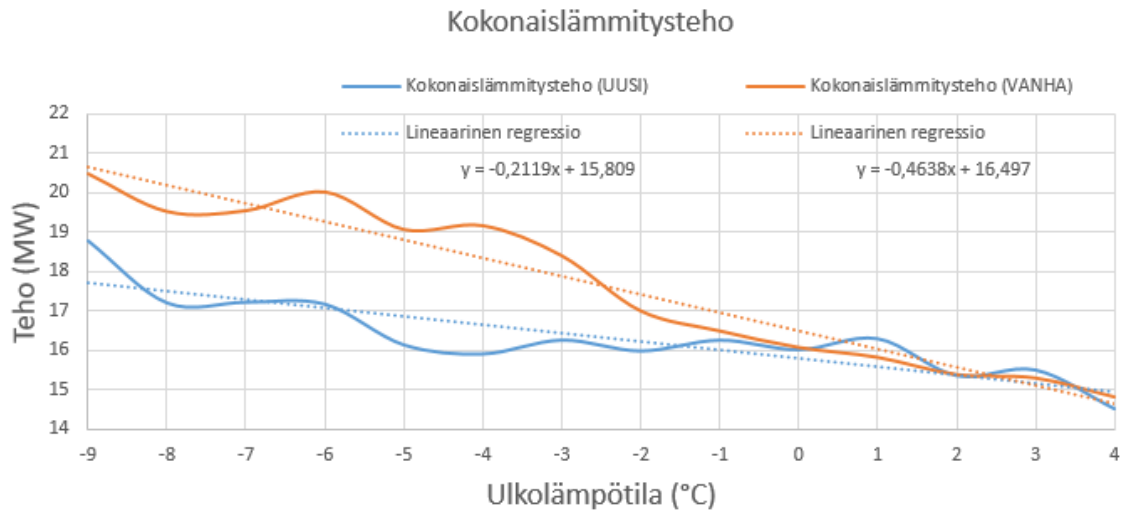
missä P on teho ja t on aika [36]. Taulukossa 4 näkyy Otos(h)-sarakeessa tunteina, kuinka kauan mikäkin ulkolämpötila ja sitä vastaava säästetty höyrynkulutusteho ovat vaikuttaneet. Kaavan (37), kuvan 52 suoran yhtälön ja taulukon 4 avulla voidaan arvioida säästetty energiamäärä, joka lasketaan taulukossa 5.

Taulukko 5. Arvioitu energiamäärä, joka on säästetty projektin aikana tehtyjen muutosten jälkeen ajankohtana 7.11.2017–8.2.2018.

Tout	P(h)	Otos(h)	W
-9	3,435	23	79,0142
-8	3,344	24	80,256
-7	3,253	22	71,5572
-6	3,161	30	94,836
-5	3,07	54	165,7692
-4	2,978	59	175,7256
-3	2,887	63	181,881
-2	2,796	75	209,67
-1	2,704	52	140,6184
0	2,613	92	240,3776
1	2,521	191	481,5874
2	2,43	262	636,66
3	2,339	209	488,7674
4	2,247	234	525,8448
Summa			3572,5648

Taulukossa 5 Tout on ulkoilman lämpötila. P(h) tarkoittaa säästettyä höyrynkulutustehoa. Otos(h) tarkoittaa aikaa, kuinka kauan teho on vaikuttanut ja W säästettyä energiamäärää kyseisen tehon vaikutusajalta. Säästetty energiamäärä W on laskettu kaavalla (37). Summaan on laskettu kaikki säästetyt energiamäärät yhteensä. Energioiden yksikkö on MWh. Taulukon 5 arvion mukaan 7.11.2017–8.2.2018 välisenä aikana energiaa on säästetty n. 3600 MWh projektin aikana tehtyjen muutosten myötä.

Kuvassa 53 esitetään, miten projektissa tehdyt muutokset kaukolämpöverkkoon näkyvät KL-verkon kokonaistehontuotossa.



Kuva 53. Tehtaan KL-verkon kokonaislämmitystehojen vertailu. Sininen käyrä kuvaa taulukon 4 ja punainen käyrä taulukon 3 tilannetta.

Kuvan 53 kokonaistehoihin on laskettu yhteen höyryllä ja lämmöntalteenotolla tuotetut tehot. Kokonaistehot muodostuvat kaavan (1) mukaan kuluttajien käyttämän lämmitystehon ja kaukolämpöverkon lämpöhäviöiden summasta. Kuvan 53 ja kaavan (1) perusteilla huomataan, että lämpöhäviöiden osuus kokonaislämmitystehosta on pienentynyt huomattavasti projektin aikana kylmemmillä keleillä, sillä kuluttajien lämmöntarve tehtaan kaukolämpöverkossa ei ole muuttunut ulkolämpötilasta riippuen projektin aikana. Lämpöhäviöiden väheneminen selittyy tavoitelämpötilojen tiputtamisella ja paluuveden lämpötilan alenemisella kylmemmillä keleillä.

5. YHTEENVETO

Työn päätavoitteena oli selvittää, miten kaukolämpöverkon energiatehokkuutta voidaan parantaa säätömenetelmiä kehittämällä ja verkon ajotapoja ja kytkentöjä muuttamalla. Energiatehokkuuden parantamisella tavoiteltiin maakaasun käytön vähentämistä lämpöenergian tehollisuutta.

Työssä käsiteltiin kaukolämpöverkon säätömenetelmiä, joita ovat negatiivinen takaisinkytkentä, kaskadisäätö, myötäkytkentä ja Gain-schedulointi. Työssä käytetyissä kirjallisuuslähteissä oli tutkittu, että kaskadisäädön ja myötäkytkennän avulla voidaan parantaa kaukolämpöverkon lämpötila- ja painesäätöjä. Näitä säätömenetelmiä testattiin työn aikana myös käytännössä Stora Enson Inkeröiden tehtaiden kaukolämpöverkossa ja päädyttiin samoihin lopputuloksiin kirjallisuuslähteiden kanssa.

Työssä mallinnettiin Matlabin avulla kaukolämpöverkon vanhaa ja uutta lämpötilasäätömenetelmää ja niiden toimintaa verrattiin toisiinsa. Uusi menetelmä osoittautui mallinnustuloksissa vanhaa paremmaksi. Mallinnustuloksia käytettiin perusteena toteuttaa uusi säätömenetelmä myös käytännössä.

Työssä tutkittiin myös, miten kaukolämpöverkon rakenne ja ajotavat liittyvät verkon energiatehokkuuteen, ja miten niitä voisi kehittää, jotta verkosta tulisi energiatehokkaampi. Työn aikana tehtiin kaukolämpöverkkoon rakenteellisia muutoksia, joita olivat uuden lämmönsiirtimen asentaminen ja sulkuventtiilien lisääminen verkkoon. Lämmönsiirtimen avulla pystyttiin siirtämään lämpöenergiaa kahden eri verkon osan välillä tarpeen mukaan. Sulkuventtiilien avulla verkkoa oli mahdollista pilkkoa pienempiin osiin, jolloin sopivat lämpötila- ja painetasot pystyttiin säätämään erikseen verkon eri osille.

Kaukolämpöverkon ajotapoja muutettiin alentamalla menoveden lämpötilatavoitteita, jolloin lämpöhäviöitä saatiin merkittävästi vähennettyä. Lämpötilatavoitteen alentamisen myötä myös paluueden lämpötila aleni, jonka seurauksena kaukolämpöverkon hyötysuhde ja energiatehokkuus paranivat.

Energiatehokkuuden kehittymistä tutkittiin vertailemalla, miten höyrynkulutus muuttui projektin aikana. Tuloksissa arvioitiin, että 7.11.2017–8.2.2018 välisenä aikana höyrynkulutuksessa säästettiin noin 3600 MWh kaukolämpöverkkoon tehtyjen muutosten takia. Merkittävin yksittäinen tekijä säästöön oli uusi lämmönsiirrin, jonka avulla mahdollistettiin PGW- ja TMP-piirien välinen lämmönsiirto.

Työssä käsitellyn kaukolämpöverkon energiatehokkuutta on mahdollista edelleen kehittää. Suurimmaksi haasteeksi osoittautui tuottaa vain sellainen lämpöteho kaukolämpöverkossa, jonka verkon kuluttajat tarvitsevat. Lämpötilasäädön hitauden ja

lämmönsiirron kulkuaikaviiveen takia kuluttajien lämpötehotarpeiden muutokset täytyisi osata ennustaa, jos haluttaisiin tuottaa vain kuluttajien tarvitsema lämpöteho ja minimoida lämpötilahäviöt.

Työssä tutkittiin, että kaukolämpöverkon ajotapoja voi edelleen parantaa mukauttamalla menoveden lämpötilatavoitteita kuluttajien tarpeisiin. Jos kuluttajat tarvitsevat jollakin hetkellä vain vähän lämpöenergiaa, lämpötilatavoitetta kannattaa silloin laskea, jotta säästetään energiaa. Kuluttajien lämmönsiirtimien säätöventtiilien asentotietoja ja kaukolämpöverkon pumppujen kierrosnopeuksia tarkkailemalla on mahdollista selvittää, kannattaako menoveden lämpötilatavoitetta laskea vai nostaa. Hyödyntämällä venttiilien asentotietoja ja pumppujen kierrosnopeuksia menoveden lämpötilatavoitteen asettamisessa on mahdollista parantaa kaukolämpöverkon energiatehokkuutta. Toteutustavassa täytyy huomioida menoveden lämpötilasäädön hitaus ja lämmönsiirron kulkuaikaviive.

Tarkkailemalla kuluttajien lämmönsiirtimiltä palaavien kaukolämpövesien lämpötiloja voidaan havaita, jos lämmönsiirtimissä tapahtuu vikaantumisia. Jos lämpötilat merkittävästi poikkeavat niiden normaalista käyttäytymisestä ulkoilman lämpötilan funktiona, voidaan olettaa lämmönsiirtimessä olevan jotain vikaa. Tällaiset viat heikentävät kaukolämpöverkon energiatehokkuutta, minkä takia vikatilanteisiin kannattaa reagoida nopeasti.

LÄHTEET

- [1] L. Saarinen, Modelling and control of a district heating system, Master of Science thesis, 2008, pp. 8-10.
- [2] L. Laakkonen, Predictive supply temperature optimization of district heating networks, Master of Science thesis, 2016, pp. 2-28.
- [3] J. Pöllänen, Veden tiheys ja paine syvissä kairanrei'issä, Posiva Oy, Työraportti 2002-2017, p. 7, Saatavissa (Viitattu 15.3.2017):
http://www.posiva.fi/files/2138/POSIVA-2002-17_Tyoraportti_web.pdf.
- [4] Aalto-yliopisto, Viiveellisten systeemien säätö, Analogisen säädön verkkokurssi, 2011, Saatavissa (Viitattu 16.3.2017):
<http://autsys.aalto.fi/pub/control.tkk.fi/Kurssit/Verkkokurssit/AS-74.2111/taajuusanalyysi/oppitunti8/viive.html>.
- [5] M. Lampinen, V. Kotiaho, Johdatusta lämmönsiirto-oppiin, Aalto-yliopisto, Termodynamiikka ja lämmönsiirto, syksy 2015, pp. 1-5, Saatavissa (Viitattu 16.3.2017):
https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/160294/mod_resource/content/1/LAMMONSIIRTO4.pdf.
- [6] Danfoss, The Heating Book, 8 steps to control of heating systems, Chapter 5, Instructions for designing district heating systems, pp. 106-110, Saatavissa (Viitattu 17.3.2017): http://heating.danfoss.com/pcmfiles/1/master/he/library/heating_book.asp?menuuid=4b642b70-fcb2-46b4-a1ac-bd0ac806f40e&menuid=54.
- [7] B. Skagestad, P. Mildenstein, District Heating and Cooling Connection Handbook, International energy agency IEA district heating and cooling, pp. 56-58, Saatavissa (Viitattu 17.3.2017): <http://www.districtenergy.org/assets/CDEA/Best-Practice/IEA-District-Heating-and-Cooling-Connection-Handbook.pdf>.
- [8] ElectronicsTutorial, Feedback Systems, Saatavissa (Viitattu 23.3.2017):
<http://www.electronics-tutorials.ws/systems/feedback-systems.html>.
- [9] S. Yehia, Applying heat exchanger control strategies, Control Engineering, 2016, Saatavissa (Viitattu 23.3.2017):
<http://www.controleng.com/single-article/applying-heat-exchanger-control-strategies/5a90ba2effa8c154a34bc8619585bb3e.html>.

- [10] Y. Majanne, Myötäkytketty säätö ja ristikkäisvaikutusten dekoplaus, Johdatus prosessien hallintaan, Luento 10, Tampereen teknillinen yliopisto, 2014, p. 2.
- [11] D. Cooper, A. Houtz, Feed Forward With Feedback Trim For Improved Disturbance Rejection, Control Guru, Practical Process Control, 2015, Saatavissa (Viitattu 24.3.2017): <http://controlguru.com/the-feed-forward-controller/>.
- [12] Taulukot.com, Veden tiheys lämpötiloissa 0-100 °C, Taulukkokirja verkossa, Saatavissa (Viitattu 27.3.2017): http://www.taulukot.com/fysiikka/mekaniikka_termodynamiikka/.
- [13] Energiauutiset, Kaukolämmön suosio jatkaa kasvua, Raportti, 2016, Saatavissa (Viitattu 27.3.2017): <http://www.energiauutiset.fi/uutiset/kaukolammon-suosio-jatkaa-kasvua.html>.
- [14] R. Hyl, R. Wagnerova, Design and Implementation of Cascade Control Structure for Superheated Steam Temperature Control, Department of Control Systems and Instrumentation, 2016, pp. 253-258.
- [15] S. Caba, M. Lepper, S. Liu, Nonlinear Controller and Observer Design for Centrifugal Pumps, Part of 2016 IEEE Multi-Conference on Systems and Control, 2016, pp. 569-574.
- [16] Tampereen teknillinen yliopisto, Prosessien hallinnan periaatteet, Laboratoriotyöohje 1, 2015, kaava (19).
- [17] Tampereen teknillinen yliopisto, Kaskadisäätö, Johdatus prosessien hallintaan, Luento 11, 2014, pp. 2-24.
- [18] P. Hippe, Windup in Control, Its Effects and Their Prevention, Advances in Industrial Control, Springer, 2006, pp. 5-6.
- [19] T. Mönkkönen, Tase-konsepti Prosessihöyryverkon Hallinnassa, Master of Science thesis, 2014, pp. 11-12.
- [20] K. J. Åström, R. M. Murray, Feedback Systems: An Introduction for Scientists and Engineers, Second Edition, 2016, Saatavissa (Viitattu 30.3.2017): http://www.cds.caltech.edu/~murray/amwiki/index.php/Main_Page.
- [21] Aalto-yliopisto, Sovelletun matematiikan tietokonetyöt, Matlab – Matemaattinen mallintaminen, 2006, p. 4.
- [22] P. Ruokolainen, Voimalaitosten Sääto ominaisuudet ja -periaatteet Saarekekäytössä, Master of Science thesis, 2016, p. 19.

- [23] Aalto-yliopisto, Linearisointi, Sääätötekniikan matematiikan verkkokurssi, Saatavissa (Viitattu 6.4.2017):
<http://autsys.aalto.fi/pub/control.tkk.fi/Kurssit/Verkkokurssit/AS-74.1102/Teoria/epalineaarinen/linearisointi.html>.
- [24] Aalto-yliopisto, Laplace-muunnos , Analogisen säädön verkkokurssi, 2011, Saatavissa (Viitattu 6.4.2017):
<http://autsys.aalto.fi/pub/control.tkk.fi/Kurssit/Verkkokurssit/AS-74.2111/mallit/oppitunti3/laplace.html>.
- [25] S. Padhee, Controller Design for Temperature Control of Heat Exchanger System: Simulation Studies, WSEAS Transactions on Systems and Control, Volume 9, 2014, pp. 485-490. Saatavissa (Viitattu 6.4.2017):
<http://www.wseas.org/multimedia/journals/control/2014/a125703-288.pdf>.
- [26] Control Guru, Software Modeling of Process Dynamics: Jacketed Stirred Reactor Case Study, Exploring the FOPDT Model with a Parameter Sensitivity Study, 2015, Saatavissa (Viitattu 6.4.2017): <http://controlguru.com/exploring-the-fopdt-model-with-a-parameter-sensitivity-study/>.
- [27] M. Falkvall, V. Nilsson, Optimerad framledningstemperatur I Lunds fjärrvärmenät, Master of Science thesis, 2013, p. 42. Saatavissa (Viitattu 10.4.2017): <http://www.ees.energy.lth.se/fileadmin/ees/Publikationer/Ex5299-OptimeradFramtempLundsFjaerrvaerme-Falkvall-Nilsson.pdf>.
- [28] I. Sarbu, E. Valea, Energy Savings Potential for Pumping Water in District Heating Stations. Department of Building Services Engineering, Polytechnic University Timisoara, Article, 2015, pp. 5705-5719.
- [29] V. VanDoren, Back to Basics: How Gain Scheduling Works, Control Engineering, 2010, Saatavissa (Viitattu 20.4.2017):
<http://www.controleng.com/single-article/back-to-basics-how-gain-scheduling-works/52cd5aac6a456dfb6b1352494e4dd169.html>.
- [30] Aalto-yliopisto, Teollisuuden energiatekniikka, Peruskaavat ja -käsitteet, 2011, p.6. Saatavissa (Viitattu 2.5.2017):
https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/188122/mod_resource/content/1/Ene-59_4101_peruskaavat_ja_-kasitteet.pdf.
- [31] Spiraxsarco, Tulistetun höyryn entalpian muutostaulukko, Saatavissa (Viitattu 11.5.2017): http://www2.spiraxsarco.com/esc/SH_Properties.aspx.
- [32] Otavan Opisto, Inter Netix, Oppimateriaalit, FY2-Lämpö, Sulaminen ja höyrystyminen, Saatavissa (Viitattu 11.5.2017):

http://opinnot.internetix.fi/fi/materiaalit/fy/fy2/09._lampo_siirtyvana_energiana/9_3_sulaminen?C:D=1653265&m:selres=1653265.

- [33] R. S. Cuadrado, Return temperature influence of a district heating network on the chp plant production costs, Master of Science thesis, 2009, pp. 16-18.
- [34] Variance: Simple definition, Step by Step Examples, Statistics How To, Saatavissa (Viitattu 10.1.2018): <http://www.statisticshowto.com/probability-and-statistics/variance/>
- [35] Microsoft, LINEST function, Saatavissa (Viitattu 24.1.2018): <https://support.office.com/en-us/article/linest-function-84d7d0d9-6e50-4101-977a-fa7abf772b6d>
- [36] Turun ammattikorkeakoulu, Fysiikka, Työ, teho ja energia, Saatavissa (Viitattu 8.2.2018): http://fysiikka.turkuamk.fi/fysiikka/FysiikanPerustaidot/1_5_Energia.pdf