Open your mind. LUT.
Lappeenranta University of Technology
LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO
School of Energy Systems
Energiatekniikan koulutusohjelma

Lauri Laaksonen

KAUKOLÄMMÖN MENOVEDEN LÄMPÖTILAN TALOUDELLINEN OPTIMOINTI

Työn tarkastajat: Professori, TkT Esa Vakkilainen
Dosentti, TkT Jussi Saari

Työn ohjaajat: DI Jouni Laukkanen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
School of Energy Systems
Energiatekniikan koulutusohjelma

Lauri Laaksonen

Kaukolämmön menoveden lämpötilan taloudellinen optimointi

Diplomityö

2018

88 sivua, 33 kuvaa ja 17 taulukkoa

Tarkastajat: Professori, TkT Esa Vakkilainen
Dosentti, TkT Jussi Saari

Ohjaajat: DI Jouni Laukkanen

Hakusanat: kaukolämpö, menolämpötilan optimointi, tuotantoennustemalli

Kaukolämmön menoveden lämpötilan säätö perustuu Suomessa tyypillisesti Lämpölaitosyhdistys ry:n vuonna 1978 julkaisemaan suositukseen, missä menolämpötilaa säädetään ulkolämpötilan mukaisesti. Ulkolämpötilaan perustuva säätö ei tyypillisesti vastaa menolämpötilan taloudellista optimia johtuen kaukolämmön kysyntään vaikuttavista sosiaalisista tekijöistä.

Tämän työn tavoitteena oli tutkia menolämpötilan vaikutuksia kaukolämpöjärjestelmässä kirjallisuuden sekä neljän pohjoismaalaisen kaukolämpöverkon tuntimittausdatan ja verkostomallien avulla. Lisäksi työn tavoitteena oli tutkia mahdollisuuksia uuden taloudelliseen optimiin perustuvan menolämpötilan säätösuosituksen johtamiseksi. Työssä tutkittiin myös kaukolämpöverkon automaattisen varaamisen yhdistämistä menolämpötilan säätösuositukseen.

Kolmelle esimerkkiverkolle tehdyn menolämpötilan optimoinnin perustella optimaalisella menolämpötilan säädöllä voidaan saavuttaa noin 0,1–0,21 €/MWh_{kl} säästöt tuotettua kaukolämpöenergiaa kohden. Suurimmat kustannusvaikutukset olivat tyypillisesti verkoston lämpöhäviöillä, jolloin taloudellinen optimi vastaa matalinta käytettävissä olevaa menolämpötilaa.

Optimaaliseen menolämpötilaan perustuva säätö voidaan toteuttaa laskemalla taloudellista optimia jatkuvasti kaukolämmöntuotantoon ja paluulämpötilaan perustuen. Kaukolämpöverkon automaattinen varaaminen voidaan yhdistää edellä mainittuun säätösuositukseen hyödyntämällä kaukolämmöntuotannon ja paluulämpötilan ennusteita.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
School of Energy Systems
Energy technology

Lauri Laaksonen

Economical Optimization of Supply Temperature in District Heating Network

Master's thesis

2018

88 pages, 33 pictures and 17 tables

Examiners: Professor, D.Sc (Tech) Esa Vakkilainen
Docent, D.Sc (Tech) Jussi Saari

Instructors: M.Sc (Tech) Jouni Laukkanen

Keywords: District heating, supply temperature optimization, heat production forecast model

Supply temperature control in Finland is typically based on a recommendation published by Lämpölaitosyhdistys ry in 1978, where the supply temperature is adjusted as a function of outdoor temperature. The outdoor temperature based supply temperature adjustment doesn't necessarily correspond to economical optimum due the impacts of social factor on heat demand.

The main objective of this thesis was to examine the impacts of the supply temperature on a district heating system by utilizing scientific papers. Second objective of this paper was to examine the possibilities to derive a new supply temperature control recommendation based on the economical optimum. The quantitative study was based on hourly data and network models from four district heating networks in Nordics. Third objective of this thesis was to discuss the opportunities to include the automatic network accumulation into the new recommendation.

Based on the supply temperature optimization modelling performed for three sample networks, it is possible to achieve approximately 0,1–0,21 €/MWh savings per produced district heat energy. The biggest cost effect of supply temperature adjustment was usually related to network heat losses setting the economical optimum at the lowest achievable temperature.

The supply temperature recommendation corresponding to the economical optimum is possible to execute by calculating the optimal supply temperature continuously based on the actual heat production and return temperature measurements. The automatic network accumulation can be included by using heat demand and return temperature forecasts instead of the actual measurements.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Pöyry Finland Oy:lle vuoden 2018 kevään ja kesän aikana. Haluan kiittää Pöyry Finland Oy:tä tämän diplomityön mahdollistamisesta sekä mahdollisuudesta työskennellä mielenkiintoisen aiheen parissa. Erityiskiitos kuuluu ohjaajalleni Jouni Laukkaselle, joka on antanut erittäin tärkeää tukea ja ohjausta koko työn ajan. Haluaan kiittää myös koko Energia-liiketoimintayksikön tiimiä sekä muita työhön osallistuneita.

Lisäksi haluan kiittää Lappeenrannan teknillisen yliopiston professori Esa Vakkilaista sekä tekniikan tohtori Jussi Saarta diplomityön valvomisesta ja tarkastamisesta.

Kiitokset myös Lappeenrannan opiskelukavereille ja ystäville, joilta olen saanut kannustusta koko opintojeni ajan. Viimeiseksi haluan kiittää perhettäni saamastani korvaamattomasta tuesta koko opintojeni aikana.

Helsinki 1.9.2018

Lauri Laaksonen

Lauri Laaksonen

SISÄLLYSLUETTELO

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

1 JOHDANTO 9

1.1 Työn tausta 9

1.2 Työn tavoitteet ja rajaus 10

1.3 Työn rakenne 11

2 KAUKOLÄMPÖJÄRJESTELMÄ 12

2.1 Kaukolämmitys Suomessa 13

2.2 Kaukolämmön tuotanto 16

2.3 Yhdistetty lämmön- ja sähköntuotanto 17

2.4 Savukaasupesuri 18

2.5 Kaukolämmön jakelu 19

2.6 Kaukolämpöasiakkaat 22

3 MENOLÄMPÖTILAN VAIKUTUS KAUKOLÄMPÖJÄRJESTELMÄSSÄ 26

3.1 Kaukolämmön menolämpötilan säätö 26

3.2 Muuttuva lämmöntuotantokustannus 31

3.3 Menolämpötilan vaikutus paluulämpötilaan 32

3.4 Menolämpötilan vaikutus pumppaukseen 35

3.5 Menolämpötilan vaikutus verkoston lämpöhäviöihin 41

3.6 Menolämpötilan vaikutus savukaasupesurin tuotantoon 45

3.7 Menolämpötilan vaikutus vastapainesähköntuotantoon 48

4 MENOLÄMPÖTILAN TALOUDELLINEN OPTIMOINTI 49

4.1 Menolämpötilan optimointi esimerkkiverkossa 49

4.2 Menolämpötilan optimin määrittäminen ilman verkostomallia 58

4.3 Menolämpötilan optimoinnin tulokset muille kaukolämpöverkoille 62

5 MENOLÄMPÖTILAN SÄÄTÖSUOSITUS 66

5.1 Lämmön varaaminen kaukolämpöverkkoon 66

5.2 Menolämpötila kaukolämpökuorman funktiona 67

5.3 Tuotantoennusteen luominen usean muuttuja lineaarisen regeressiomallin avulla ... 69

5.4 Kelluva menolämpötilan säätö 77

6 JOHTOPÄÄTÖKSET 82

7 YHTEENVETO 85

LÄHTEET 86

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset aakkoset

a	vuosi	[-]
c_p	ominaislämpökapasiteetti	[kJ/(kgK)]
g	putoamiskiihtyvyys	[m/s^2]
h	tunti	[-]
H	nostokorkeus	[m]
k	lämmönläpäisyluku	[W/mK]
K	muuttuva kustannus	[€/MWh]
p	paine	[pa, bar]
P	teho	[W]
q_m	massavirta	[kg/s]
r	rakennussuhde	[-]
T	lämpötila	[°C, K]

Kreikkalaiset aakkoset

Δ	muutos	[-]
ρ	tiheys	[kg/m^3]
η	hyötysuhde	[-]
Φ	lämpöteho	[W]

Alaindeksit

elspot	Elspot
el	sähkö
g	maaperä
H2O	vesi
kl	kaukolämpö

m	meno
p	paluu
pu	pumppu
pa	polttoaine
ulk	ulkoinen

Lyhenteet

CHP	yhdistetty sähkön ja lämmöntuotanto
HOB	heat only boiler
LTO	lämmöntalteenotto
ME	keskivirhe
MAPE	suhteellinen keskivirhe

1 JOHDANTO

Kaukolämpö on keskitetysti tuotettua lämpöä, joka toimitetaan asiakkaalle putkiverkoston kautta. Kaukolämpöä tuotetaan sähkön ja lämmön yhteistuotantolaitoksissa sekä erillisissä lämpökeskuksissa. (Energiateollisuus 2016, 25) Lämmitysmarkkinoiden kiristynyt kilpailutilanne kiinteistökohtaisten lämmitysratkaisujen kanssa on luonut kaukolämpöalalle tehostamispaineita kilpailukykyisen hinnan turvaamiseksi. Tässä työssä tutkitaan kaukolämpöveden menolämpötilan säädön kustannusvaikutuksia sekä annetaan ohjeet optimilämpötilan ratkaisemiseen. Lisäksi työssä tutkitaan mahdollisuuksia menolämpötilan säätösuosituksen päivittämiseksi taloudelliseen optimiin perustuen. Työ on tehty Pöyry Finland Oy:n ja Energiateollisuus ry:n toimeksiannosta.

1.1 Työn tausta

Kaukolämmön tuotannon ja jakelun yksi tärkeimmistä ohjattavista olevista parametreista on tuotantolaitokselta kaukolämpöverkkoon syötettävän menoveden lämpötila. Menolämpötilan säätö pohjautuu Suomessa tyypillisesti Lämpölaitosyhdistyksen vuonna 1978 määrittämään suositukseen, missä menolämpötilaa säädetään ulkolämpötilan mukaan. Uudet polyuretaanieristetyt kaukolämpöjohdot, asiakaslaitteiden mitoittaminen alemmille lämpötiloille ja uudet säätö- ja automaatiojärjestelmät ovat johtaneet tilanteeseen, missä käytössä oleva suositus on mahdollista päivittää teknillistaloudellisesti tehokkaammaksi.

Menolämpötilan optimointiin liittyvää tutkimusta on tehty useita. Saarisen vuonna 2008 julkaisemassa tutkimuksessa tarkasteltiin menolämpötilan laskun vaikutuksia CHP-laitoksen vastapainesähköntuotantoon. Tutkimus osoitti, että menolämpötilaa on sähkön tuotannon lisäämiseksi kannattavaa laskea. Tutkimuksessa ei huomioitu pumppauksen sähkönkäytön lisääntyneitä kustannuksia tai alentuneiden lämpöhäviöiden johdosta pienentyviä polttoainekustannuksia. (Saarinen 2008, 54–55)

Vuonna 2017 julkaistussa tutkimuksessa Laakkonen et al. tutkivat menolämpötilan optimointityökalua, joka perustui neuroverkoilla tehtävään kaukolämpökuorman ja paluulämpötilan ennustuksiin. Optimointityökalu määritti käytettävän menolämpötilan minimoimalla lämpöhäviö- ja pumppauskustannukset todellisilla sähkönhinnoilla..

(Laakkonen et al. 2017, 308) Tutkimuksessa tarkastelu rajattiin pelkän pumppauksen ja lämpöhäviöiden kustannusten minimointiin.

Menolämpötilan optimoinnissa tehdyt tutkimukset ovat suurimmilta osin tehty vain suurimpia kaukolämpöyhtiöiden tarpeita ajatellen. Suuremmilla resursseilla toimiville yrityksille voidaan soveltaa monimutkaisempia malleja, mutta niiden käytännön toteutus voi pienemmissä kaukolämpöyhtiössä olla teknillistaloudellisesti haastavaa. Tässä työssä kaukolämmön menoveden optimointia käsitellään pienempien kaukolämpöverkkojen rajoitteet huomioiden.

1.2 Työn tavoitteet ja rajaus

Tämän työn tarkoituksena on kuvata menolämpötilan optimoinnin periaatteet sekä arvioida säästöpotentiaalia vuotuisissa muuttuvissa lämmön hankinta ja jakelukustannuksissa olemassa olevissa kaukolämpöverkoissa. Lisäksi työn tarkoituksena on tutkia mahdollisuuksia uuden menoveden lämpötilan säätösuosituksen johtamiseksi, taloudelliseen optimiin perustuen. Työn tavoitteeseen pyritään, vastaamalla seuraaviin tutkimuskysymyksiin.

- Kuinka menolämpötilan optimi määritetään verkostomallinnusta tai tuntimittausdataa hyödyntäen?
- Voiko optimoinnista saatujen tulosten perusteella johtaa yleispätevää menolämpötilan säätösuositusta?
- Onko kaukolämpöverkon automaattista varaamista mahdollista yhdistää säätösuositukseen yksinkertaista tuotannon ennustemallia hyödyntäen?

Työn tutkimus pohjautuu kirjallisista lähteistä löytyvään tietoon sekä Pöyry Finland Oy:n hallinnassa oleviin verkostomalleihin ja tuntimittausdataan. Työssä menolämpötilan vaikutuksia tutkitaan neljän pohjoismaalisen esimerkkiverkon datan perusteella. Esimerkkiverikokkojen vuotuinen lämmönhankinta sekä pää- ja varatuotantolaitosten polttoaineet esitetään taulukossa 1.

Taulukko 1: Tämän työn tutkimuksessa käytettävä kaukolämpöverkot ja niiden vuotuiset lämmönhankinnat.

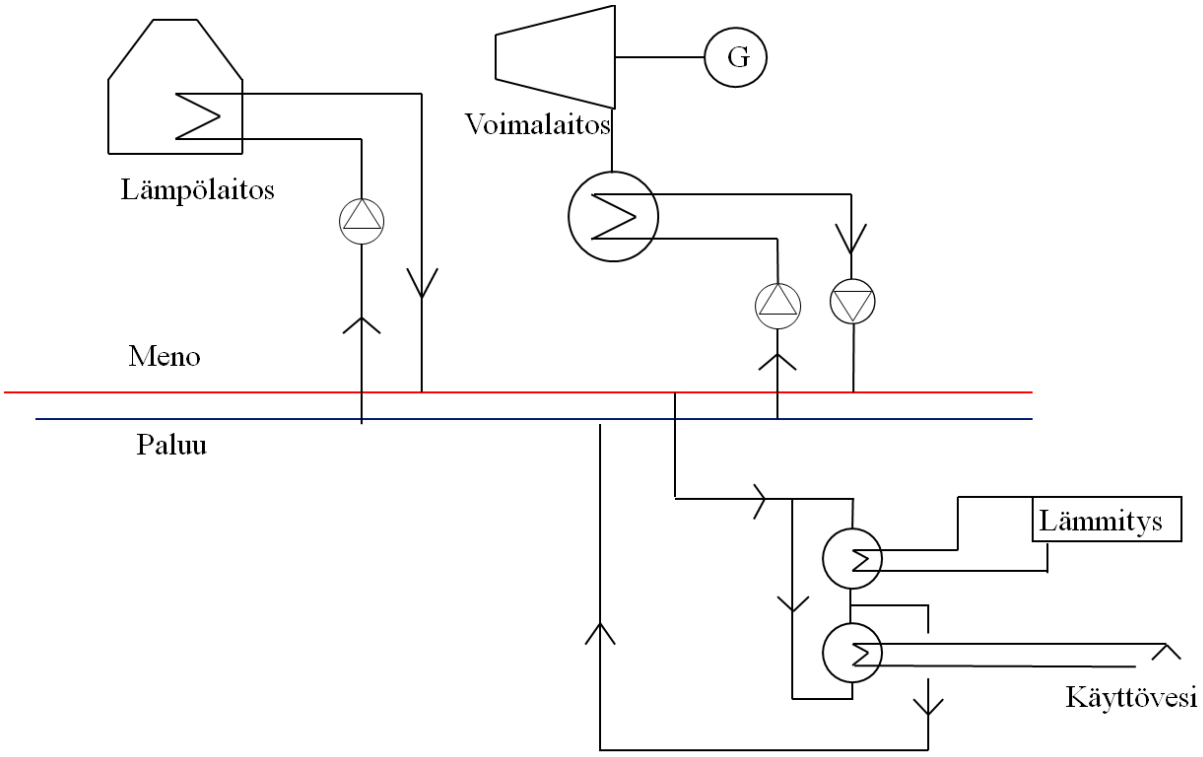
	Lämmönhankinta [GWh/a]	Päätuotantolaitos	Vara- ja huipputuotanto
Esimerkkiverkko A	150	Bio CHP, ei savukaasupesuria	Kaasu- ja öljylämpökeskukset
Esimerkkiverkko B	400	Bio CHP, savukaasupesuri	Kaasu- ja öljylämpökeskukset
Esimerkkiverkko C	2400	Kaasu CHP, Bio HOB	Kaasu- ja öljylämpökeskukset
Esimerkkiverkko D	1000	Bio CHP, savukaasupesuri	Öljylämpökeskukset

1.3 Työn rakenne

Tässä työssä toisessa luvussa esitetään kaukolämmitysjärjestelmän toiminta periaate sekä kuvataan kaukolämmityksen kehitystä Suomessa. Menolämpötilan vaikutuksia kaukolämpöjärjestelmän eri komponentteihin kuvataan kolmannessa luvussa kirjallisuudesta löytyvän teorian avulla. Menolämpötilan kustannusvaikutuksia kyseisten komponenttien osalta kuvataan samassa luvussa esimerkkiverkon dataan perustuvan laskennan avulla. Neljännessä luvussa esitetään menolämpötilan optimointiprosessi edeltävän luvun teoriaan pohjautuen. Optimointi kuvataan kolmen eri esimerkkiverkon avulla. Viidennessä luvussa esitetään kaksi menolämpötilan optimiin perustuva säästösuositusehdotusta. Viidennessä luvussa esitetään myös yksinkertainen lämmöntuotannon ennustemallin rakentaminen, joka voidaan haluttaessa yhdistää säätösuositukseen. Kuudennessa luvussa esitetään tämän työn keskeiset johtopäätökset sekä vastataan tutkimuskysymyksiin.

2 KAUKOLÄMPÖJÄRJESTELMÄ

Suomessa kaukolämmön siirtoaineena käytetään vettä, joka kuumennetaan tuotantolaitoksella ja pumpataan menolinjaa pitkin asiakkaille. Kaukolämpövesi jäähtyy asiakkaan lämmönjakokeskuksen vaihtimissa siirtäen luovutetun lämmön kiinteistön käyttöön. Jäähtynyt vesi johdetaan paluulinjaa pitkin takaisin tuotantolaitokselle, jossa se lämmitetään uudelleen. Yhdestä meno- ja paluulinjasta kostuvaa putkirakennetta kutsutaan kaukolämpöjohdoksi. (Energiateollisuus 2006, 43) Kuvassa 1 esitetään yksinkertaistettu kuva kaksiputkijärjestelmän toiminnasta.

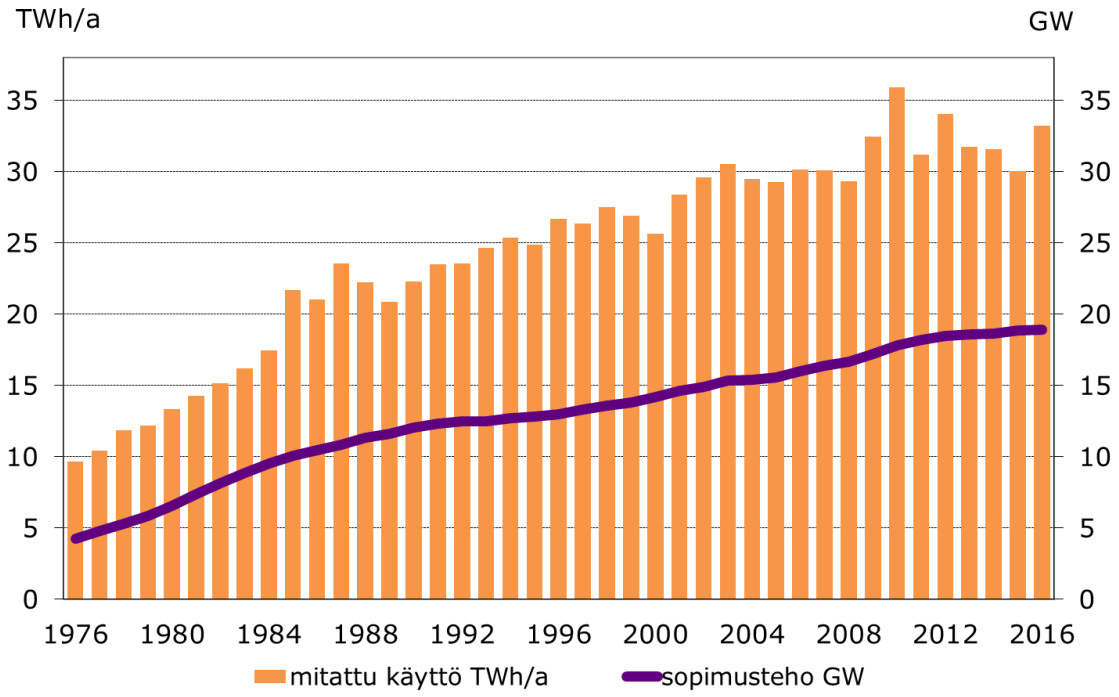


Kuva 1: Kaksiputkijärjestelmän yksinkertaistettu periaatekuva. (mukaillen Energiateollisuus 2006, 43)

Kaukolämpöjärjestelmä on kokonaisuus, jonka muodostavat lämpöä tuottavat lämpölaitokset, lämmönsiirtämiseen tarvittavat putket ja lämmön vastaanottoon tarvittavat asiakaslaitteet. Kaukolämpöjärjestelmän tärkeimmät ohjattavat parametrit ovat tuotantolaitokselta verkkoon syötettävän veden menolämpötila ja meno- ja paluulinjan välisen paine-eron säätö. (Mäkelä et al. 2015, 22)

2.1 Kaukolämmitys Suomessa

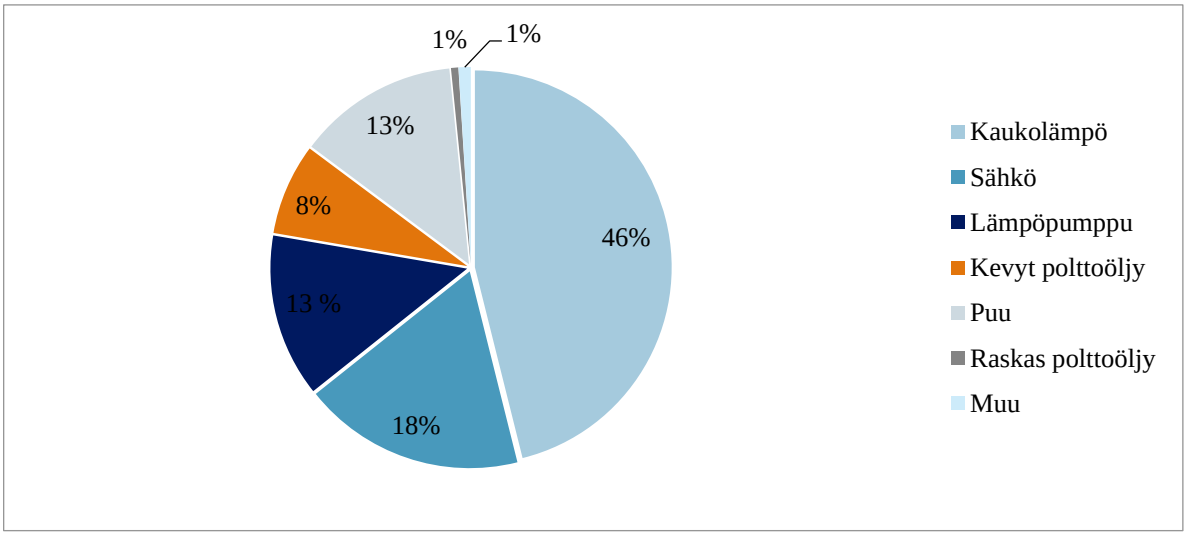
Suomessa kaukolämmitys sai alkunsa jo 50-luvulla, mutta vasta 70-luvulla se alkoi vakiinnuttaa asemaansa lämmitysmuotona, johtuen öljykriisin aiheuttamasta energiapolitiikan muutoksista. Kotimaisiin polttoaineisiin kuten turpeeseen perustuva kaukolämpö nähtiin keinona vähentää energiahuollon tuontiriippuvuutta. 80-luvulla kaukolämmön tuotannossa keskityttiin verkkojen laajentamiseen niin, että aiemmin sähköntuotannossa hukkaan mennyt lauhde saataisiin hyödynnettyä. Yhteistuotannon hyödyntäminen paransi kaukolämmön kilpailukykyä huomattavasti ja 90-luvulla se vakiinnutti asemansa lämmitysmuotona kaupunkien lisäksi myös pienemmissä taajamissa. (Energiateollisuus 2006, 34–35). Kuvassa 2 esitetään kaukolämmön käytön ja asiakkaiden sopimustehon kehitys välillä 1976–2016.



Kuva 2: Kaukolämmön käyttö ja asiakkaiden sopimusteho välillä 1976–2016. (Energiateollisuus 2017a, 6)

Kuvasta 2 huomataan, että kaukolämmön sopimustehon kasvu on hidastunut huomattavasti 80-luvun huippuvuosista. Tähän vaikuttaa ilmaston lämpenemisen ja energiatehokkaamman rakentamisen myötä laskenut rakennusten lämmöntarve. Myös kaukolämmityksen kilpailun kiristyminen talokohtaisten lämmitysvaihtoehtojen, kuten lämpöpumppujen kanssa on hidastanut kaukolämmön kasvua.

Vuonna 2016 kaukolämpöenergian myynti Suomessa oli noin 33,2 TWh. Vuonna 2015 kaukolämmön myynti oli 30 TWh mikä vastasi noin 46,1 % markkinaosuutta asuin ja palvelurakennusten lämmitysenergiasta. Asuin- ja palvelunrakennusten lämmityksen energiankäytön markkinaosuudet vuonna 2015 esitetään kuvassa 3.



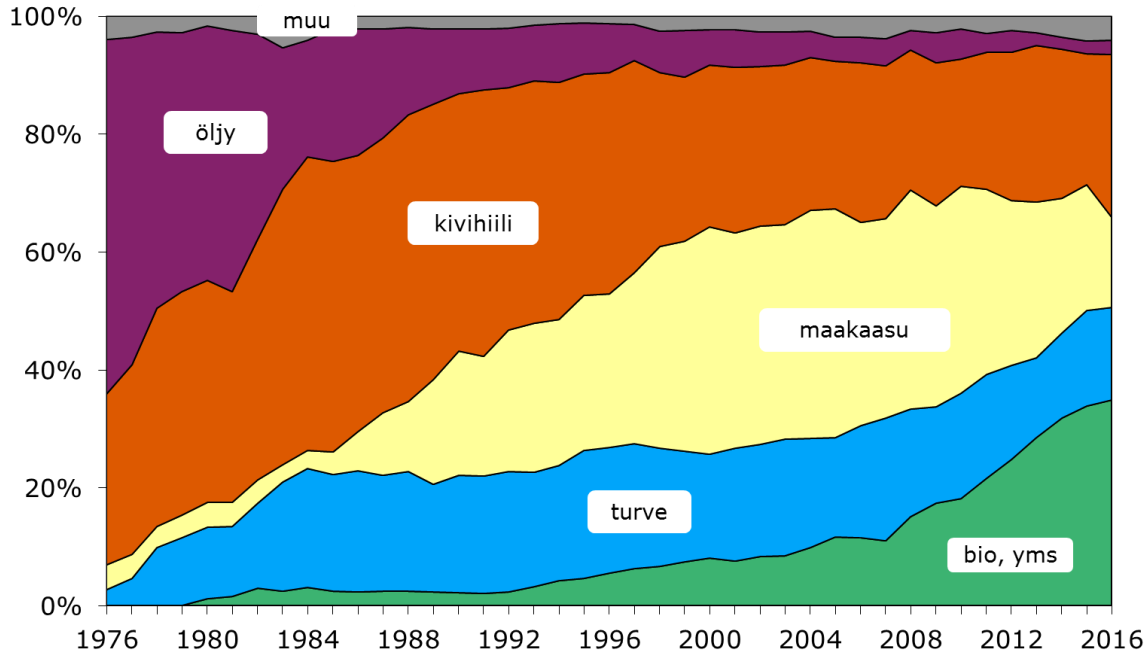
Kuva 3: Lämmityksen markkinaosuudet asuin- ja palvelurakennuksissa vuonna 2015 (mukaillen Energiateollisuus 2017b, 3)

Yllä olevassa kuvassa lämpöpumpuilla viitataan talokohtaisiin lämpöpumppuihin ja kaukolämpöverkkoon kytketyt lämpöpumput sisältyvät kaukolämmön osuuteen. Lämpöpumppujen osuus sisältää lämpöpumppujen käyttämän sähkön. Vastaavasti sähkön osuus koostuu suorasta sähkölämmityksestä ja lämmönsiirtolaitteiden käyttämästä sähköstä. Erityisesti maalämmön yleistyminen pientaloissa on kasvattanut maalämmön markkinaosuutta viimeisen vuosikymmenen aikana. Lämpöpumppujen ominaisinvestoinnin laskun sekä alhaisen sähkönhinnan myötä kasvanut lämpöpumppujen kilpailukyky asettaa tehostamispaineita kaukolämmölle markkinajohtajan aseman säilyttämiseksi. Vuonna 2005 lämpöpumppujen markkinaosuus oli vain noin 2,2 % mikä tarkoittaa, että lämpöpumppujen markkinaosuus on noussut yli 10 prosenttiyksikköä vain 10 vuodessa. (Tilastokeskus 2017) Haasteensa kaukolämmön kilpailukyvylle on osaltaan tuonut myös alhainen sähkön markkinahinta, joka on heikentänyt yhteistuotantoannon kannattavuutta merkittävästi.

Vuonna 2016 kokonaiskaukolämmönhankinnasta 67,2 % (24,6 TWh) tuotettiin sähkön ja lämmön yhteistuotantolaitoksissa. Vastaavasti lämpökeskuksissa polttoaineilla tuotettiin yhteensä 9 TWh lämpöä, mikä vastaa noin 24,7 %:in osuutta kaukolämmön

kokonaislämmönhankinnasta. Loppu osa 2,97 TWh (8,1 %) Suomessa tuotetusta kaukolämmöstä tuotettiin lämpöpumpuilla ja lämmön talteenotolla. (Energiateollisuus 2017a, 3)

Lähes kaikki, noin 92 % Suomen kaukolämmönhankinnasta tuotettiin polttoaineilla yhteistuotantolaitoksissa ja lämpökeskuksissa. Käytettävään polttoaineeseen vaikuttavat laitoksen sijoituspaikka, polttoaineiden hinnat ja verotus sekä käytettävä teknologia. Kuvassa 4 esitetään kaukolämmön ja siihen liittyvän sähkön tuotantoon käytetyt polttoaineet vuosien 1976–2016 välillä.



Kuva 4: Kaukolämmön ja siihen liittyvän sähkön tuotantoon käytetyt polttoaineet. (Energiateollisuus 2017b, 16)

90-luvun puolivälin jälkeen biomassan osuus on kasvanut merkittävästi, johtuen EU:n ilmastopolitiikasta, missä fossiiliset polttoaineet pyritään korvaamaan uusiutuvilla polttoaineilla kuten metsähakkeella tai puuteollisuuden sivutuotteena syntyvällä kuorella. (Energiateollisuus 2006, 27–28) Tämä näkyy erityisesti öljyn käytön voimakkaana vähentymisenä. Kaukolämmön tuotannossa öljyä käytetään yleensä vai huippukuorma- tai varakattiloissa sekä peruskuormalaitosten käynnistys- ja varapolttoaineena. Myös tekniikan kehittyminen, erityisesti leijakerrostekniikkaan perustuvien kattiloiden yleistyminen on

parantanut biomassan käytettävyyttä yhteistuotantolaitoksissa. Kivihiileen korkeaa osuutta lämmöntuotannosta selittää matala hiilen markkinahinta ja päästöoikeuksien hinnan erittäin alhainen taso. Kivihiiltä käytetään Suomessa kaukolämmöntuotantoon vain muutamassa suuressa kaupungissa.

2.2 Kaukolämmön tuotanto

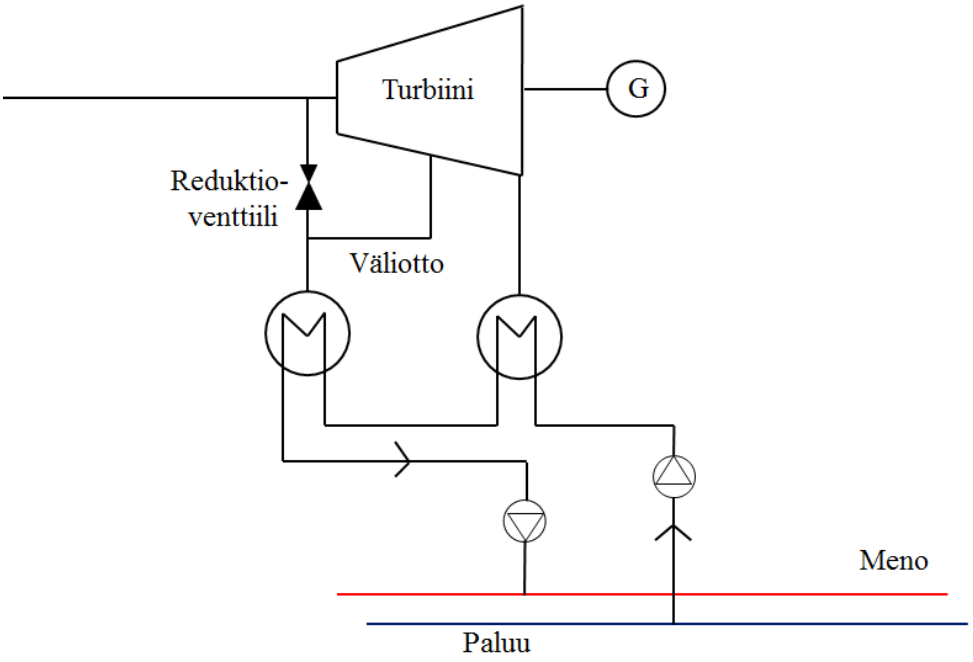
Kaukolämpöä tuotetaan Suomessa pääsääntöisesti joko sähkön- ja lämmön yhteistuotantolaitoksissa tai pelkkää lämpöä tuottavissa lämpökeskuksissa. Myös suuria lämpöpumppulaitoksia ja teollisuuden hukkalämpöä on alettu hyödyntää yhä useammassa kaukolämpöjärjestelmässä. Kaukolämmön tuotanto perustuu jokaisen järjestelmän erikokoisten laitosten optimaaliseen käyttöön. Tuotanto optimoidaan muuttuvan lämmön tuotantokustannuksen mukaisesti vastaamaan lämmön tarvetta olemassa olevalla siirtokapasiteetilla. (Mäkelä et al. 2015, 22)

Lämpökeskukset ovat pelkkää lämpöä tuottavia laitoksia, jossa lämpö siirretään yleensä joko veteen tai höyryyn. Höyryä tuottavia lämpökattiloita voidaan käyttää esimerkiksi teollisuuden tarvitsemaan höyryn- sekä kaukolämmöntuotantoon. Lämpökeskuksia voidaan käyttää joko peruskuormalaitoksina, huippulämpökeskuksina tai varalaitoksina. Peruskuormatuotantoon tarkoitetut lämpölaitokset ovat yleensä joko arinakattiloita tai leijupetikattiloita. Niissä polttoaineena käytetään kiinteää polttoainetta kuten metsähaketta tai turvetta. (Energiateollisuus 2006, 285–286) Vara- ja huippukuormalaitoksena käytetään yleensä öljy ja kaasukattiloita. Yleisimmin öljyn ja kaasun polton käytössä ovat tulitorvi-tuliputkikattilat, jotka ovat suurvesitilavuuskattiloita. Niitä käytetään erityisesti alle 12 MW kokoluokassa. (Huhtinen et al. 2004, 112)

Lämpökeskuksissa jäähtynyt kaukolämpövesi pumpataan kaukolämmön paluupuolelta lämpökeskukseen, jossa vesi kuumennetaan vakiolämpötilaan. Menolämpötilan säätö lämpökeskuksilla toteutetaan tyypillisesti sekoitussäädöllä. Lämpökeskukselta tulevan veden lämpötilan asetusarvoksi voidaan asettaa esimerkiksi 115 °C, jonka jälkeen kaukolämpöverkkoon syötettävän veden lämpötila säädetään halutuksi sekoittamalla siihen viileämpää paluuvettä. (Energiateollisuus 2011, 7) Lämpökeskuksessa kuumennettu vesi johdetaan kaukolämpöjohdon menopuolelle, mistä se johdetaan kaukolämpöverkon kautta kuluttajalle.

2.3 Yhdistetty lämmön- ja sähköntuotanto

Yhdistetty eli sähkön ja lämmön tuotantolaitos eli CHP-laitos (*engl. combined heat and power*) tuottaa lämpöä ja sähköä samassa prosessissa. Kattilaprosessissa tuotettu tulistettu höyry ohjataan turbiiniin, jossa se paisuu ja lauhtuu luovuttaen energiaa turbiiniin aksiaalisen pyörimisliikkeeseen. Turbiini pyörittä samalla askelilla olevaa tai vaihteiston kautta kytkettyä generaattoria, joka muuntaa pyörimisliikkeen sähköksi. Turbiinin jälkeen höyry johdetaan kaukolämmön vaihtimeen, jossa höyryn jäähtymisestä ja tiivistymisestä saatava energia siirretään kaukolämpöveteen. (Huhtinen et al. 2004, 11) Yksinkertainen kaavio CHP-laitoksen kaukolämpökytkennästä esitetään kuvassa 5.



Kuva 5: CHP-laitoksen yksinkertaistettu kytkentäkaavio kaukolämpöverkkoon.

Erona pelkkää sähköä tuottaviin lauhdevoimalaitoksiin on se, että turbiinilta tuleva höyry johdetaan lauhduttimen sijasta kaukolämmönvaihtimeen. Kaukolämmönvaihtimessa turbiinin vastapaine on kovempi n. 0,8–1,5 bar, jotta turbiinista tuleva höyry saadaan lauhtumaan halutulla menolämpötilalla. Lauhdevoimalaitoksessa turbiiniin vastapaine pyritään saamaan mahdollisimman lähelle absoluuttista nollaa, sähköntuotannon maksimoimiseksi. Yhteistuotantolaitoksen sähkön tuotannon ja lämmöntuotannon suhdetta kuvataan rakennusasteella, joka on tyypillisesti 0,3–0,6 välillä laitoksen tyypistä ja koosta riippuen. Yhteistuotannolla voidaan saavuttaa yli 90 % hyötysuhteita, kun lauhdevoiman hyötysuhde jää

parhaimmissakin tapauksissa alle 45 %:in. (Huhtinen et al. 2004, 11) Yleensä tuorehöyry voidaan myös turbiinin sijasta johtaa reduktioventtiilin kautta reduktiovaihtimeen. Reduktioajoa käytetään erityisesti laitoksen ylös- ja alasajossa sekä höyryturbiinin vikatilanteissa.

2.4 Savukaasupesuri

Erityisesti märkää polttoainetta kuten biomassa polttoaineena hyödyntävillä lämpökeskuksilla tai yhteistuotantolaitoksilla voidaan hyödyntää savukaasupesuria. Savukaasupesurin avulla otetaan talteen savukaasujen sisältämän vesihöyryn sisältämä lämpö. Lämmöntalteenoton lisäksi pesuri puhdistaa savukaasuja. Savukaasupesurissa savukaasujen puhdistus tapahtuu nimensä mukaisesti suihkuttamalla savukaasuihin vettä useassa vaiheessa. Pesuvaiheessa pesuvesi ja savukaasu ovat kosketuksissa niin, että savukaasun sisältämät hiukkaset imeytyvät pesuveteen. Hiukkasten poiston lisäksi pesuria voidaan käyttää myös erilaisten rikkiyhdisteiden absorboimiseen syöttämällä pesuriin alakalista kemikaalia. (Jalovaara et al. 2003, 63)

Savukaasujen puhdistuksen lisäksi savukaasupesurin päätehtävä on lämmöntalteenotto savukaasuista. Lämmöntalteenotossa kriittisintä on saavuttaa tarpeeksi alhainen savukaasujen lämpötila, jolloin savukaasun sisältämän vesihöyry saadaan lauhtumaan. Tällöin pesuveteen saadaan siirtymään vesihöyryn latenttilämpö, joka on energiasisällöltään huomattavasti suurempi pelkkään savukaasujen jäähtymiseen verrattuna. Lämmennyt pesuneste ohjataan vaihtimeen, jossa savukaasujen lauhtumisesta saatu energia siirretään kaukolämmön paluuveteen. Kaukolämpöveden lämpötila nousee noin 55–65 °C tasolle savukaasupesurin lämmönvaihtimessa. Tämän jälkeen kaukolämpövesi johdetaan varsinaiseen tuotantolaitoksen kaukolämmönvaihtimeen, missä kaukolämpövesi säädetään halutulle menolämpötilan tasolle. Savukaasupesuri ottaa talteen polttoaineen sisältävän kosteuden ja palamisessa syntyvän veden energian, jolloin se voi nostaa laitoksen laskennallisen hyötysuhteen yli sadan prosentin. Pesurin lämmöntaiteenotolla saavutetaan suoria säätöjä polttoainekustannuksissa. (Jalovaara et al. 2003, 63)

Savukaasupesureiden käyttö on yleistynyt huomattavasti johtuen tiukentuneista päästörajoituksista ja käyttötalouden paranemisesta. Erityisesti kosteilla polttoaineilla kuten metsähakkeella toimivilla laitoksilla savukaasupesurit ovat erittäin kannattavia lämmön

talteenoton johdosta. (Jalovaara et al. 2006, 63) Savukaasupesurin tuotanto on vahvasti riippuvainen kaukolämmön paluuveden lämpötilasta ja savukaasun kosteudesta. Pääasiassa savukaasun kosteuden määrittää käytetyn polttoaineen kosteus. (Huhtinen et al. 2004, 255) Savukaasunkosteuden ja paluulämpötilan lisäksi pesurin tuotantoa voi rajoittaa myös kaukolämpöveden virtaus. Tällöin savukaasuista saatavilla oleva lämpö on kaukolämpöveteen siirrettävissä olevaa lämpöä suurempi. Kaukolämpöveden vastaanottaman energiamäärä voi rajoittaa erityisesti korkeilla menolämpötiloilla ja jäähtymillä, jolloin kaukolämpöveden virtaus pienenee. Menolämpötilaa säädettäessä on otettava huomioon myös vaikutukset paluuveden lämpötilaan ja kautta pesurin tuotantoon.

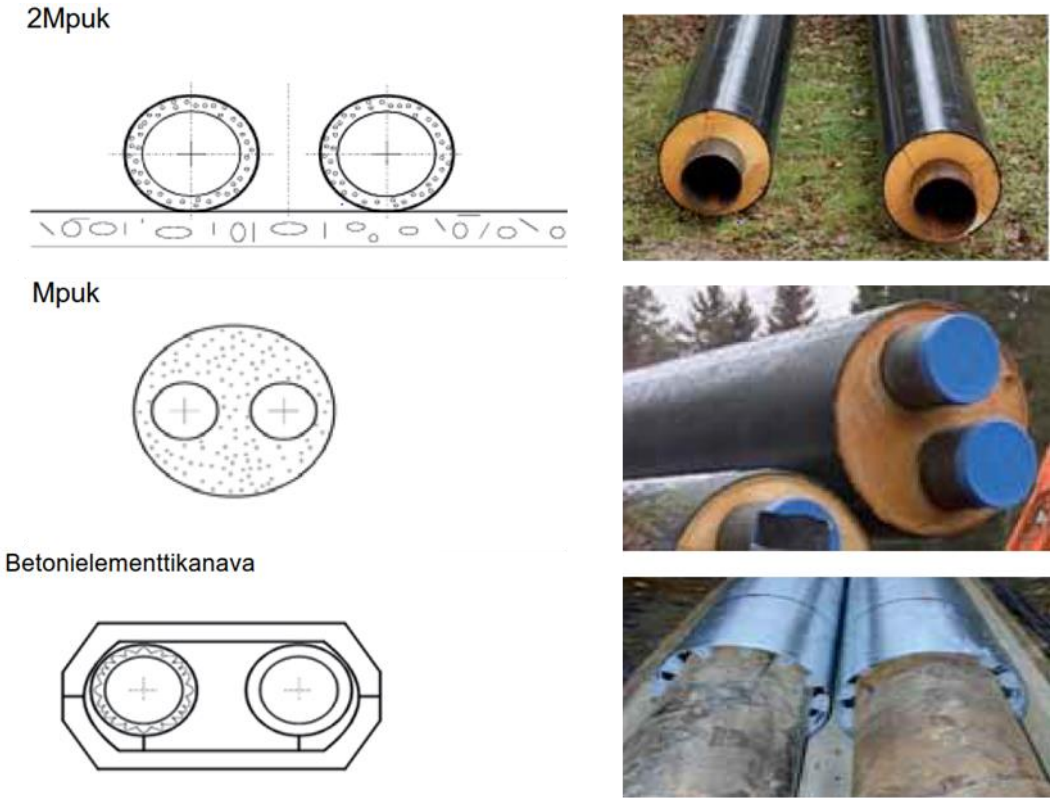
2.5 Kaukolämmön jakelu

Kaukolämmön jakelulla tarkoitetaan tuotantolaitoksilla tuotetun lämmön siirtämistä asiakaskiinteistöjen käytettäväksi. Kaukolämpöverkko koostuu eristetyistä kaukolämpöjohdoista, joissa lämmin vesi siirretään asiakkaalle ja jäähtynyt vesi takaisin tuotantolaitokselle. Siirtoon tarvittava virtaus tuotetaan kiertopumpuilla.

Kaukolämpöjohdot koostuvat rinnakkain kulkevista meno- ja paluulinjoista. Kaukolämpöjohdot jaetaan usein käyttötarkoituksen mukaisesti talo-, runko- ja jakelu tai siirtojohtoihin. Kaukolämpöjohdot asennetaan maan alle noin 0,6 m syvyyteen riippuen sijoituspaikasta sekä asennettavan putken koosta ja tyypistä. (Mäkelä et al. 2015, 56–57)

Kaukolämpöjohtojen virtausputket valmistetaan usein teräksestä, mutta esimerkiksi harvinaisemmissa matalalämpöverkoissa voidaan käyttää myös muovia. Joissain pientaloalueilla voi olla käytössä myös kupariputkia. Putkien mitoitus tapahtuu tarvittavan tehonsiirtokyvyn avulla. Kaukolämpöputkiston suunnittelulämpötila on Suomessa 120 °C ja suurin sallittu käyttöpaine on yleensä 1,6 MPa. Joissain verkoissa painetaso voi olla alhaisempi 1 MPa. Matalapaineiset verkot ovat kuitenkin huomattavasti harvinaisempia. (Mäkelä et al. 2015, 56)

Kaukolämpöjohdot koostuvat nykyisin tehdasvalmisteisista kaukolämpöelementeistä, jotka koostuvat teräksisestä virtausputkesta, lämpöeristeestä ja suojakuoresta. Käytetyin lämpöeriste on polyuretaani. Kuvassa 6 esitetään käytetyimmät kanavatyypit.



Kuva 6: Kaukolämmityksen kanavatyyppejä. (mukaillen Mäkelä et al. 2015, 57)

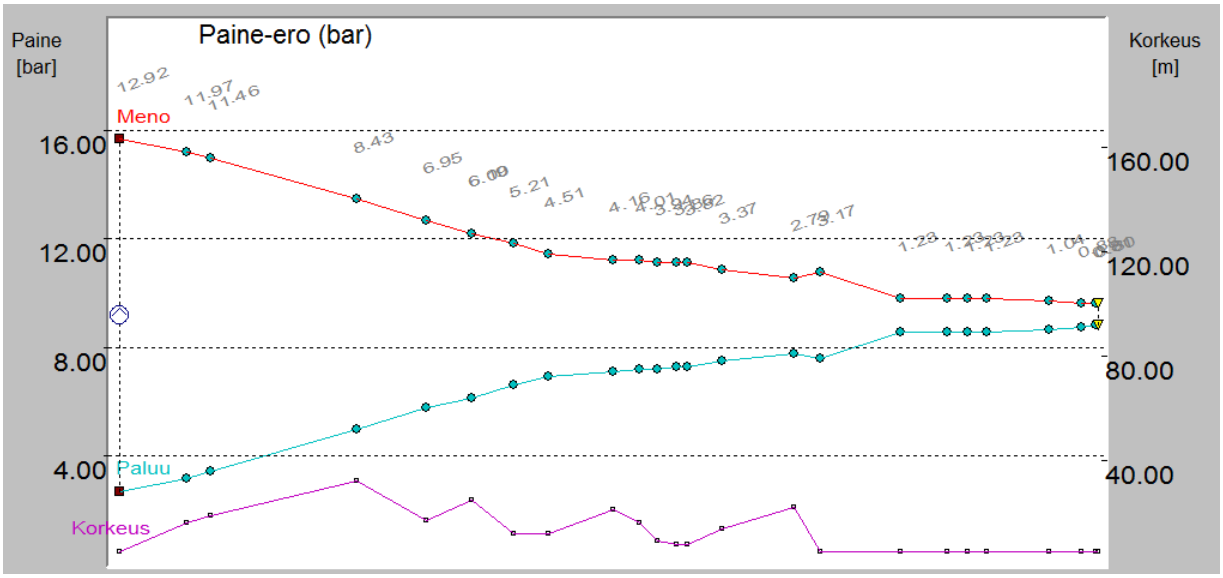
Nykyisin rakennettavat kaukolämpöjohdot ovat kuvassa 6 esitettyjä muovisuojakuorisia polyuretaanieristettyjä kanavatyyppejä; Mpuk ja 2Mpuk. Mpuk -kanavassa kaksi virtausputkea kulkee samassa muovikuoressa kun taas 2Mpuk -kanavassa molemmille virtausputkille on oma suojakuori. Betonikanavassa virtausputken eristeenä käytetään mineraalivillaa tai polyuretaanikourua. Betonielementtikanavaa ei enää uutena asenneta, mutta niitä on edelleen melko runsaasti käytössä Suomalaisissa kaukolämpöverkoissa. (Mäkelä et al. 2015, 57–59) Kaukolämpöverkon operoinnin kannalta erot erityyppisten kanavarakenteiden välillä liittyvät lähinnä verkon lämpöhäviöihin. Muita käyttöteknisiä eroja eri tyyppien välillä ei juuri ole.

Lämmön siirtämiseksi tuotantolaitoksilla kuumennettu vesi on pumpattava asiakkaille kiertopumpuilla. Kiertopumppujen lisäksi kaukolämpöjärjestelmässä tarvitaan pumppausta paineenpitoon ja lisäveden pumppaukseen. Paineenpitopumpuilla säädetään verkon painetasoa ja kiertopumpuilla paine-eroa. Kiertopumput ovat yleensä keskipakopumppuja, jotka on sijoitettu tuotantolaitoksille. Riippuen verkon ominaisuuksista ja ajotilanteista, järjestelmässä voi olla myös erillisiä välipumppaamoja, joilla meno- tai paluulinjan painetta voidaan nostaa

esimerkiksi kulutushuippujen aikana. Kaukolämmön kiertopumput mitoitetaan tuotantolaitoksen-, kaukolämpöverkon- ja mittakeskuksen painehäviöistä riippuen. Kiertopumpun mitoituksessa käytettäviä parametreja ovat tilavuusvirta, vastaava nostokorkeus, hyötysuhde ja kierrosnopeus. Kyseiset arvot selviävät koeajoissa määritetyistä pumppujen ominaiskäyristä, jotka löytyvät pumpputoimittajilta. (Energiateollisuus 2006, 169–170)

Pumppaukselta vaadittavan virtaama määräytyy kuluttajien tehontarpeen sekä kaukolämpöveden menolämpötilan ja jäähtymän suhteen. Pumppauksen rajoittavina tekijöinä ovat kriittisen asiakkaan paine-ero, jonka minimiarvona on 0,6 bar. Lisäksi on huomioitava verkon korkein sallittu painetaso, joka on yleensä paineluokan PN 16 mukainen 16 bar. Kaukolämmön pumppausta säätötapoja on useita. Pumppauksen säätö tapahtuu usein automatiikan avulla, niin että paine-ero tuotantolaitoksella tai kriittisellä asiakkaalla pidetään vakiona (minimipaine-ero säätö). Säätö voidaan toteuttaa myös säätämällä kaukolämpöveden virtausta. (Energiateollisuus 2011, 8)

Kuvassa 7 esitetään esimerkkiverkolle B kaukolämpöveron mallinnusohjelmalla määritetty painesuhdekuvaaja. Kuvan vasemmassa reunassa kuvataan laitoksen kaukolämpöpumppua, jolla laitokselle saapuvan paluuveden paine nostetaan menopuolen paineeseen. Punainen käyrä kuvaa menopuolen painetta useissa pisteissä laitoksen ja latvapisteen asiakkaan välillä. Sininen käyrä kuvaa kaukolämpöveden painetta vastaavan linjan paluupuolella.



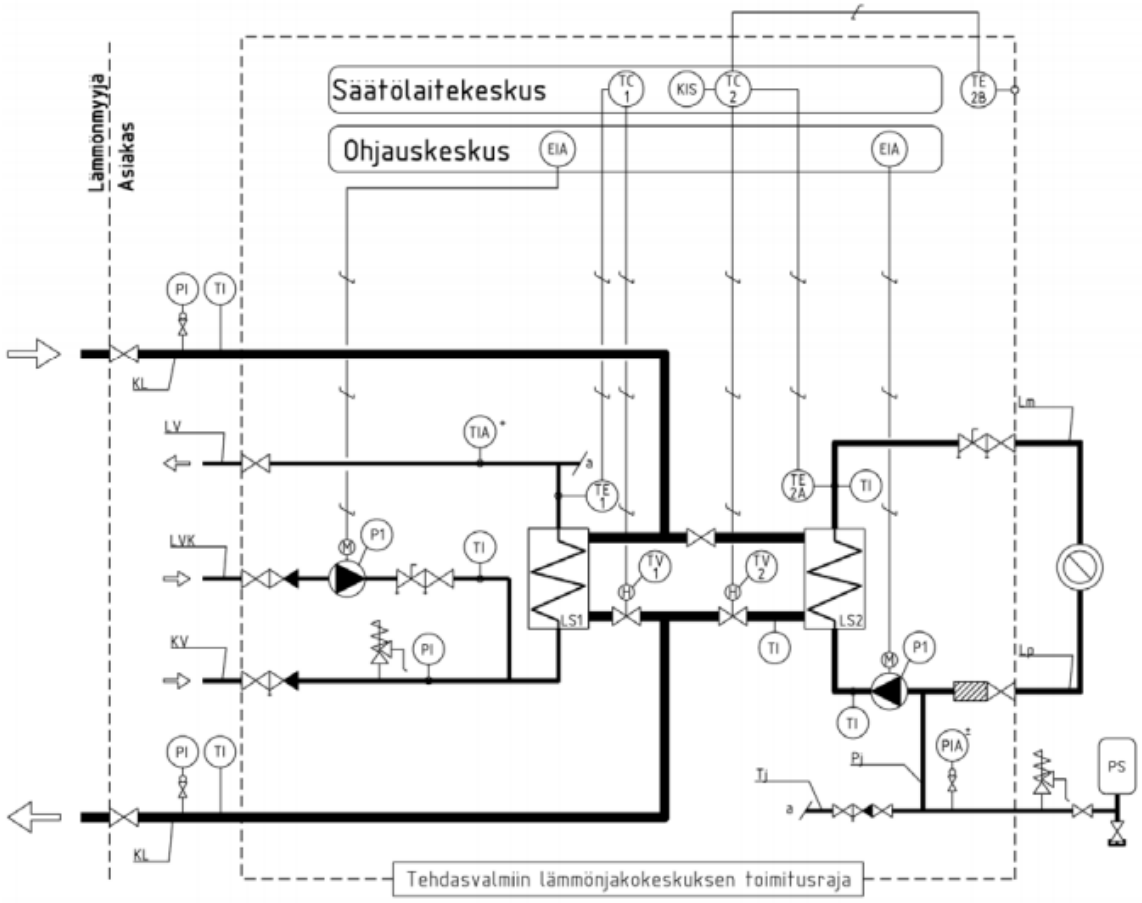
Kuva 7: Esimerkkiverkon B painesuhdekuvaajan tuloste Grades heating kaukolämpöverkon mallinnusohjelmasta. (Pöyry Finland Oy 2018)

Varsinainen pumppauksen säätö toteutetaan taajuusmuuntajan avulla tehtävällä pyörimisnopeussäädöllä, kuristusventtiilillä, ohivirtauksella, johtosiipisäädöllä tai tekemällä muutoksia juoksupyörään. Johtosiipisäätö tai juoksupyörän säätö ovat harvinaisia, sillä ne vaativat rakenteellisia muutoksia pumppuun. Ohitussäätö on erittäin epätaloudellinen eikä sitä yleisesti käytetä. Käytetyimmät säätötavat ovat kuristusventtiili tai taajuusmuuntajalla toteutettava pyörimisnopeussäätö. Pyörimisnopeussäädössä voidaan pumpun omaiskäyrää muuttaa tarpeen mukaan, kärsimättä pumppauksen hyötysuhteessa. Kuristussäädöllä muutetaan putkiston ominaiskäyrää, niin että nostokorkeus saadaan halutuksi. Kuristussäätö heikentää tyypillisesti pumppauksen hyötysuhdetta. (Energiateollisuus 2006, 172)

2.6 Kaukolämpöasiakkaat

Kaukolämmön kulutus määräytyy verkkoon kytkettyjen rakennusten lämmöntarpeen perusteella. Rakennusten lämmöntarve koostuu huonetilojen-, ilmanvaihdon- ja käyttöveden lämmityksestä. Talvella lämmityksen tarve on huomattavasti kovempi kuin kesällä, jolloin lämpöä kuluu asuinkiinteistöissä pelkän käyttöveden lämmittämiseen.

Suomessa asiakkaat kytketään kaukolämpöverkkoon epäsuorasti lämmönsiirtimien välityksellä. (Energiateollisuus 2004, 41) Asiakkaan lämmönjakokeskus koostuu tyypillisesti lämpimän käyttöveden vaihtimesta sekä lämmitys- ja ilmanvaihtoverkoston vaihtimesta. Kuvassa 8 esitetään tehdasvalmiin lämmönjakokeskuksen peruskytkentä.

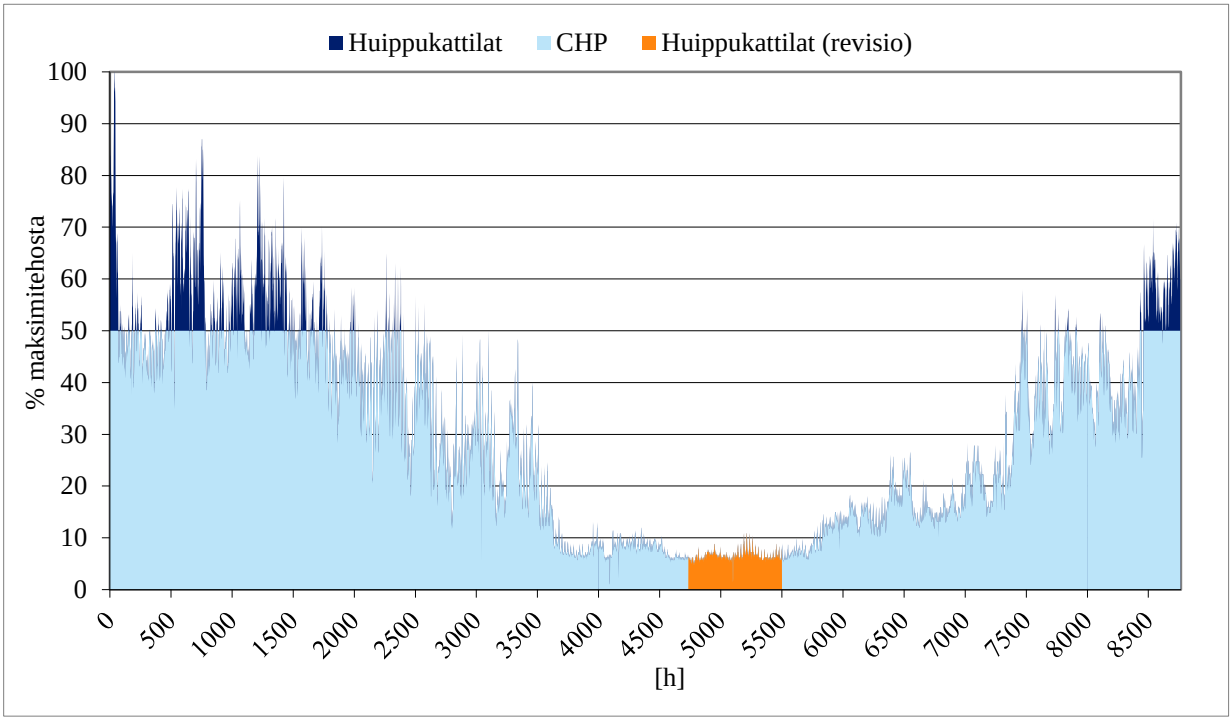


Kuva 8: Lämmönjakokeskuksen peruskytkentä. (Energiateollisuus 2014, 32)

Kuvan 8 mukaisessa lämmönjakokeskuksessa käyttöveden lämpötilaa säädetään venttiilin TV1 avulla. Asetusarvoksi valitaan yleensä 58°C. Säädön asettamisessa on huomioitava käyttöveden minilämpötila 55°C, joka käyttövesivaihtimen toisiopuolelta on vähintään saatava. Tällöin vaihtimen ensiöpuolelle tulevan kaukolämpöveden on viimeiselläkin asiakkaalla yli 60°C vaihtimen asteisuudesta riippuen. Lämmitysverkoston menoveden säätö tapahtuu säätöventtiiliin TV2 avulla. Lämmitysverkon menolämpötilaa säädetään ulkolämpötilan mukaan. Säätökäyrä riippuu kiinteistön pattereiden mitoituksesta. Ennen 80-lukua patterit mitoitettiin 90 °C tai 80 °C menolämpötilalle, mutta nykyään yleisimmin on käytössä 70/40 (meno/paluu) mitoitus. Nykypäivän uudisrakennusten ilmanvaihdon- ja lämmitysverkon vaihtimien toisiopuolen menolämpötilan maksimiarvoksi on asetettu 60 °C. (Energiateollisuus 2014, 32).

Kaukolämpöverkon operoinnin kannalta on tärkeää varmistaa, että paine-ero asiakaslaitteiston yli on vähintään 0,6 bar. Yli 5 bar paine-ero aiheuttaa meluongelmia asiakaan säätöventtiileissä, joten sitä voidaan pitää maksimiarvona (Energiateollisuus 2011, 1) Lisäksi on huolehdittava, että käyttöveden lämpötila sekä lämmitysjärjestelmän lämpötilat pysyvät vaaditulla tasolla.

Asiakaskiinteistöjen lämmitykseen ja lämpimän käyttöveden lämmitykseen tarvittava lämpöenergia vaihtelee huomattavasti säätilasta ja sosiaalisista tekijöistä riippuen. Kaukolämmön kysyntä on riippuvainen ulkolämpötilasta sekä muista säätilan olosuhteista kuten sademäärästä ja tuulennopeudesta. Myös sosiaaliset tekijät eli ihmisten tyypillinen toiminta vaikuttaa kaukolämmön kulutukseen vaihteluun viikonpäivästä ja kellonajasta riippuen. Kuvassa 9 esitetään tyypillinen kaukolämpöverkon tuotantokäyrä vuositasolla.

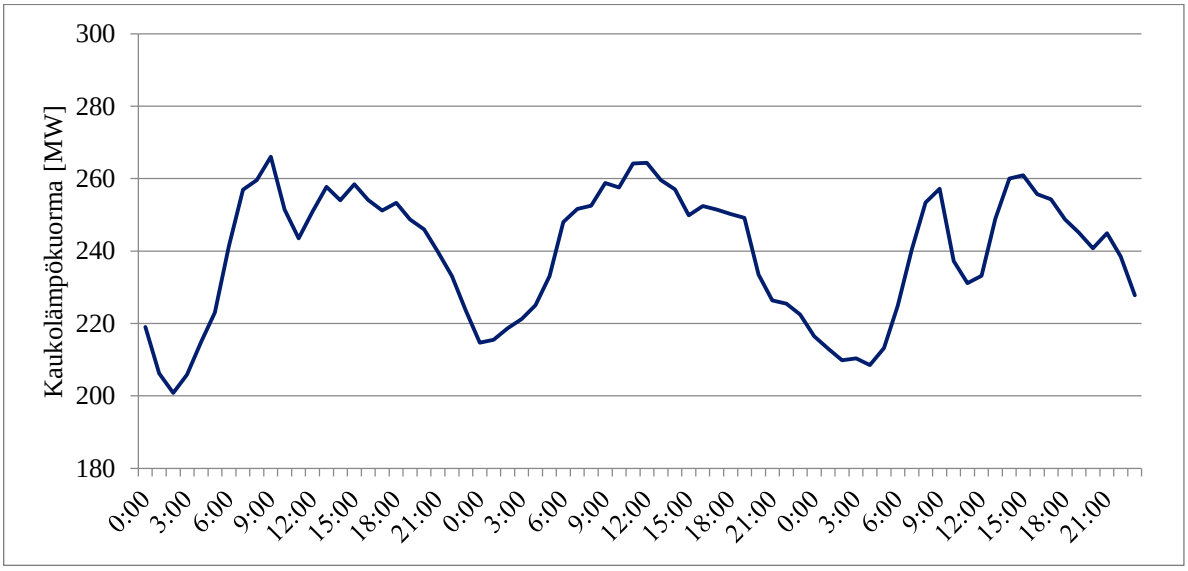


Kuva 9: Kaukolämmön tyypillinen tuotantokäyrä vuositasolla. (Pöyry Finland Oy 2018)

Kuvan 9 vuosituotanto eroaa kulutuskäyrästä vain verkostohäviöiden osalta. Käyrästä voidaan nähdä kuinka talvikuukausina lämmönkysyntä kylmänä tammikuisena pakkaspäivänä voi olla jopa yli kymmenkertainen verrattuna kesä heinäkuun kysyntään. Kuvassa esitetään myös tyypillinen kausittainen tuotantomalli, missä peruskuormalaitos mitoitetaan n. 50 % tehoon verkon maksimikuormasta. Vaikka peruskuormalaitoksen teho on puolet verkon

maksimitehosta, tuotetaan sillä noin 90 % verkon vuotuisesta lämmöntarpeesta. Loput 10 % vuotuisesta lämmöntarpeesta tuotetaan huippukattiloilla. Kaukolämpöverkon vuosienergian ja huipputehon suhdetta kuvataan huipunkäyttöajalla. Se kuvaa, kuinka monta tuntia kuluisi, jos vastaava vuosienergia tuotettaisiin verkon maksimiteholla. (Energiateollisuus 2004, 41) Tavallisesti kaukolämpöverkkojen huipunkäyttöaika vaihtelee 2600–3300 h/a välillä.

Viikkotasolla lämmöntarve vaihtelee viikonpäivästä riippuen. Viikonloppuna ja arkipyhinä lämmönkulutus on tavallisesti muita viikonpäiviä pienempi. (Energiateollisuus 2004, 42) Kaukolämmön kulutuksen vuorokausiprofiili vaihtelee paljon säätilan mukaan, mutta tyypillisesti se toistaa sosiaalisista tekijöistä aiheutuvaa muotoa. Kuvassa 10 esitetään Suomalaisen kaukolämpöverkon kulutuskäyrä kolmen Tammikuisen päivän ajalta.



Kuva 10: Esimerkkiverkon D lämmön kysynnän vaihtelu kolmen vuorokauden ajalta Tammikuussa 2016 (Pöyry Finland Oy 2018)

Kuvasta 10 huomataan, että suurimmat kulutushuiput painottuvat aamun tunneille, johtuen asuinkiinteistöjen ilmanvaihdon käynnistymisestä ja käyttöveden kulutuksen huipusta. Yöllä kaukolämmön tarve on pienempää vähäisestä käyttöveden kulutuksesta johtuen.

3 MENOLÄMPÖTILAN VAIKUTUS KAUKOLÄMPÖJÄRJESTELMÄSSÄ

Menolämpötila vaikuttaa kaukolämpöjärjestelmän kaikkiin osiin; tuotantoon, jakeluun ja asiakkaisiin. Menolämpötilan säädössä periaatteena on taata laadukas ja tasalaatuisen lämmöntoimitus asiakkaille, huomioiden taloudelliset vaikutukset tuotannossa ja jakeluhäviöissä. Tässä luvussa esitetään menolämpötilan säädön perusperiaatteet sekä säädön vaikutukset tuotantoon ja jakeluhäviöihin. Lisäksi luvussa arvioidaan menolämpötilan säädön kustannusvaikutuksia pumppaukseen, verkostohäviöihin, vastapainesähköntuotantoon sekä savukaasupesurin lämmöntalteenottoon. Kustannusvaikutusta pumppauksessa, verkostohäviöissä ja sähköntuotannossa arvioidaan esimerkkiverkossa A +- 5°C menolämpötilan muutoksilla. Kustannusvaikutusten arviointi perustuu Grades Heating verkostomallinnusohjelmalla määritettyihin arvoihin. Lisäksi luvussa arvioidaan menolämpötilan vaikutusta paluulämpötilaan hyödyntämällä esimerkkiverkon D asiakkaiden tuntimittausdataa. Menolämpötilan vaikutusta savukaasupesurin tuotantoon arvioidaan mallintamalla esimerkkiverkon B kaukolämmön tuotantoa.

3.1 Kaukolämmön menolämpötilan säätö

Perusperiaate kaukolämmön menolämpötilan säädöstä pohjautuu kaukolämpöverkon energiataseeseen. Kaukolämpövedestä asiakkaalle siirrettävä lämpö sekä tuotantolaitokselta kaukolämpöveteen siirtyvä energia voidaan laskea yhtälön 1 mukaisesti (Mäkelä et al. 2015, 45).

$$\Phi_{\mathrm{kl}} = q_{\mathrm{m,kl}} \cdot \bar{c}_{\mathrm{p,H2O}} \cdot \left(T_{\mathrm{kl,m}} - T_{\mathrm{kl,p}}\right) \quad (1)$$

missä

Φ_{kl}	on kaukolämpöteho	[W]
$q_{\mathrm{m,kl}}$	on kaukolämpöveden massavirta	[kg/s]
$\bar{c}_{\mathrm{p,H2O}}$	on veden ominaislämpökapasiteetti	[J/KgK]
$T_{\mathrm{kl,m}}$	on kaukolämpöveden menolämpötila	[K, °C]
$T_{\mathrm{kl,m}}$	on kaukolämpöveden paluulämpötila	[K, °C]

Yhtälö 1 perusteella voidaan todeta, että kaukolämpöveden virtaus on kääntäen verrannollinen kaukolämpöveden jäähtymään. Asiakkaan lämmöntarpeen pysyessä vakiona, menolämpötilan lasku johtaa tilanteeseen, missä vesivirtaa on kasvatettava riittävän lämmönsiirron takaamiseksi. Toisaalta menolämpötilaa nostamalla, tarvittava vesivirta pienenee paluulämpötilan ollessa vakio.

Tuotantolaitoksilta lähtevää kaukolämmön menoveden lämpötilaa säädetään tyypillisesti ulkolämpötilan mukaan, kuitenkin huomioiden rajoitukset lämpötilan ala- ja ylärajoilla. Menolämpötilan alarajaa määräävät seuraavat tekijät. (Energiateollisuus 2006, 335)

- Asiakkaiden kaukolämpölaitteiden mitoitus ulkolämpötilan ja muiden sääolosuhteiden mukaisesti
- Käyttöveden lämpötilan minimi 55 °C käyttövesivaihtimen toisiopuolella
- Kaukolämmön menolämpötila kriittisellä asiakkaalla
- Verkon siirtokyvyn rajallisuus; Vesivirran nosto johtaa liian suuriin painehäviöihin kaukolämpöverkossa

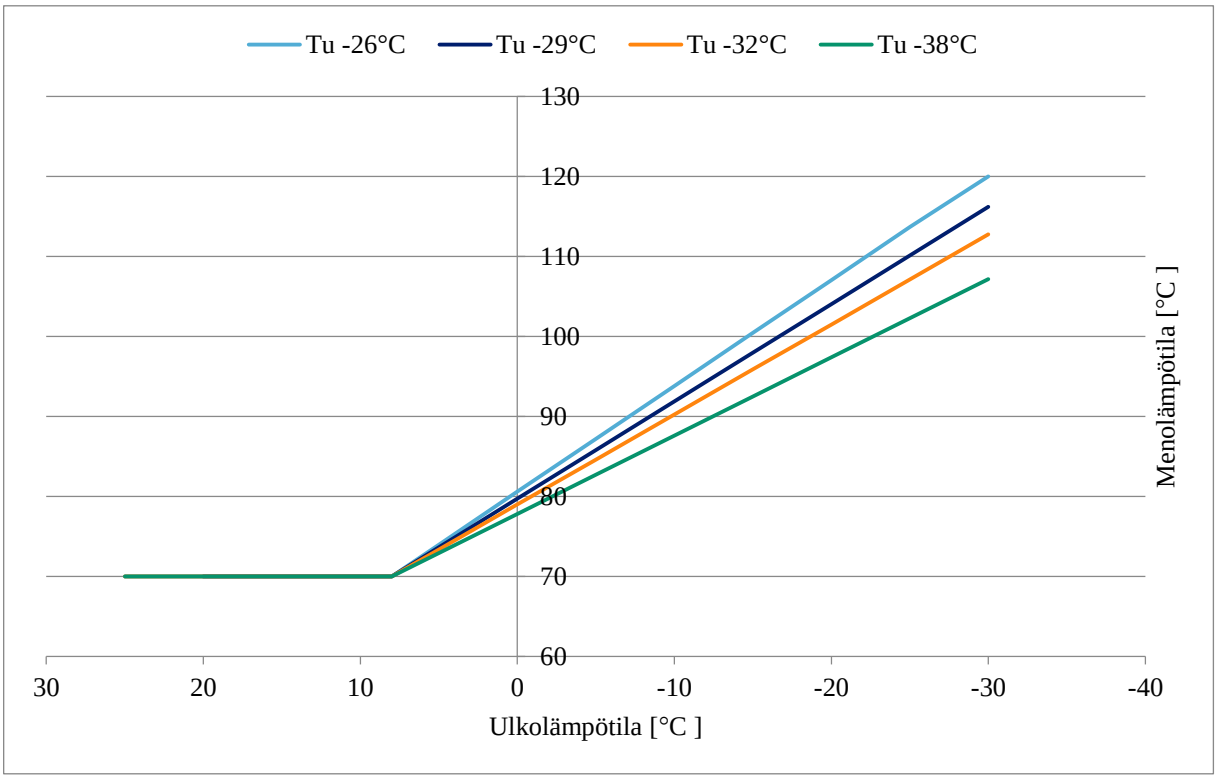
Kolme ensimmäistä kohtaa liittyvät samaan tekijään, eli kriittisen asiakkaan menolämpötilaan. Kauimmaisenkin asiakkaan lämmönjakokeskukseen menevän kaukolämpöveden tulee yltää vähintään käyttöveden ja kiinteistön lämmitysverkon lämpötilakäyrien arvoihin.

Rakennusten lämmönjakokeskuksen lämmönsiirtimet °C mitoitetaan voimassa olevan suosituksen perusteella. Uudisrakennusten lämmityksen ja ilmanvaihdon lämmönsiirtimet mitoitetaan rakennusten kaukolämmitys-suosituksen K1/2013 mukaisesti. Mitoituslämpötilat esitetään taulukossa 2.

Taulukko 2: Uudisrakennusten lämmityksen ja ilmanvaihdon lämmönsiirtimien mitoituslämpötilat mitoitusulkolämpötilassa. (mukaillen Energiateollisuus 2004, 8)

	Ensiö		Toisio	
	Tulo	Paluu	Paluu	Meno
Lämmityksen lämmönsiirtimet, radiaattori lämmitys -suositus	115	33 (Max)	30 (Max)	45 (Max)
Lämmityksen lämmönsiirtimet, radiaattorilämmitys - poikkeustapaukset	115	33 (Max)	30 (Max)	60 (Max)
Lämmityksen lämmönsiirtimet, lattialämmitys	115	33 (Max)	30 (Max)	60 (Max)
Kosteiden tilojen mukavuuslattialämmitys	70	28 (Max)	25 (Max)	30 (Max)
Ilmanvaihdon lämmönsiirtimet	150	33 (Max)	30 (Max)	60 (Max)

Lämmönvaihtimien toiminta tulee suosituksen mukaan varmistaa myös muissa toimintapisteissä käytetyillä kaukolämmön menolämpötiloilla. Mitoituksen perusteeksi lämmönmyyjä voi toimittaa kaukolämmön tulolämpötilat eri ulkolämpötiloilla. Mikäli tulolämpötiloja ei ole saatavilla, voidaan mitoitus muissa toimintapisteissä eri mitoitusulkolämpötiloilla varmistaa kuvan 11 mukaisten käyrien perusteella. (Energiateollisuus 2014, 9)



Kuva 11: K1/2013 mukaiset mitoituslämpötilat eri mitoitusulkolämpötiloilla. (Energiateollisuus 2014, 9)

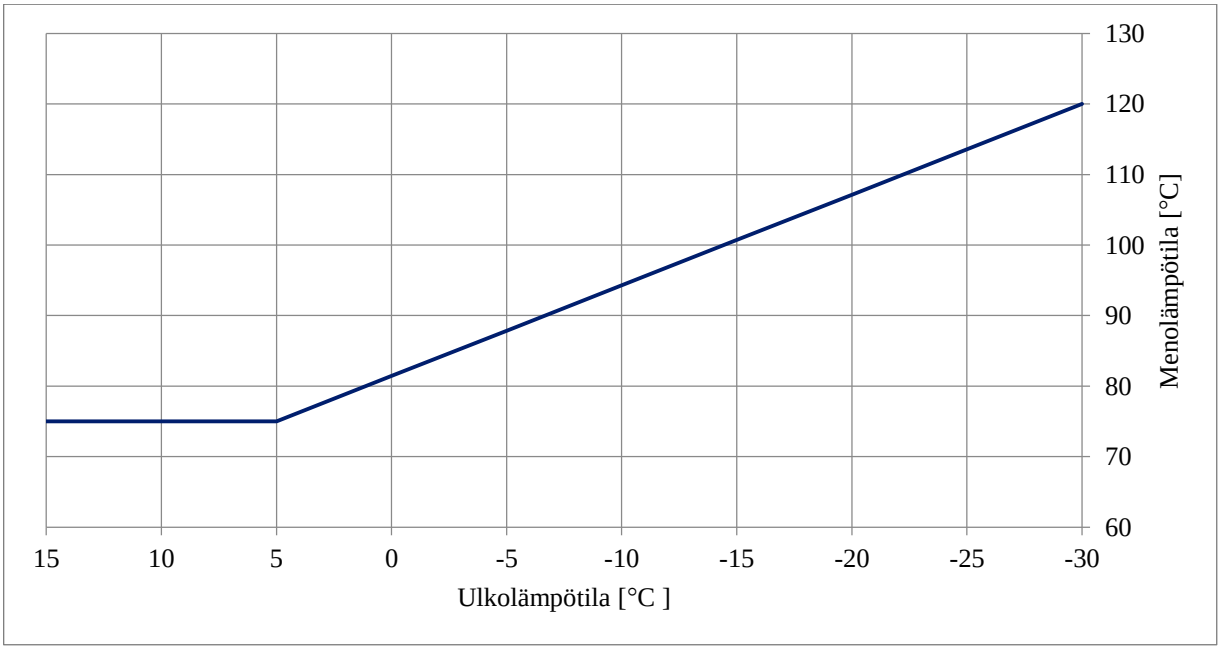
Kuvan 11 käyrät eri mitoitusulkolämpötiloilla vastaavat toisaalta myös asiakaslaitteiston ensiöpuolen minimilämpötilaa, joilla lämmönsiirtimien toimivuus on varmistettu. Tuotantoyksiköltä lähtevän menolämpötilan säädössä on kuitenkin huomioitavat verkossa tapahtuva jäähtymä.

Verkon siirtokyvyn rajallisuudella viitataan lämpötilan pudotuksesta kasvavaan vesivirtaan, jonka voi aiheuttaa turhan suuria painehäviöitä verkon pullonkaulaosissa. Kesällä menolämpötilan laskua voi rajoittaa menoveden lämpötila kauimmaisella asiakkaalla. Syksy-, talvi- ja kevätaikaan rajoittava tekijä on tyypillisesti verkoston pullonkaulojen myötä nouseva painehäviöt joihin, pumppauksen nostokorkeus ei enää riitä. Kaukolämmön menolämpötilan ylärajaa määräävät seuraavat tekijät (Energiateollisuus 2004, 336):

- Verkon suunnittelulämpötila (tyypillisesti 120 °C)
- Menolämpötilan nousun johdosta heikkenevä vastapainevoimalaitoksen sähköntuotanto
- Kasvavat lämpöhäviöt

Teknisesti menolämpötilan ylärajaa rajoittaa vain verkon suunnittelulämpötila. Pienenevä vastapainesähköntuotanto ja kasvavat lämpöhäviöt liittyvät menolämpötilan taloudelliseen optimointiin.

Menolämpötilan säätö Suomessa perustuu tyypillisesti korjattuun Lämpölaitosyhdistyksen suosituskäyrään. Suosituskäyrä perustuu vuonna 1978 menovesilämpötilatyöryhmän Lahden kaupungin sähkölaitoksille tekemiin testiajoihin. Suosituksen perustana olivat asiakaslaitteiston mitoituslämpötilat sekä arvio menolämpötilan jäähtymästä tuotantolaitoksen ja latvapisteen asiakkaan välillä. Kuvassa 12 esitetään työryhmän määrittämä menolämpötilakäyrä ulkolämpötilan funktiona. (Lämpölaitosyhdistys ry 1978, 1–5)



Kuva 12: Kaukolämmön menolämpötilan suosituskäyrä ulkolämpötilan funktiona. (mukaillen Energiateollisuus 2006, 336)

Kuvassa 12 esitetty säätökäyrä on tyypillisesti korjattu niin, että se vastaa paremmin kyseisen kaukolämpöverkon erityispiirteitä pumppauksen ja verkossa tapahtuvien lämpöhäviöiden osalta. Ulkolämpötilamittaukseen perustuva menolämpötilan säädön ongelmana on se, ettei se vastaa verkon todellista kysyntää tai pumppauksen tarvetta. Myös muut parametrit kuten kellonaika, viikonpäivä ja sademäärä vaikuttavat kaukolämmön kysyntään ja pumppaukseen. Yhtälön 1 mukaisesti todellinen menolämpötilaan vaikuttava parametri on lämmönkysyntä ja virtaus, joiden avulla voidaan määrittää tarvittava jäähtymä. Lisäksi uudet

polyuretaanieristetyt kaukolämpöjohdot, asiakaslaitteiden mitoittaminen alemmille lämpötiloille ja uudet säätö- ja automaatiojärjestelmät ovat johtaneet tilanteeseen, missä käytössä oleva suositus on mahdollista päivittää teknillistaloudellisesti tehokkaammaksi.

3.2 Muuttuva lämmöntuotantokustannus

Kaukolämmön menolämpötilaa optimoidessa on tunnettava lämmön tuotannon muuttuva kustannus. Lämmön muuttuva tuotantokustannus saadaan laskettua yksinkertaisesti polttoaineen hinnan ja laitoksen lämmöntuotannon hyötysuhteen avulla. Polttoaineen hintaan sisällytetään mahdolliset verot, huoltovarmuusmaksut sekä päästöoikeuksien hinnat. Yhteistuotantolaitoksilla lämmöntuotantokustannukseen otetaan huomioon myös sähkön myynnistä saatavat tulot. Tässä työssä käytettävät polttoaineiden verolliset yksikköhinnat sekä sähkön myynti- ja ostohinnat esitetään taulukossa 3.

Taulukko 3: Työssä käytettävät polttoaineiden verot ja päästöoikeudet sisältävät hinnat, sekä sähkön myynti- ja ostohinnat. Luvut eivät sisällä arvonlisäveroa.

Polttoaineet		
Biomassa	€/MWh	20
Maakaasu	€/MWh	45
Kevyt polttoöljy	€/MWh	80
Sähkö		
Myynti (Elspot FIN)	€/MWh	35
Osto (sis. Verot & siirrot)	€/MWh	80

Lämmön muuttuva tuotantokustannus lämpökeskuksilla ja CHP-laitoksilla voidaan laskea yhtälön 2 mukaisesti.

$$K_{kl} = \frac{K_{pa}}{\eta_{kl}} - r \cdot \left(K_{elspot} - \frac{K_{pa}}{\eta_{el}}\right) \quad (2)$$

missä K_{kl} on kaukolämmön muuttuva tuotantokustannus [€/MWh]

η_{kl} on kaukolämmöntuotannon hyötysuhde [-]

r on laitoksen rakennussuhde [-]

K_{elspot} on sähkön markkinahinta [€/MWh]

K_{pa} on polttoaineen muuttuva kustannus [€/MWh]

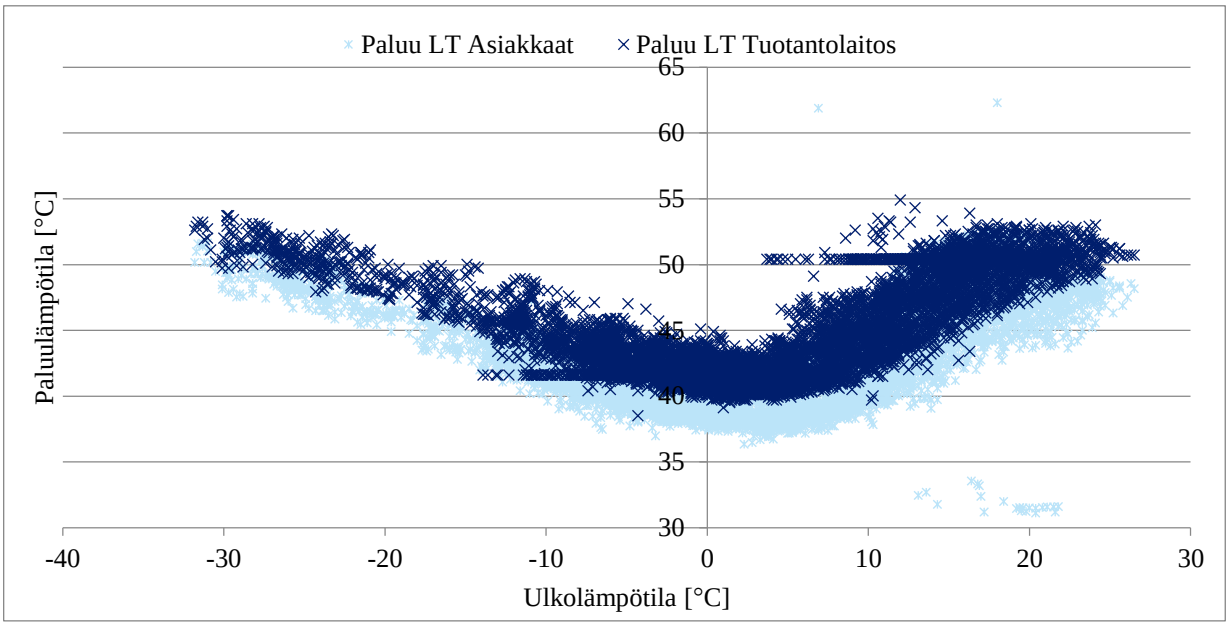
η_{el} on sähköntuotannon hyötysuhde [-]

Lämmöntuotannon muuttuvassa tuotantokustannuksessa ei oteta huomioon laitoksen elinkaaren kiinteitä kustannuksia. Tässä työssä keskitytään van olemassa oleviin verkkoihin ja laitoksiin, jolloin vain tuotantokustannuksen muuttuva osuus merkitsee optimointia tehtäessä. Esimerkkinä metsähaketta hintaan 20 €/MWh käyttävä CHP-laitos, joka tuottaa kaukolämpöä 90 % hyötysuhteella. Uusiutuvaksi polttoaineeksi luokiteltavan metsähakkeen hintaan ei sisälly veroja tai päästömaksuja. Laitoksen rakennusaste on 0,4 ja se tuottaa sähköä 0,882 kokonaishyötysuhteella. Sähkön myyntihinnaksi arvioidaan 35 €/MWh. Kyseisen laitoksen lämmön muuttuvaksi tuotantokustannukseksi saadaan 17,3 €/MWh. Vastaavalla polttoaineella ja hyötysuhteella toimivan lämpökeskuksen lämmöntuotannon muuttuvaksi kustannukseksi saadaan 22,2 €/MWh. Tässä tapauksessa laitoksen rakennusaste on nolla.

3.3 Menolämpötilan vaikutus paluulämpötilaan

Yhtälön 1 mukaisesti tarvittava kaukolämpöveden virtaamaan liittyy olennaisesti kaukolämpöveden jäähtymään. Kaukolämmön jäähtymä riippuu käytännössä asiakaan lämmönjakokeskuksen tosiopuolen paluulämpöiltasta. Paluulämpötila vaihtelee huomattavasti asiakkaiden tehontarpeesta ja käyttöveden kulutuksesta riippuen. Menolämpötilan vaikutusta jäähtymään ja paluulämpötilaan on vaikea yhdistää, sillä vaikutukset ovat hyvin asiakaskohtaisia. (Mäkelä et al. 2015, 108)

Primääripuolen paalulämpötilan alarajan määrittää lämmönjakokeskuksen toisiopuolen paluulämpötila. Tämä vaihtelee huomattavasti asiakkaan tehontarpeesta riippuen. Kesäaikana lämmönjakokeskuksen tilalämmityksen säätöventtiilin ollessa kiinni kaukolämpöä käytetään vain lämpimän käyttöveden käyttöön. Tyypillisesti lämpimän käyttöveden kierto nostaa kaukolämmön paluulämpötiloja, sillä lämmintä käyttövettä ei käytetä jatkuvasti. (Gadd et al. 2014, 60) Esimerkkiverkko D:n noin 6000 asiakkaan tuntimittausten perusteella määritetty volyymipainotettu paluulämpötilojen keskiarvo esitetään ulkolämpötilan funktiona kuvassa 13. Lisäksi kuvassa esitetään tuotantolaitokselle palaavan kaukolämpöveden lämpötilan tuntimittaukset.



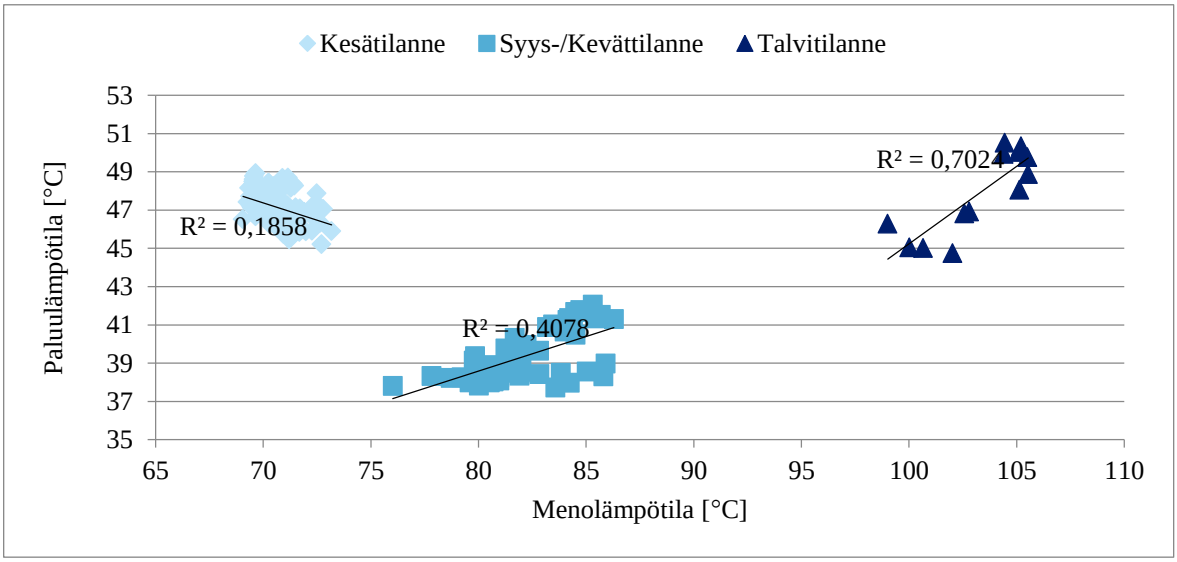
Kuva 13: Esimerkkiverkon D asiakkaiden ja tuotantolaitoksen paluulämpötilat ulkolämpötilan funktiona. (Pöyry Finland Oy 2018)

Esimerkkiverkon D tuntimittausten perusteella piirretty pisteparvi on tyypillinen, sillä paluulämpötilat kohoavat kesä- ja talviaikaan. Kesällä lämpimän käyttöveden kierto lämmittää paluuvettä. Talvella paluulämpötilan määrittää asiakkaan lämmityskierron sekundääripuoli. Lämmityskierron menolämpötilan säätö perustuu ulkolämpötilaan, mikä johtaa myös paluulämpötilan ulkolämpötila riippuvuuteen. (Gadd et al. 2014, 60–64) Esimerkkiverkon pisteparvessa ulkolämpötilan ja paluuveden lämpötilan riippuvuus on lineaarista alle 2°C ulkolämpötiloilla.

Paluulämpötilat tuotantolaitoksella on aina asiakkaiden paluulämpötiloja korkeampi, johtuen meno- ja paluupuolen välisestä suorista kytkennöistä. Lisäksi vara- ja huippukattiloiden lämpimänä pito nostaa tuotantolaitokselle saapuvan paluuveden lämpötilaa. Menolämpötilan lasku voi johtaa tuotantolaitoksella alhaisempiin paluulämpötiloihin juuri suorien kytkentöjen johdosta. Meno- ja paluulinjojen välisen lämmönsiirron vaikutus paluuveden lämpötilaan voidaan olettaa vähäiseksi, paluuputken ja maaperään välisen lämmönsiirto ollessa lähes yhtä suurta (Energiateollisuus 2018).

Menolämpötilan muutoksen vaikutusta asiakkaiden primääripuoleen paalulämpötilaan on vaikea arvioida, sillä se riippuu pitkälti asiakaslaitteiden toisiopuolen säädöistä sekä lämpimän käyttöveden käytöstä. Menolämpötilan vaikutusta paluulämpötiloihin, tulisi kokeellisesti

määrittää verkkokohtaisilla testiajoilla. Tällöin voidaan selvittää selvittää myös suorien kytkentöjen mahdollinen vaikutus paluulämpötilaan. Kuvassa 14 esitetään kolmessa eri ajotilanteessa mitattujen asiakaslaitteiden meno- ja paluulämpötilojen suhteet. Pisteparvi perustuu esimerkkiverkon D asiakkaiden tuntimittausdataan meno- ja paluulämpötilasta. Arvot ovat volyymipainotettuja keskiarvoja.



Kuva 14: Tuntimittausten perusteella määritetty meno- ja paluulämpötilojen suhde eri kuormatilanteissa. Pisteet perustuvat esimerkkiverkon D asiakasdatan volyymipainotettuihin keskiarvoihin. (Pöyry Finland Oy 2018)

Kuvassa 14 tarkastellaan mahdollisia menolämpötilan vaikutuksia asiakaslaitteiston paluulämpötilaan tilanteissa, missä kaukolämmön kulutus on ollut lähes vakio +- 0,5 MW tarkkuudella. Kuva 14 osoittaa, että korrelaatiota asiakaslaitteiden meno- ja paluulämpötilan välillä ei suorasti voida todeta. Ainoastaan talvitilanteessa menolämpötilan muutos selittää yli 50 % paluulämpötilan varianssista. Muissa tilanteissa korrelaatiota ei ole. Tämä tukee alkuperäistä oletusta, missä, kaukolämmön paluulämpötilan määrittää asiakkaan lämmönjakokeskuksen sekundääripuolen säädöt menolämpötilasta riippumatta. Menolämpötilan vaikutusta asiakaslaitteistojen paluulämpötiloihin, tulisi testata kokeellisesti muuttamalla menolämpötilan säätökäyrää ja tutkimalla pidemmän aikajänteen muutoksia.

3.4 Menolämpötilan vaikutus pumppaukseen

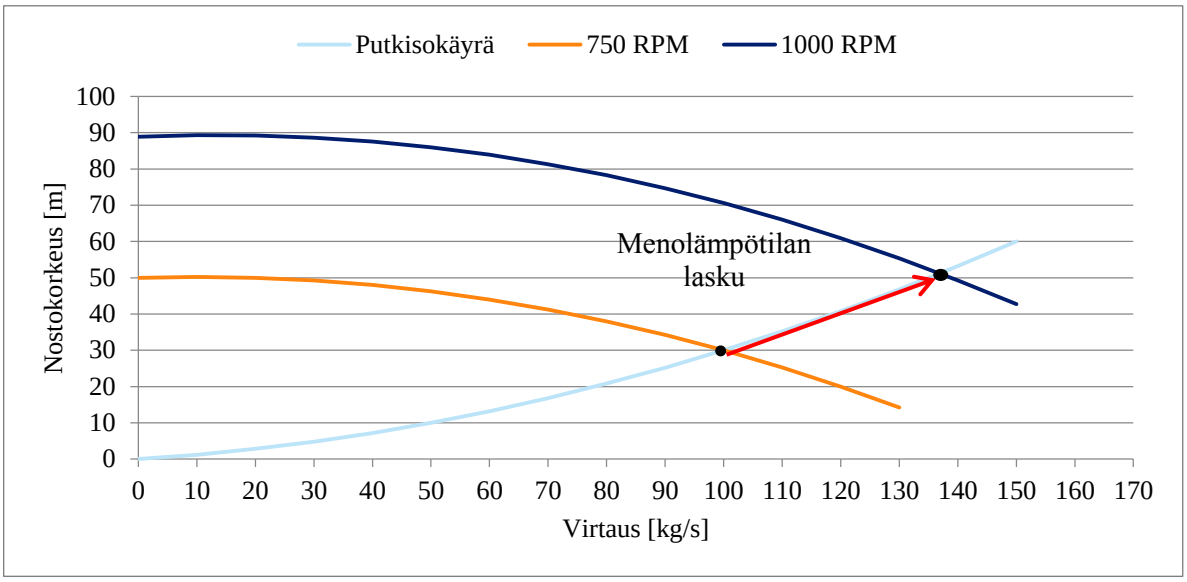
Menolämpötilan muutos vaikuttaa kaukolämmön vesivirtaan kääntäen verrannollisesti yhtälössä 1 esitetyn energiataseen mukaisesti. Tämä taas muuttaa kaukolämpöpumpun sähkötehontarvetta, joka on riippuvainen pumpun kierrosnopeutta vastaavasta tilavuusvirrasta ja nostokorkeudesta sekä hyötysuhteesta. Pumpun tehontarve voidaan laskea yhtälön 3 avulla. (Energiateollisuus 2006, 170)

$$P_{p,el} = \frac{q_{m,kl} \cdot g \cdot H}{\eta} \quad (3)$$

missä

$P_{p,el}$	on pumpun sähköteho	[W]
$q_{m,kl}$	on kaukolämpöveden massavirta	[kg/s]
g	on putoamiskiihtyvyys	[9,81 m/s^2]
H	on pumpun nostokorkeus	[m]
η	on pumpun hyötysuhde	[-]

Pumpun nostokorkeus ja tilavuusvirta määräytyvät kullekin pyörimisnopeudelle, riippuen pumpun ja putkiston ominaiskäyrästä. Alla olevassa kuvassa 15 esitetään yksinkertaistettu esimerkki menolämpötilan laskusta tapahtuvalle pumppauksen tilavuusvirran ja nostokorkeuden muutoksille, kun pumppua säädetään kierronopetussäädöllä.

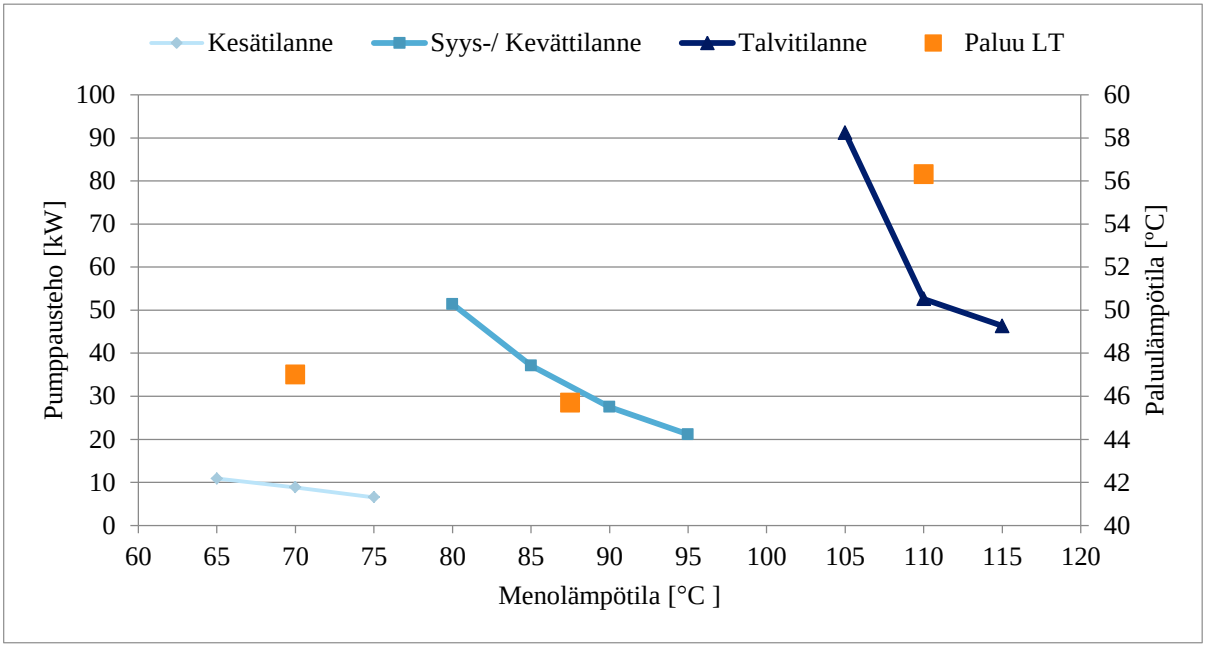


Kuva 15: Esimerkkikuva menolämpötilan laskun vaikutuksista pumpun tilavuusvirtaan ja nostokorkeuteen olettaen, että kaukolämpöveden paluulämpötila pysyy vakiona.

Olettaen paluulämpötilan pysyvän vakiona, menolämpötilan laskun johdosta virtausta tulee kasvattaa niin, että vastaava lämpö saadaan siirrettyä yhtälön 1 mukaisesti. Tilavuusvirran nosto kasvattaa kaukolämpöputkissa virtaavan veden virtausnopeutta; virtausnopeuden kasvu johtaa suurempiin kitkasta aiheutuviin painehäviöihin, jolloin pumpulta vaadittava nostokorkeus kasvaa putkistokäyrän mukaisesti. (Energiateollisuus 2011, 6–7) Putkistokäyrä on jokaiselle kaukolämpöverkolle ominainen ja se riippuu virtausputkien karheudesta, dimensioista ja kertavastuksista. Kaukolämpöverkon putkistokäyrä voidaan määrittää historiadataan perustuen kaukolämpöpumpun virtaus- ja nostokorkeusmittauksiin.

Kuvassa 16 esitetään menolämpötilan muutoksen vaikutuksia pumppauksen sähkönkäyttöön kolmessa eri ajotilanteessa. Arvot perustuvat esimerkkiverkon A verkostomallinnuksesta saatuihin arvoihin. Verkon peruskuorma ajetaan yhdeltä CHP-laitokselta ja huippukuormakattiloina toimivat maakaasua polttavat lämpökeskukset. Lisäksi kaukolämpöverkko on varustettu yhdellä välipumppaamolla. Tiedot perustuvat kyseisen kaukolämpöverkon verkostomallinnuksella määritettyihin arvoihin. (Pöyry Finland Oy 2018).

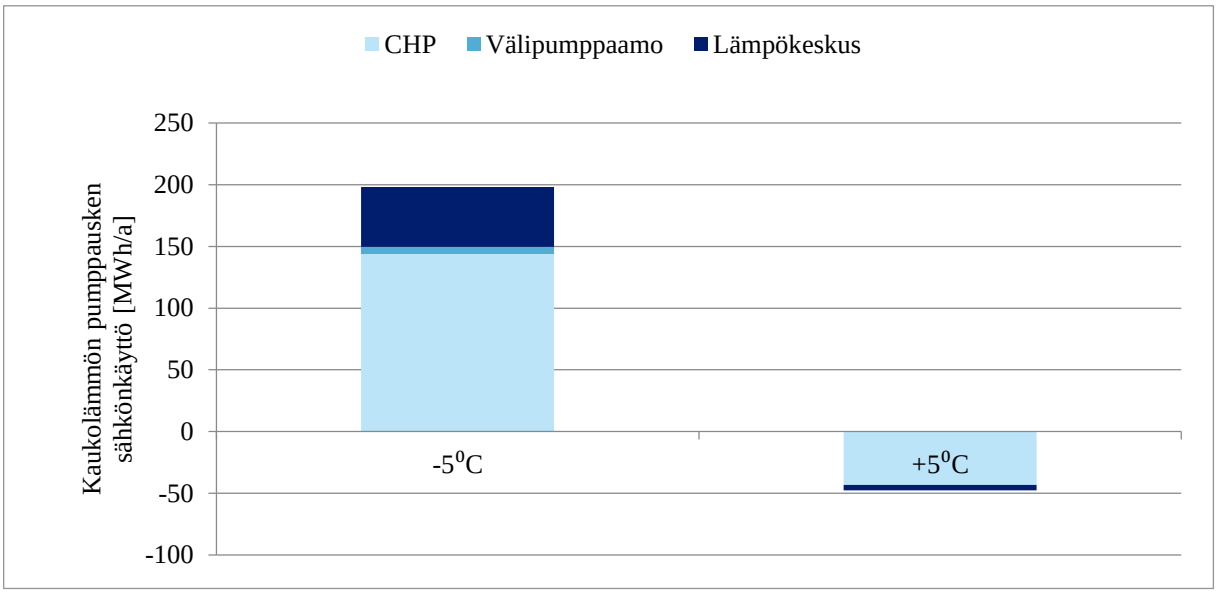
Menolämpötilan vaikutus pumpun sähkönkäyttöön kolmessa eri ajotilanteessa esitetään alla olevassa kuvassa.



Kuva 16: Menolämpötilan vaikutus kaukolämpöpumpun sähkönkäyttöön esimerkkiverkossa A. (Pöyry Finland Oy 2018)

Kuvan käyrät on määritetty Grades kaukolämpöverkon laskenta- ja mallinnusohjelmalla. Ne edustavat eri vuodenaikojen ajotilanteita kuvaavia pisteitä. Kyseisessä ajotilanteessa on simuloitu muutetun menolämpötilan vaikutuksia pumpun sähkönkäyttöön. Sähkönkäyttö on laskettu simulaatiosta saaduilla tilavuusvirran ja nostokorkeuden arvoilla olettaen pumpun mekaaniseksi hyötysuhteeksi 80 %. Lisäksi paluulämpötilan oletetaan ajotilanteittain pysyvän vakiona. Yllä olevan kuvan perusteella voidaan todeta, että suurimmat vaikutukset menolämpötilan muutoksella pumppauksen sähkönkäyttöön ovat talviaikana, jolloin verkon siirtokyky on lähellä maksimia.

Menolämpötilan vaikutukset pumppauksen sähkönkäyttöön voidaan arvioida eri vuodenaikojen käyttöaikojen mukaan. Kuvassa 17 esitetään pumppauksen vuotuisen sähkönkäytön muutokset, mikäli menolämpötilaa muutetaan +-5 °C nykyisestä menolämpötilakäyrästä. Arvot on johdettu kuvan 16 mukaisista mallinnuksella määritetyistä pumppauksen tehonmuutoksista seuraavilla käyttöajoilla: kesätilanne 3000h, syys- ja kevättilanne 2900h ja talvitilanne 2865 h.



Kuva 17: Kaukolämmön pumppauksen vuotuisen sähkönkäytön muutokset, +-5 ºC keskimääräisellä menolämpötilan muutoksella esimerkki verkossa A. (Pöyry Finland Oy 2018)

Yllä esitetyn kuvan perustella voidaan todeta, että pumppauksen sähkönkäyttö on epälineaarisesti riippuvainen käytetystä menolämpötilasta eli tarvittavasta kaukolämmön virtauksesta. Vaikutukset menolämpötilan laskulla ovat huomattavasti suuremmat, kuin vastaavalla menolämpötilan nousulla. Verkostomallinnuksen avulla määritetty pumppaussähkönkäyttö kasvaa noin 198 MWh, mikäli keskimääräistä menolämpötilaa pudotetaan 5 °C:lla. Tämä vastaa noin 58,7 % kasvua pumppauksen sähkönkäytössä. Vastaavasti nostamalla menolämpötilaa 5 °C:lla laskee pumppauksen sähkönkäyttö noin 47,6 MWh/a mikä vastaa noin 14 prosentin laskua kaukolämmön pumppauksen sähkönkäytössä. Kuvan 17 CHP:lla viitataan pohjakuormalaitoksena toimivan yhteistuotantolaitoksen kaukolämpöpumpun sähkönkäyttöön. Loppu osuus kaukolämmön pumppauksesta on toteutettu välipumppaamoilla sekä lämpökeskusten pumpuilla. Pumppauksen sähkönkäytön erittely yhteistuotantolaitosten, lämpökeskusten ja välipumppaamojen välillä on tärkeää kustannustarkastelun kannalta.

Menolämpötilaa optimoidessa pumppauksesta kiinnostaa etenkin pumppauskustannusten suhteellinen muutos menolämpötilan muuttuessa. Pumppauksen muuttuvat kustannukset koostuvat pumppauksen sähkönkäyttöön liittyvistä kustannuksista. Pumppauksen käytetyn sähkön hinta riippuu siitä sijaitseeko pumppu yhteistuotantolaitoksella vai onko kyseessä lämpökeskuksen tai välipumppaamon pumppu. CHP-laitoksella kaukolämpöpumpun

sähkönkäyttö on omakäyttösähköä, jolloin sen hintana voidaan arvioida olevan sähkön markkinahinta. Välipumppaamoilla ja lämpökeskuksilla pumpun sähkönkäyttö tulee verkosta, jolloin sen kustannus koostuu sähkön markkinahinnasta, siirtomaksuista ja veroista.

Menolämpötilan laskun johdosta kasvavien pumppauskustannuksien arvioinnissa on huomioitava pumppauksen myös häviöiden sekä verkon painehäviöiden muuttuminen lämmöksi. Pumpun sähkönkäytöstä vain sähkömoottorin häviöt ja pumpun ulkoiset kuten laakereiden ja akselin mekaaniset häviöt tai pumppauksen meluhäviö ei lämmitä pumpattavaa nestettä. Vastaavasti muut pumppauksen häviöt kuten vuotohäviöt, hydrauliset häviöt ja kitkahäviöt lämmittävät pumpattavaa nestettä. (Gülich 2010, 83–84)

Menolämpötilaa laskiessa pumppauksen kasvattaminen johtaa kasvaviin virtausnopeuksiin ja kasvaviin painehäviöihin kaukolämpöverkossa. Kitkasta johtuvat painehäviöt lämmittävät virtaavaa nestettä myös virtausputkissa. Pumppauksen sähkönkäytön lisäys menolämpötilaa laskiessa voidaan tulkita laskelmissa sähköllä tuotetuksi lämmöksi. Pumppauksen sähkönkäytön lisäyksen kustannus otetaan huomioon pumppauksen sähkönhinnan ja lämmöntuotannon omakustannushinnan erotuksena. CHP-laitoksella kaukolämpöpumpun omakäyttösähkön hintana voidaan käyttää sähkön pörssihintaa, sillä lisääntynyt pumppauksen sähkönkäyttö on suoraan pois laitoksen nettosähkön tuotannosta. Lämpökeskuksella tai välipumppaamolla pumppauksen sähkönkäyttö otetaan verkosta, joten sähkön hintaan sisältyvät myös verot ja siirtomaksut. Kaukolämpökierron pumppauskustannukset voidaan laskea yhtälön 4 avulla:

$$K_{\mathrm{pu,kl}} = \frac{K_{\mathrm{el}}}{\eta_{\mathrm{p,ulk}}} - K_{\mathrm{kl}} \qquad (4)$$

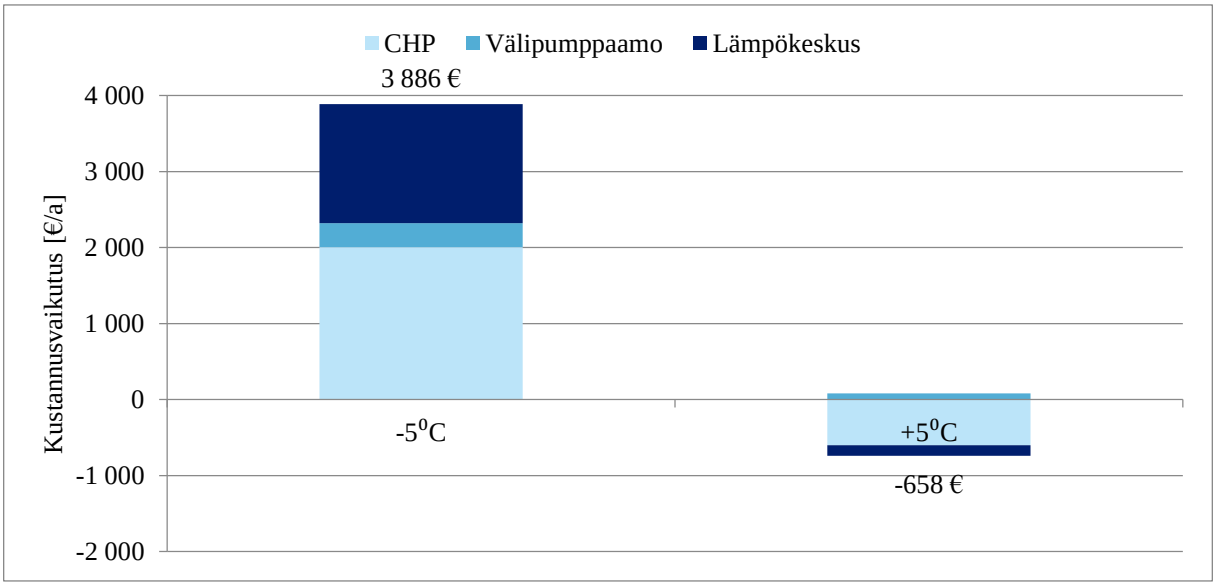
$K_{pu,kl}$:lla tarkoitetaan kaukolämmön pumppauksen kustannusta, jossa otetaan huomioon pumppauksen vaikutus pumpattavan nesteen lämpötilaan. K_{el}:lla tarkoitetaan pumpun sähkönkäytön hintaan ja $\eta_{\mathrm{pu,ulk}}$ kuvaa pumpun hyötysuhdetta, joka saadaan vähentämällä sähkönkäytöstä pumpun ulkoiset häviöt.

Esimerkkinä CHP-laitoksen kaukolämpöpumppu, jonka sähkömoottorin- ja pumpun mekaaniset häviöt ovat 3 %. Pumpun omakäyttösähkön hintana käytetään sähkön markkinahintaa 35 €/MWh. Oletetaan laitoksen polttoaineeksi metsähake, jonka hinta on 20

€/MWh. Lämmöntuotannon kokonaishyötysuhteeksi oletetaan 90 %. Kaukolämmön pumppauksen kustannukseksi saadaan näin 13,86 €/MWh.

Vastaavasti verkosta lämpökeskuksilla ja välipumppaamoilla käytetystä sähköstä maksetaan varsinaisen sähkön hinnan lisäksi verot ja siirtomaksut. Lämpökeskuksilla ja välipumppaamolla käytettävän pumppaussähkön hintana käytetään tässä työssä 80 €/MWh. Yksikköhinnaltaan 45 €/MWh kaasua polttavan lämpökeskuksen kaukolämpöpumpun sähkönkäytön kustannukseksi saadaan 32,5 €/MWh. Välipumppaamon sähkönäytön kustannusta laskiessa pumppauksen sähkönkäytön voidaan arvioida korvaavan lämmön marginaalituotantoa.

Kuvassa 18 esitetään menolämpötilan muutosten vaikutus vuotuisiin pumppauskustannuksiin esimerkkiverkossa A.



Kuva 18: Kaukolämmön pumppauskustannukset eri menolämpötiloilla esimerkkiverkossa A. Kustannuksissa otetaan huomioon pumppauksen häviöiden ja virtauksen kitkahäviöiden lämmönsiirto pumpattavaan nesteeseen. (Pöyry Finland Oy 2018)

Kuvassa 18 huomataan, että pumppauskustannukset muuttuvat huomattavasti enemmän, kun keskimääräinen menolämpötila laskee. Laskemalla menolämpötilaa keskimäärin 5 ºC nousevat vuotuiset pumppauskustannukset noin 3900 €. Tuotettua lämpöenergiaa kohden, keskimääräinen 5 ºC menolämpötilan lasku vastaa vain noin 0,03 €/MWh$_{kl}$ nousua. Vastaavalla menolämpötilan nostolla saavutetaan esimerkkiverkossa noin 700 € vuotuiset

säästöt. Tuotettua kaukolämpöenergiaa kohden se vastaa esimeikkiverkossa 0,5 sentin säästöä tuotettua megawattituntia kohden.

3.5 Menolämpötilan vaikutus verkoston lämpöhäviöihin

Kaukolämpöverkon lämpöhäviöihin vaikuttavat useat eri tekijä: verkon dimensiot, käyttölämpötilat käytetyt kanavatyypit ja verkon ikä. Pienessä keskimääräisen putkikoon DN 50 verkoissa kaukolämpöhäviöt ovat tyypillisesti 10–20 % lämmöntuotannosta. Suuremmissa verkoissa putkikoon ollessa keskimärin DN 150 verkostohäviöt ovat tyypillisesti pienemmät noin 4–10 % tuotannosta. Keskimääräiseltä halkaisijaltaan pienemmissä verkoissa vaippapinta -ala on suhteessa verkon siirtokykyyn suurempi, mikä johtaa suurempiin, suhteellisiin lämpöhäviöihin.

Lämmönjohtuminen on suoraan verrannollinen virtaavan nesteen ja ympäristön lämpötilaeroon. Kaukolämpöjohdosta lämmönsiirto ympäristöön tapahtuu maaperän kautta. Osa menopuolen lämpöhäviöistä lämmittää paluupuolen virtausta, jolloin osa lämpöhäviöistä saadaan talteen. Lämmönsiirtoteho tietyllä lämpötilaerolla määräytyy putkistolle, eristeelle ja maaperälle ominaisen kokonaislämpövastuksen perusteella. Vanhemmilla mineraalivilla eristeisillä johdoilla lämpöhäviöt ovat suuremmat kuin vastaavan kokoisella uudella polyuretaanieristetyllä johdolla. Myös muut eristeen ominaisuudet kuten ikä ja kosteus vaikuttavat lämpöhäviöihin. Lämpöhäviöt kaukolämpöjohdossa voidaan määrittää yhtälön 5 mukaisesti (Energiateollisuus 2006, 203–204)

$$\Phi'_{tot} = 2 \cdot (k_1 - k_2) \cdot \left[\frac{T_m - T_p}{2} - T_g\right] \quad (5)$$

missä

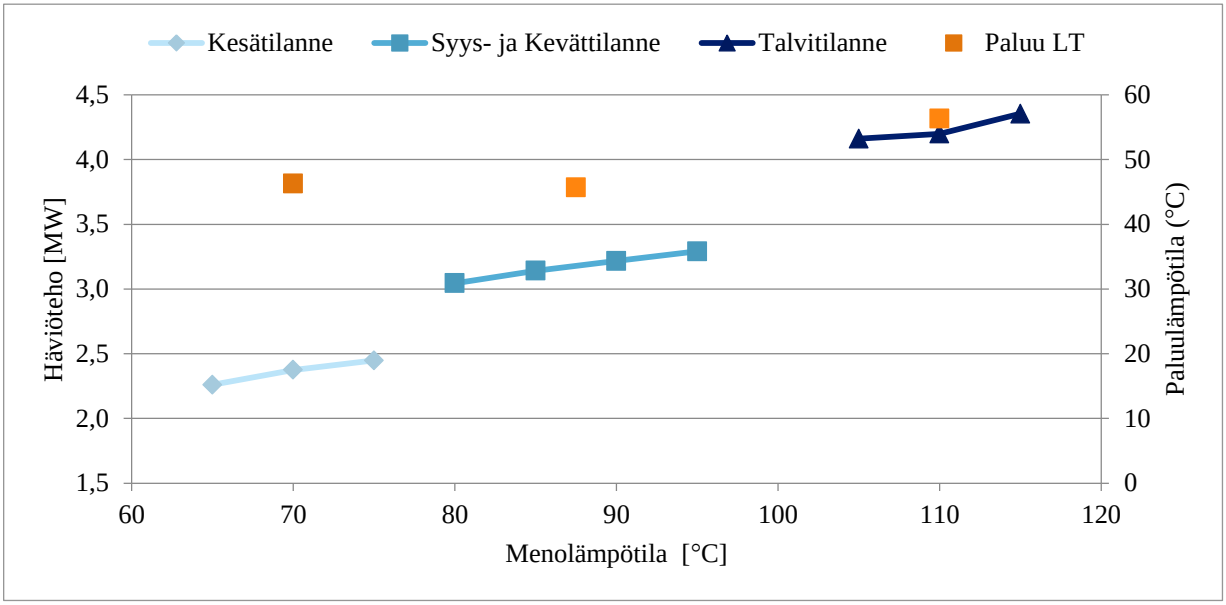
Φ'_{tot}	on lämpöhäviöteho	[W/m]
k_1 ja k_2	ovat lämmönläpäisylukuja	[W/mK]
T_m	on menolämpötila	[°C, K]
T_p	on paluulämpötila	[°C, K]
T_g	on maaperän lämpötila	[°C, K]

Yhtälön 5 mukaisesti lämpöhäviöt putkesta ovat suoraan verrannolliset virtaavan nesteen ja putkea ympäröivän maaperän lämpötilaeroon, kun lämmönläpäisykertoimen oletetaan pysyvän vakiona. Yhtälössä 4 lämmönsiitoskertoimien k_1 ja k_2 erotus ottaa ympäristöön siirtyvän lämmön lisäksi huomioon symmetristen meno- ja paluuputken keskinäisen lämmönsiirron. (Energiateollisuus 2006, 204–205) Kaukolämpöjohdon ympärillä olevan maaperän lämpötila pysyy lähes vakiona ympäri vuoden. Tämä tarkoittaa, että verkostohäviöt ovat käytännössä suoraan verrannolliset kaukolämpöverkon käyttölämpötiloihin. Perusoletuksena ympäristöön johtuvien lämpöhäviöiden jakautumiselle meno- ja paluulinjojen välillä voidaan arvioida olevan 2:1. (Energiateollisuus 2018)

Menolämpötilaa optimoidessa on tärkeä selvittää menolämpötilan muutoksen vaikutuksen lämpöhäviöin. Hetkellisten lämpöhäviöiden laskenta on haastavaa, johtuen kaukolämpöjohtojen eristyksen ominaisuuksien epätasaisuudesta. Yhtälön 5 soveltaminen on mahdollista, mikäli tiedetään koko kaukolämpöverkon dimensiot sekä kanavatyypit. Laskenta on kuitenkin melko epätarkka, sillä verkon todelliset häviöt vaihtelevat voimakkaasti eristeiden kunnosta ja kosteudesta riippuen.

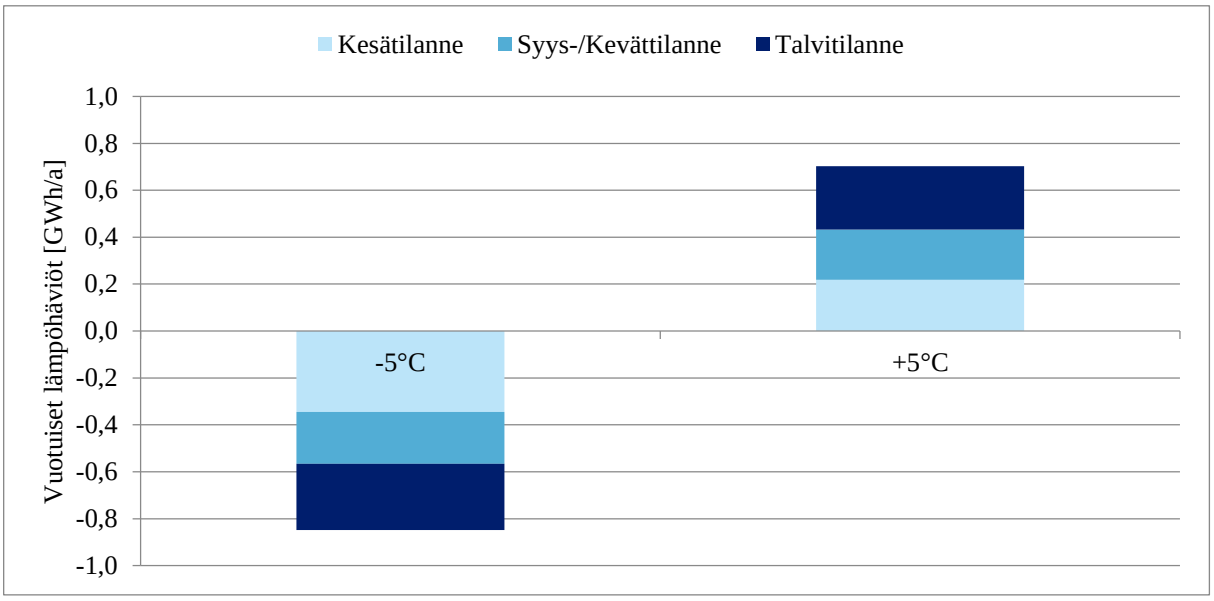
Kaukolämmön hetkellisiä lämpöhäviöitä on helpoin tutkia kaukolämpöverkon mallinnuksella. mallinnus simuloi kaukolämpöverkon lämpöhäviöt perustuen verkon dimensioihin sekä malliin syötettyihin käyttölämpötiloihin. Tyypillisesti kaukolämpöverkon mallinnuksessa kaukolämpöjohtojen eristykset oletetaan vakioksi, sillä jokaisen johdon lämmönsiirtokertoimen määrittäminen malliin on käytännössä mahdotonta. Laskennan keventämiseksi mallista jätetään tyypillistesti pois myös talojohdot. Tämän vuoksi hetkellisten lämpöhäviöiden arvioinnissa on syytä käyttää apuna niin sanotulla suoralla menetelmällä laskettuja lämpöhäviöitä eli vuotuista tuotannon ja myynnin erotusta. Tämä on tarkka tapa määrittää verkoston lämpöhäviöt. Suoraa laskentaa ei kuitenkaan voida soveltaa yksin menolämpötilan optimointilaskennassa, sillä se vastaa toteutuneita lämpöhäviötä käytetyllä menolämpötilalla. Yhdistämällä mallinnuksella saatu menolämpötilan muutoksen suhteellinen vaikutus todellisiin suoralla menetelmällä laskettuihin lämpöhäviöihin, saadaan määritettyä melko tarkka arvio todellisista lämpöhäviöiden muutoksista.

Kuvassa 19 esitetään esimerkkiverkolle A verkostomallinnuksella määritetyt hetkelliset lämpöhäviöt eri ajotilanteille.



Kuva 19: Esimerkkiverkon A mallinnuksella määritetyt hetkelliset lämpöhäviötehot eri menolämpötiloilla kesä, syys- ja kevät sekä talvitilanteissa.

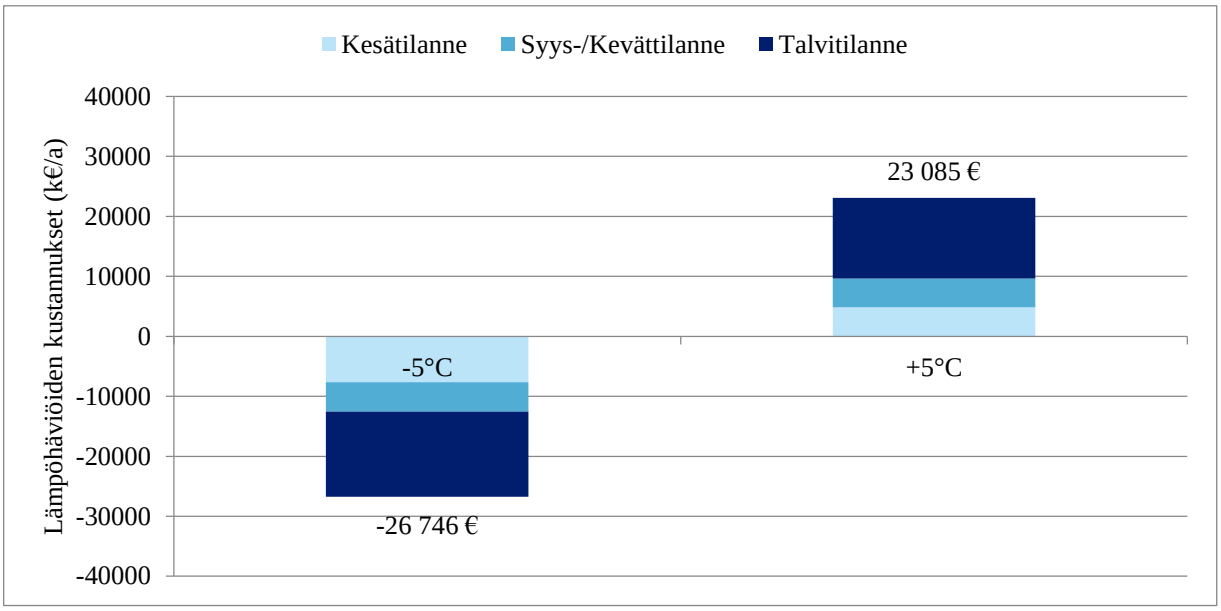
Kuvan lämpöhäviöteho ei ole täysin lineaarinen eri vuodenaikojen välillä johtuen paluulämpötilan muutoksesta. Paluulämpötilat määritettiin toteutuneiden paluulämpötilojen perusteella. Kunkin ajotilanteen kohdalla paluulämpötilan oletettiin pysyvän vakiona. Tällöin lämpöhäviöteho käyttäytyy lineaarisesti menolämpötilan funktiona yhtälön 5 mukaisesti. Edellä määritettyjen lämpöhäviöiden muutosten perusteella määritetty menolämpötilan muutoksen vaikutus vuotuiseen häviöenergian määrään esitetään kuvassa 20 seuraavilla käyttöajoilla: kesätilanne 3000h, syys- ja kevättilanne 2900h ja talvitilanne 2865 h.



Kuva 20: Menolämpötilan muutoksen vaikutukset verkoston lämpöhäviöihin esimerkkiverkossa A. (Pöyry Finland Oy 2018)

Keskimääräinen 5°C menolämpötilan lasku johtaa esimerkkiverkossa noin 675 MWh/a pienempiin vuotuisiin verkostohäviöihin. Tämä vastaa 2,4 % laskua lämpöhäviöissä. Vastaavasti keskimäärin 5°C korkeampi menolämpötila johtaa noin 3 % korkeampiin lämpöhäviöihin. Tämä vastaa 880 MWh/a suurempia vuotuisia lämpöhäviöitä.

Kustannusvaikutuksia arvioitaessa on määritettävä lämpöhäviöiden tuotantokustannukset kullekin ajotilanteelle. Lämpöhäviöiden tuotantokustannusta määrittäessä käytetään lämmöntuotannon marginaalikustannusta. Kesäaikana lämmöntuotanto toteutetaan CHP-laitokselta reduktioajolla. Biomassan hinnalla 20 €/MWh ja tuotannon kokonaishyötysuhteella 90 % lämmöntuotannon muuttuvaksi kustannukseksi saadaan yhtälön 2 mukaisesti 22,22 €/MWh. Kevät- ja syysaikana kaukolämpö tuotetaan yhteistuotantona, jolloin lämmön tuotantokustannuksessa otetaan huomioon myös nettosähkön tuotannon myyntitulot. Koska sähkön myyntitulot käsitellään tuotannon laskentamallissa erikseen, käytetään kevät- ja syysajan lämpöhäviökustannuksena kesää vastaavaa arvoa 22,22 €/MWh. Talvella huippukuorma ajetaan maakaasukattilalla, jolloin lämmöntuotannon marginaalikustannus on 50 €/MWh. Edellä määritetyillä lämmön marginaalikustannuksilla vuotuiset lämpöhäviöiden kustannukset esitetään kuvassa 21.



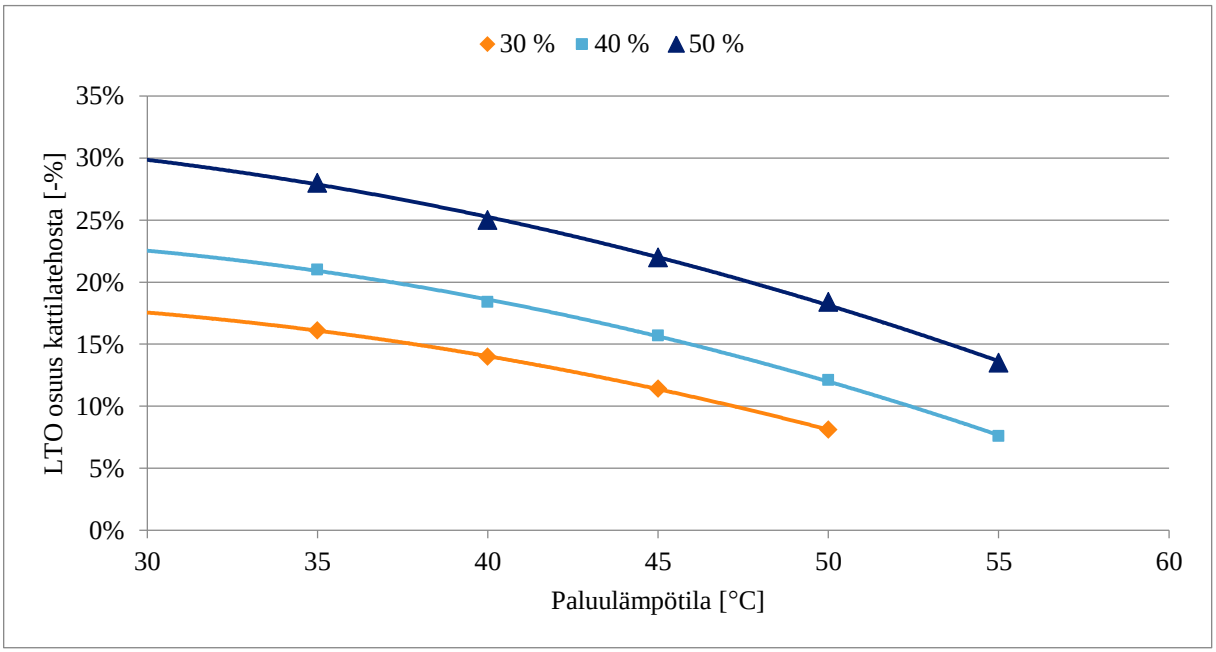
Kuva 21: Menolämpötilan nousun ja laskun vaikutukset verkoston lämpöhäviöiden kustannuksiin esimerkkiverkossa A. (Pöyry Finland Oy 2018)

Suurimmat kustannusvaikutukset ovat talvitilanteessa, johtuen lämmön korkeimmasta marginaalikustannuksista. Menolämpötilan lasku keskimäärin 5°C:lla vastaa noin 27 k€ vuotuisia säästöjä polttoainekustannuksia. Esimerkkiverkon A vuosituotannolla tämä vastaa 0,20 €/MWh_{kl} säästöjä tuotettua yksikköä kohden. Vastaavasti 5 °C keskimääräinen menolämpötilan nosto kasvattaa vuotuisia polttoainekustannuksia 23 k€. Tämä vastaa keskimääräistä 0,17 €/MWh_{kl} nousua kaukolämmön tuotantokustannuksissa.

3.6 Menolämpötilan vaikutus savukaasupesurin tuotantoon

Menolämpötila ei vaikuta hyötysuhteeseen polttoaineen polttoon perustuvassa lämmöntuotannossa lämpökeskuksissa. Mikäli lämpökeskuksessa tai CHP-laitoksessa on lämmöntaiteenotolla varustettu pesuri, voi menolämpötila välillisesti vaikuttaa pesurin lämmöntaltenoton hyötysuhteeseen. Menolämpötila voi vaikuttaa savukaasupesurin hyötysuhteeseen suorien kytkentöjen ja lämpökeskusten lämpimänä pidon kautta tapahtuvasta paluulämpötilan muutoksesta. Toisaalta talvitilanteessa korkean menolämpötilan johdosta pienentynyt kaukolämmön vesivirta voi rajoittaa savukaasupesurista saatavaa tehoa. Savukaasupesurin LTO:n tehokkuuteen vaikuttaa polttoaineen kosteus ja savukaasun loppulämpötila ennen pesuria. Savukaasupesurin LTO:n osuus kattilatehosta määräytyy polttoaineen kosteuden ja savukaasun loppulämpötila mukaan. Paluulämpötilan vaikuttaa

savukaasupesurin LTO:hon kuvan 22 mukaisesti, kun polttoaineena käytetään 100 % puuta ja savukaasun loppulämpötila ennen pesuria on 150 °C. (Condens Heat recovery Oy, 2017)



Kuva 22: Savukaasupesurin LTO-teho paluulämpötilan funktiona. Polttoaineena 100 % puu ja savukaasun lämpötila ennen pesuria 150 ºC (Condens Heat recovery Oy, 2017).

Kuvan 22 käyrät osoittavat, että savukaasupesurin LTO:n osuus kattilatehosta on voimakkaasti riippuvainen kaukolämmön paluulämpötilasta. Viiden asteen paluulämpötilan lasku tarkoittaa keskimäärin muutaman prosenttiyksikön nousua LTO-tehon ja kattilatehon suhteessa. Savukaasupesurin LTO-tohon osuus kattilatehosta on voimakkaasti riippuvainen myös polttoaineen kosteudesta. On kuitenkin huomattava, että kosteampi polttoaine vaatii enemmän kuivaa polttoainetta veden höyrystämiseksi. Polttoaineen käytön minimoimiseksi voidaan polttoineen kosteus optimoida niin, että savukaasupesurin LTO-teho saadaan maksimoitua.

Mikäli paluulämpötila on verkossa selvästi riippuvainen käytetystä menolämpötilasta, on kuvassa 22 esitelty savukaasupesurin LTO:n vaikutus merkittävä menolämpötilaa muuttaessa. Kuten luvussa 3.3 todettiin, asiakaslaitteiden primääripuolen paluulämpötila ei ole merkittävästi riippuvainen käytetystä menolämpötilasta. Paluulämpötilan muutos tuotantolaitoksella voidaan siis olettaa olevan vain suorien kytkentöjen ja kattiloiden lämpimänä pidon johdosta tapahtuvaa. Menolämpötilan vaikutusta paluulämpötilaan tulisi kokeellisesti arvioida verkkokohtaisesti, jotta todelliset vaikutukset savukaasupesurin tuotantoon saadaan määritettyä.

Suurilla kuormilla savukaasupesurin tuotantoa voi rajoittaa myös korkean menolämpötilan johdosta pienenevä kaukolämpöveden virtaus. Tällöin kaukolämpöveden virtaukseen ei saada siirrettyä savukaasuista saatavilla olevaa energiaa. Pienentyvä virtauksen rajoittama LTO-teho joudutaan näissä tapauksissa tuottamaan polttoaineilla. Kustannusvaikutuksia arvioitaessa savukaasupesurin heikennyttä LTO:ta vastaava lämpö tuotetaan lämmön marginaalikustannuksen mukaisella hinnalla.

Savukaasupesurista kaukolämpöveteen siirrettävissä oleva energia riippuu kaukolämpöveden virtauksesta, paluuveden lämpötilasta sekä savukaasujen kastepistelämpötilasta, joka määrittää primääripuolen maksimilämpötilan. Todellisuudessa maksimilämpötila on lämmönvaihtimen asteisuuden verran kastepistelämpötilaa matalampi. Taulukossa 4 esitetään savukaasun kylläinen lämpötila polttoaineen kosteuden funktiona.

Taulukko 4: Savukaasun kylläinen lämpötila eri polttoaineiden kosteuksilla. (mukaillen Pöyry Finland Oy 2010, 6)

Polttoaineen kosteus	**Kylläinen lämpötila**
%	**°C**
60	68,4
50	64,0
40	60,0

Polttoaineen kosteudella 50 % ja vaihtimen asteisuudella 2 °C, paluuveden lämpötila on vaihtimen jälkeen 62 °C. Kun pesurille saapuvan kaukolämpöveden lämpötila virtaus tiedetään, voidaan siirrettävissä oleva energia ratkaista yhtälön 1 mukaisesti.

Menolämpötilan vaikutusta savukaasupesurin LTO-tehoon tutkittiin esimerkkiverkolle B tehdyn tuotannon laskentamallin avulla. Menolämpötilan vaikutus savukaasupesurin LTO-tehoon koskee vain huippukuormatilannetta (120 h/a), jossa kaukolämpöveden virtaus rajoittaa LTO-tehoa. Rajoittava tekijä laskettiin vertaamalla savukaasuista saatavilla olevaa LTO-tehoa kaukolämpövirtaukseen siirrettävissä olevaan lämpöön. Savukaasuista saatavilla oleva LTO-teho määritettiin kuvan 22 mukaisesti olettamalla polttoaineen kosteudeksi 50 % ja kaukolämmön paluulämpötilaksi 56,5 °C. Savukaasupesurin LTO-vaihtimen asteisuudeksi määritettiin 2 °C. Nostettaessa menolämpötilaa viidellä asteella, heikkenee savukaasupesurin lämmöntalteenotto yhteensä 96 MWh/a, mikä vastaa noin 0,4 % osuutta savukaasupesurin

vuotuisesta LTO:sta. Heikentyvä LTO:n johdosta polttoainekustannukset nousevat noin 5,6 k€/a. Kustannukset koostuvat heikentyvän LTO:n johdosta tarvittavasta lisätuotannosta kaasu- ja öljy lämpökeskuksilla. Menolämpötilaa laskettaessa vesivirta savukaasupesurin KL-vaihtimen läpi kasvaa lineaarisesti, yhtälön 1 mukaisesti. Viiden asteen menolämpötilan laskun myötä parantunut savukaasupesurin LTO johtaa noin 94 MWh/a pienempään öljy- ja kaasulämpökeskusten tarpeeseen. Tämä vastaa 5,4 k€ säästöä vuotuisissa polttoainekustannuksissa. Tuotettua kaukolämpöenergiaa kohden tämä vastaa noin 0,04 €/MWh_{kl} säästöä tuotantokustannuksissa.

3.7 Menolämpötilan vaikutus vastapainesähköntuotantoon

Yhdistetyssä sähkön ja lämmöntuotannossa korkeampi menolämpötila pienentää laitoksen rakennusastetta eli heikentää sähköntuotannon hyötysuhdetta. Korkeampi menolämpötila johtaa korkeampaan turbiinin vastapaineeseen, mikä vähentää turbiinissa tapahtuvaa paisumista. Turbiinista saatava teho on suoraan riippuvainen turbiinissa tapahtuvasta höyryn paisumisesta, eli höyryn paine-erosta turbiinin sisä- ja ulostulossa. Sähköntuotanto vähenee menolämpötilan funktiona noin 0,2–0,3 %, asteen lämpötilan nousua kohden (Bolonina et al. 2014, 41) Kaukolämmön menolämpötila vaikuttaa rakennusasteeseen, mikäli kaukolämmön menolämpötilaa säädetään turbiinin jälkeisellä kaukolämmönvaihtimella.

Esimerkkiverkossa A vuotuinen sähköntuotanto on nykyisellä menolämpötilalla noin 31,7 GWh. Menolämpötilan keskimääräinen nosto 5°C:lla pienentää sähköntuotantoa yhteensä 425 MWh/a, joka vastaa 1,35 % laskua vuotuisessa sähköntuotannossa. Oletuksena laskennassa käytettiin, 0,3 %/°C heikentyvää rakennusastetta. Yhteistuotannon hyötysuhteella 90 % ja biomassa keskimääräisellä hinnalla 20 €/MWh tämä vastaa 5,4 k€/a menetystä sähkön myyntituloissa. Laskennassa sähkön keskimääräiseksi myyntihinnaksi oletettiin 35 €/MWh. Tuotettua kaukolämpöenergiaa kohden tämä tarkoittaa 0,04 €/MWh_{kl} menetettyä myyntituloa

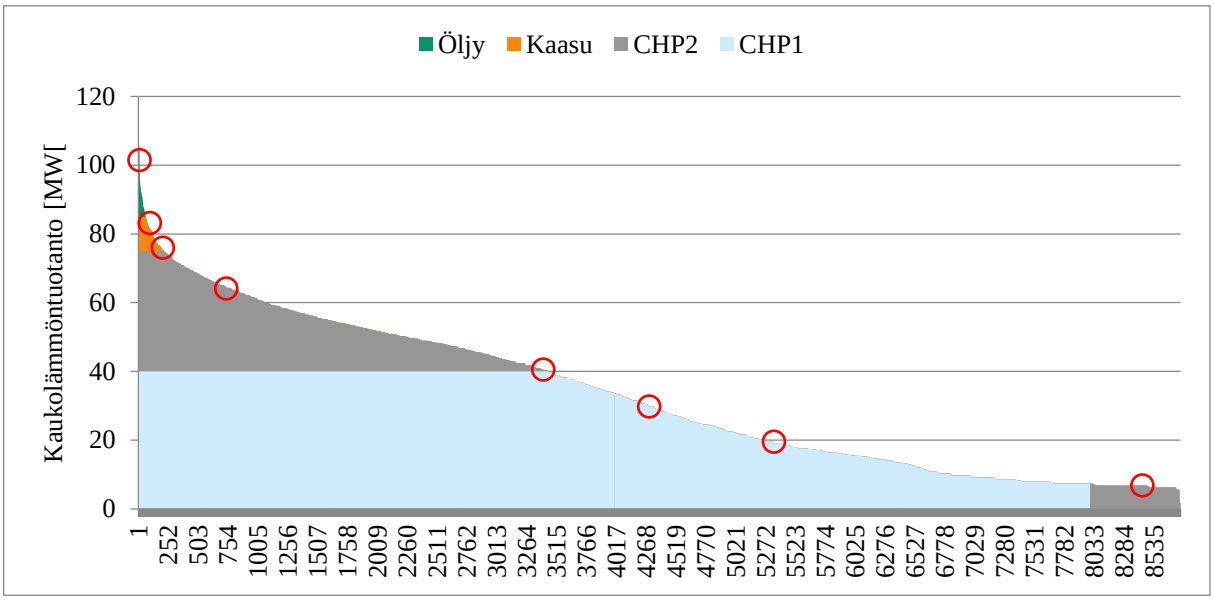
4 MENOLÄMPÖTILAN TALOUDELLINEN OPTIMOINTI

Menolämpötilan taloudellisen optimoinnin periaatteena on minimoida kaukolämmön tuotantoon käytetyt polttoainekustannukset sekä pumppaussähkön kustannukset ottaen huomioon myös tuotetun sähkömäärän. Menolämpötilan optimin määritys on helpointa tehdä tarkastelemalla lämpöhäviöiden, pumppauksen sekä sähkön- ja lämmöntuotannon kustannuksia verkostomallinnuksella määritettyjen arvojen pohjalta. Menolämpötilan vaikutuksia tuotantolaitokseen tutkitaan erillisellä laskentamallilla, sillä verkostomallinnuksella ei simuloida tuotantolaitoksia muuta kuin kaukolämpöverkkoon syötetyn energian, kaukolämmön jakelun sekä kulutuksen osalta. Menolämpötilan kustannusvaikutuksen arvioinnissa hyödynnetään edellisessä luvussa esiteltyjä menetelmiä. Tässä luvussa menolämpötilan optimointiprosessi kuvataan esimerkkiverkon B verkostomallinnuksen ja tuntimittausdatan perustella. Lisäksi tässä luvussa arvioidaan menolämpötilan säädön kustannusvaikutuksia esimerkkiverkoille A ja C.

4.1 Menolämpötilan optimointi esimerkkiverkossa

Menolämpötilan muutoksen vaikutuksia pumppaukseen, verkostohäviöihin ja tuotantoon tulisi tarkastella 3–8 eri kuormatilanteessa riippuen kaukolämpöverkon koosta ja tuotantoyksiköiden määrästä. Minimi- ja maksimikuormatilanteiden lisäksi menolämpötilan vaikutuksia kaukolämpöverkossa olisi syytä tarkastella jokaisen tuotantoyksikön käynnistystä vastaavilla kaukolämpötehoilla, sillä tyypillisesti juuri eri tuotantoyksiköiden käynnistykset vaikuttavat eniten kaukolämpöjärjestelmän pumppaukseen. Pisteissä, joissa koko verkon kaukolämmöntuotanto on yhdessä paikassa, menolämpötilan vaikutukset kaukolämmön pumppaukseen on melko tarkasti määritettävissä edellisessä luvussa esitetyn yhtälön 1 mukaisesti.

Kuvassa 23 esitetään esimerkkiverkon B kahdeksan mallinnettua pistettä pysyvyyskäyrällä. Pysyvyyskäyrä perustuu esimerkkiverkon vuoden 2017 kaukolämmön tuotantomittausten tuntikeskiarvoihin. Pisteet on valittu niin, että menolämpötilan muutoksen vaikutuksia saadaan tutkittua erilaisissa tuotanto- ja pumppaustilanteissa.



Kuva 23: Menolämpötilan optimimonnissa mallinnetut pisteet esimerkkiverkon B pysyvyyskäyrällä. (Pöyry Finland Oy 2018)

Esimerkkiverkossa peruskuormalaitoksena on kaksi biomassalla toimivaa CHP laitosta, jotka sijaitsevat samalla voimalaitosalueella. Peruskuormalaitosten ja kaupungin välinen linja on varustettu meno- ja paluulinjan välipumppaamolla, jota hyödynnetään tyypillisesti yli 40 MW kaukolämpökuormilla. Huippukuormakattiloina käytetään kaasu- ja öljylämpökeskuksia.

Kun mallinnettavat pisteet on valittu, voidaan menolämpötilan muutoksen vaikutuksia kaukolämpöjärjestelmän toimintaan alkaa mallintamaan verkostomallin avulla. Tässä työssä verkostomallinnus on toteutettu Grades Heating verkostomallinnusohjelman avulla. Verkostomallinnuksen toteuttamiseksi kaukolämpöverkostosta muodostetaan topologia, jolla pyritään kuvaamaan kaukolämpöverkko perustuen sen todellisiin dimensioihin. Verkostomalli perustuu todellisiin mittoihin ja suhteellisiin etäisyyksiin sekä korkoihin, mutta siinä ei laskennan keventämiseksi huomioida pienempiä siirtolinjan ja kuluttajan välisiä talojohtoja.

Menolämpötilan optimointi verkostomallinnuksen avulla kuvataan seuraavaksi esimerkkiverkon yhden tuotantopisteen avulla, joka vastaa verkon kesätilannetta. Kyseisessä pisteessä verkon kokonaislämmöntuotanto on 20 MW ja se tuotetaan CHP1 laitokselta. Välipumppausta ei tässä tilanteessa käytetä. Taulukossa 5 esitetään esimerkkiveron B verkostomallinnuksesta saadut pumppauksen ja verkoston lämpöhäviöiden arvot.

Taulukko 5: Esimerkkiverkon B mallinnuksesta saadut arvot verkoston hetkellisestä lämpöhäviöistä ja pumppauksen sähkönkäytöstä.

Syötetyt arvot					
Menolämpötila	°C	75	80	**85**	90
Paluulämpötila	°C	48,9	49,5	50	50,1
Kaukolämmön kokonaistuotanto	MW	19,8	20,0	20,1	20,2
Verkostohäviöt					
Verkoston lämpöhäviöt	kW	3477,1	3612,0	3742,7	3855,3
Verkoston lämpöhäviöt (korjattu)	kW	4149,8	4310,8	4466,8	4601,2
Pumppauksen sähkönkäyttö					
CHP 1 + CHP 2	kW	204,3	134,8	94,7	68,1
Kaasu	kW	0,0	0,0	0,0	0,0
Öljy	kW	0,0	0,0	0,0	0,0
Välipumppaamo meno	kW	0,0	0,0	0,0	0,0
Välipumppaamo paluu	kW	0,0	0,0	0,0	0,0

Mallinnuksen pohjaksi tulee verkostolle määrittää kaukolämmön kysyntä, menolämpötila sekä asiakkaiden paluulämpötila. Kaukolämmön menoveden referenssimenolämpötila 85 °C määritettiin vastamaan nykyistä kaukolämmön kokonaistuotantoa vastaavaa menolämpötilaa. Paluulämpötilan asetusarvo asetettiin perustuen vastaavan kaukolämmöntuotannon tuntimittauksiin.

Mallinnuksen periaatteena on muuttaa menolämpötilaa niin että kaikki järjestelmän kriittiset suureet ovat sallitulla alueella. Etenkin menolämpötilaa laskiessa tulee mallinnuksessa ottaa huomioon mm. pumppauksen rajoitteet, meno- ja paluupaineet sekä paine-erot asiakaslaitteistossa. Menolämpötilaa nostaessa rajoituksia ei tyypillisesti ole lukuun ottamatta menoveden lämpötilan maksimia 120°C.

Mallinnuksesta saadut verkostohäviöt korjattiin vastaamaan verkon todellisia lämpöhäviöitä nykyisellä menolämpötilakäyrällä. Käytännössä tämä toteutettiin arvioimalla eri menolämpötilojen vuotuiset käyttöajat ja iteroimalla korjatut lämpöhäviöt vastaamaan vuotuisia tuotannon ja myynnin erotuksena määritettyjä lämpöhäviöitä. Menolämpötilan

muutoksen arvio perustuu mallinnuksesta saatuihin arvoihin, niin että korjattu lämpöhäviö muuttuu suhteellisesti yhtä paljon. Tällä menetelmällä saadaan todellisempi kuva menolämpötilan vaikutuksista verkoston lämpöhäviöihin. Taulukossa 5 esitetty pumppauksen sähkönkäyttö on laskettu yhtälön 3 mukaisesti verkostomallinnuksesta saaduilla tilavuusvirran ja nostokorkeuden arvoilla. Pumppauksen mekaanisen hyötysuhteen oletettiin pysyvän vakiona.

Koska verkostomallinnus mallintaa vain lämmön siirtoa ja kulutusta, täytyy menolämpötilan vaikutus sähkön- ja lämmöntuotantoon toteuttaa erillisellä laskentamallilla. Laskentamallin alkuarvot ja laskentamallilla lasketut arvot esitetään taulukossa 6.

Taulukko 6: Esimerkkiverkon B tuotantolaskennasta saadut arvot kolmella eri menolämpötilalla (Pöyry Finland Oy 2018).

Syötetyt arvot					
Menolämpötila	°C	75	80	85	90
Paluulämpötila	°C	48,9	49,5	50	50,1
Kaukolämmön kokonaistuotanto	MW	19,8	20,0	20,1	20,2
Kaukolämmöntuotanto					
CHP1	MW	15,6	15,8	16,0	16,1
CHP2	MW	0,0	0,0	0,0	0,0
Kaasu	MW	0,0	0,0	0,0	0,0
Öljy	MW	0,0	0,0	0,0	0,0
Sähköntuotanto					
CHP 1 + CHP 2	MW	6,4	6,4	6,4	6,3
Savukaasupesurin LTO					
Savukaasuista saatavilla oleva energia	MW	4,3	4,2	4,1	4,1
Kaukolämpöveteen siirrettävissä oleva energia	MW	11,0	9,1	7,6	6,7

Koska CHP1 on varustettu savukaasupesurilla, tuotannon mallintamista varten laskettiin savukaasuista saatavilla oleva energia ja kaukolämpöveteen siirrettävissä oleva energia. Näiden minimi vastaa kyseisen pisteen savukaasupesurin tuotantoa. Savukaasuista saatavilla oleva energia määritettiin edellisen luvun kuvassa 22 esitettyjen käyrien perusteella.

Polttoaineeksi oletettiin 50 % kostea hake ja kaukolämmön paluulämpötilana käytettiin taulukossa 6 määritettyjä arvoja. Kyseisillä arvoilla savukaasuista saatavilla oleva energia vastasi n. 20 % osuutta kattilatehosta.

Kaukolämpöveteen siirrettävissä olevan energianmäärä määritettiin perustuen polttoaineen kosteudesta johdettuun savukaasujen kastepisteeseen sekä kaukolämpöveden paluulämpötilaan ja virtaukseen. Polttoaineen kosteudella 50 % savukaasun kastepisteeksi saadaan taulukon 4 mukaisesti 64,0 °C. Savukaasupesurin asteisuudeksi arvioitiin 2 °C, jolloin kaukolämmön paluuvesi lämpenee savukaasupesurin vaihtimessa 62,0 °C lämpötilaan. Kaukolämpöveteen siirrettävissä oleva energia ratkaistiin yhtälön 1 mukaisesti mallinnuksesta saatujen kaukolämpövirtauksen ja paluulämpötilan avulla.

Kuten taulukosta 6 voidaan huomata, savukaasupesurin tuotantoa esimerkkipisteessä rajoittaa savukaasuista saatavilla oleva energia. Tällöin menolämpötilalla ei ole vaikutusta savukaasupesurin tuotantoon. CHP1 laitoksen kaukolämpötehon määritys on iteratiivinen prosessi, johtuen savukaasupesurin kaukolämmöntuotannon ja kattilatehon välisestä riippuvuudesta. Iterointi toteutettiin niin, että CHP laitosten vastapainekaukolämmöntuotannon ja savukaasupesurin kaukolämmöntuotannon summa vastaa kaukolämpömallinnuksessa määritettyä kokonaistuotantoa.

Iteroitujen vastapainekaukolämpötehojen avulla, voidaan seuraavaksi laskea CHP laitoksen sähköntuotanto. Molempien CHP laitosten sähköntuotannon rakennusasteeksi on referenssimenolämpötilalla 85°C arvioitu 0,4. Sähköntuotannon rakennusasteen oletettiin laskennassa muuttuvan 0,3 %/°C. Tällä menetelmällä lasketut hetkelliset sähkötehot esitetään taulukossa 6.

Menolämpötilan taloudellista optimia määritettäessä lasketaan seuraavaksi lämpöhäviöiden, pumppauksen ja tuotannon kustannukset. Verkoston lämpöhäviöiden kustannusvaikutuksia arvioitaessa arvioitiin lämmön muuttuvaksi tuotantokustannukseksi noin 17,7 €/MWh. Edellä mainittu luku koostuu vastapainekaukolämpötuotannon muuttuvasta kustannuksesta 22,22 €/MWh sekä savukaasupesurin LTO:sta. Vastapainelämmöntuotannon osuus esimerkkipisteessä on noin 79 %. Yhtälöstä 1 poiketen, muuttuvassa tuotantokustannuksessa ei tässä tapauksessa huomioitu sähkönmyynnistä saatavia tuloja, sillä ne käsitellään tuotannon mallinnuksen yhteydessä erillisenä osana.

Pumppauksen sähkönkäytön kustannukset arvioitiin edellisessä luvussa esitetyllä menetelmällä, missä suurin osa pumppauksen sähkönkäytöstä voidaan olettaa lämmittävän pumpattavaa nestettä. Pumppauksen muuttuvaksi kustannukseksi saadaan 13,86 €/MWh, kun pumppauksen sähkönkäytöstä 97 % oletetaan lämmittävän pumpattavaa nestettä. Yhteistuotantolaitoksella pumpun käyttämän sähkön hintana käytettiin 35 €/MWh. Pumpun lämmittävän vaikutuksen oletettiin laskennassa korvaavan lämmön muuttuvalla kustannuksella 17,7 €/MWh tuotettua lämpöä.

Menolämpötilan vaikutuksessa sähköntuotantoon sähkön myyntituloksi oletettiin 35 €/MWh. Sähköntuotannon muuttuvaksi kustannukseksi arvioitiin 90 % hyötysuhteella 22,22 €/MWh. Koska kaukolämpövirtaus ei esimerkkipisteessä rajoita savukaasupesurin LTO-tehoa, menolämpötilan kustannusvaikutus savukaasupesurin tuotantoon olettaa nollaksi. Tässä tarkastelussa ei otettu huomioon menolämpötilan mahdollisia vaikutuksia paluulämpötilaan ja savukaasupesurin tuotantoon. Menolämpötilan muutoksen kustannusvaikutukset 20 MW tuotantopisteessä esitetään taulukossa 7.

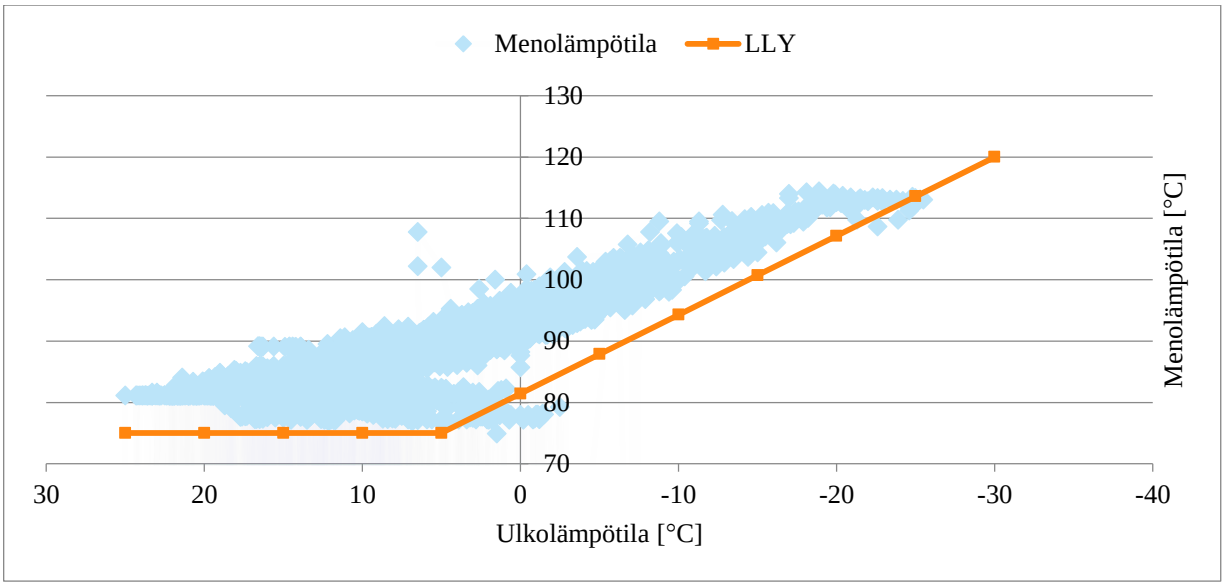
Taulukko 7: Menolämpötilan muutoksen kustannusvaikutukset kolmella eri menolämpötilalla verrattuna referenssimenolämpötilaan 85°C kokonaiskaukolämmöntuotannolla 20 MW.

Muutos referenssimenolämpötilasta (85°C)		-10°C	-5°C	+5°C
Verkoston lämpöhäviöt	€/h	-5,5	-2,7	2,3
Pumppauksen sähkönkäyttö	€/h	2,0	0,7	-0,5
Sähköntuotannon myyntitulot	€/h	-0,4	-0,2	0,6
SK-pesurin tuotanto	€/h	0,0	0,0	0,0
Yhteensä	**€/h**	-3,9	-2,2	2,5

Esimerkkipisteessä menolämpötilan optimi on mallinnetuista menolämpötiloista matalin. Suurin yksittäinen vaikutus kaikilla menolämpötiloilla on verkostohäviöissä, jotka ovat yksin noin kolminkertaiset pumppauskustannusten nousuun verrattuna.

Mallinnuksen perusteella esimerkkipisteessä menolämpötilaa pitäisi olla mahdollista pudottaa jopa 10 °C, mutta todellisuudessa menolämpötilan laskua voi rajoittaa verkon tekniset erityispiirteet, joita ei mallinnuksessa voida huomioida. Tulosten perusteella voidaan todeta, että esimerkkipisteessä kaukolämpöveden menolämpötila tulisi säätää mahdollisimman matalaksi, tekniset sekä laadulliset rajoitukset huomioiden.

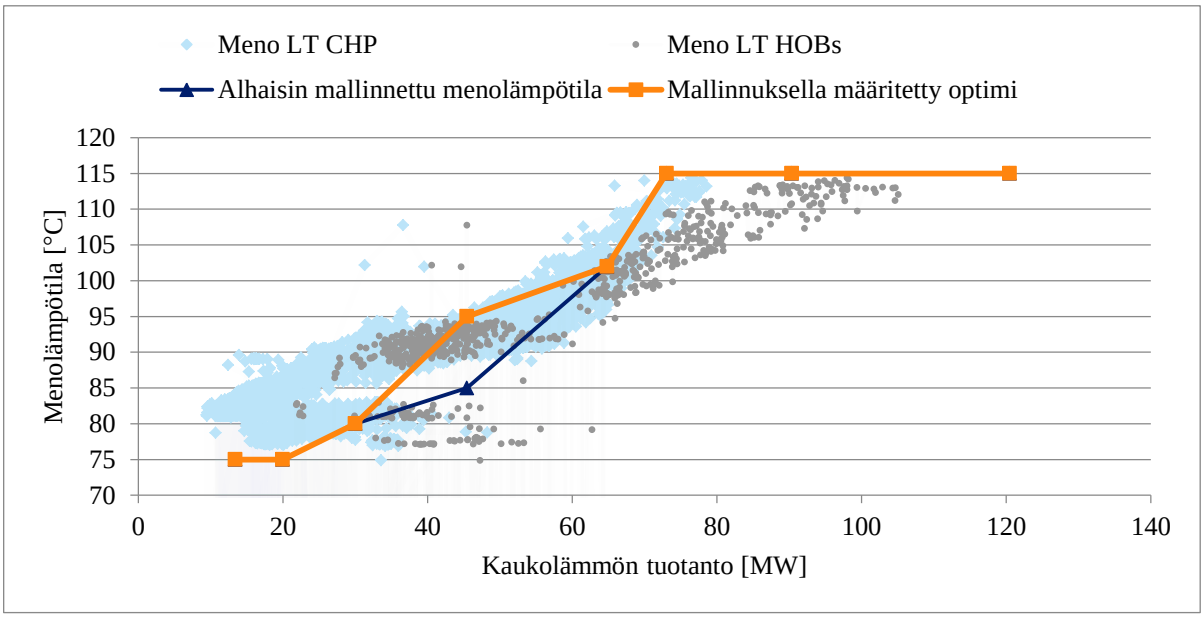
Kaukolämmön menoveden lämpötilan optimointi toteutettiin vastaavalla menetelmällä myös muille seitsemälle tarkastelupisteelle. Kuvassa 24 esitetään esimerkkiverkon toteutuneet menolämpötilan tuntimittaukset vuoden ajalta. Lisäksi kuvassa esitetään toisessa luvussa esitelty Lämpölaitosyhdistyksen vuonna 1978 julkaisema suosituskäyrä sekä vuoden 2017 menolämpötilan tuntimittaukset (Energiateollisuus 2006, 336).



Kuva 24: Verkostomallinnuksella määritetty menolämpötilan optimikäyrä ulkolämpötilan funktiona sekä vuoden 2017 menolämpötilamittaukset.

Yllä esitetty kuva osoittaa, että esimerkkiverkon menolämpötilan säätö perustuu korjattuun ulkolämpötilasta riippuvaan LLY:n suosituskäyrään. Menolämpötilan määrittäminen ulkolämpötilan funktiona ei kuitenkaan ole tehokkainta, sillä menolämpötila tulisi aina määrittää perustuen verkon todelliseen tuotanto- ja pumppaustilanteeseen.

Kuvassa 25 esitetään kaukolämpöverkon mallinnuksella määritetty menoveden lämpötilan optimikäyrä kaukolämmön tuotannon funktiona. Vaalean sininen pisteparvi on vuoden 2017 menolämpötilan mittaukset CHP laitosten kokonaiskaukolämmöntuotannon funktiona. Harmaat pisteet kuvaavat menolämpötiloja, CHP laitosten sekä kaasu- ja öljylaitosten kokonaistuotannon funktiona. Sininen käyrä kuvaa alhaisinta mallinnettua menolämpötilaa eli mallinnuksen mukaista minimiä, missä kaukolämpöjärjestelmän paine- ja lämpötilatasot ovat sallitulla alueella.



Kuva 25: Kaukolämpöverkon mallinnuksella määritetty menolämpötilan optimikäyrä sekä menolämpötilan mallinnettu minimikäyrä esimerkkiverkolle B. (Pöyry Finland Oy 2018)

Kaukolämmön menolämpötila haluttiin ilmaista kaukolämpökuorman funktiona, sillä sen avulla on tarkempaa arvioida verkon siirron ja pumppauksen tilaa. Kuvasta 25 huomataan, että menolämpötilan optimi asettui yhtä pistettä lukuun ottamatta menolämpötilan mallinnetulle minimikäyrälle. Kyseisessä pisteessä kaukolämpöä tuotetaan molemmilla CHP-laitoksilla ja pumppaus toteutetaan välipumppaamon ja laitoksen kaukolämpöpumppujen avulla. Tällöin lämpöhäviöiden muuttuva kustannus on peruskuormalaitoksen savukaasupesurin tuotannon vuoksi alhainen ja pumppauksen säätö tapahtuu verot ja siirtomaksut sisältävällä sähkön hinnalla. On taloudellisesti edullista lisätä lämpöhäviöitä kalliin pumppauksen sijasta. Muissa pisteissä pumppauksen maksimointi lämpöhäviöiden sijasta on kannattavinta.

Kuvasta 25 voidaan myös huomata, että esimerkkiverkossa on käytetty alhaisempia menolämpötiloja kuin mallinnuksesta saatu minimikäyrä osoittaa. Tämä johtuu mallinnuksessa käytetyistä oletuksista sekä siitä, että kaukolämpöverkon toimintaa mallinnettiin periaatteella missä alhaisimman tuotantokustannuksen tuotanto on aina maksimoitu ennen seuraavan tuotantoyksikön käynnistämistä.

Etenkin suurilla kaukolämpökuormilla menolämpötilaa on voitu pitää mallinnettua minimiä alempana, johtuen tarpeettomasta huippukattiloiden käytöstä. Edellä esitetyn kuvan harmaat pisteet yli 70 MW kokonaistuotannolla kuvaavat selvästi, kuinka huippukattilan käyttö

vaikuttaa CHP laitosten jakelualueeseen ja verkon siirtokykyyn. Kyseisissä pisteissä huippukattila on käynnistetty ennen peruskuormalaitoksen maksimia, jolloin siirtojohto CHP-laitoksen ja kaupungin välillä rajoittaa vasta alemmalla menolämpötilalla. Taloudellisesti tämä ei ole kannattavaa sillä huippulämpökeskusten lämmöntuotantokustannus on huomattavasti korkeampi kuin peruskuormalaitoksen. Kaasukattilan 1 MW:n turha käyttö peruskuormalaitoksen ollessa osakuormalla, vastaa 32,7 €/h kustannusten nousua lämmönhankintakustannuksissa.

Menolämpötilan muutoksen kustannusvaikutukset komponenteittain esimerkkiverkossa B esitetään taulukossa 8.

Taulukko 8: Menolämpötilan alentamisen säästöpotentiaali yhdellä asteella esimerkkiverkossa B kahdeksassa eri pisteessä. Negatiivinen luku viittaa alentuneisiin kustannuksiin.

Kaukolämmön kokonaistuotanto	Verkoston lämpöhäviöt [€/h/°C]	Pumppauksen sähkönkäyttö [€/h/°C]	Sähköntuotanto [€/h/°C]	SK-pesurin tuotanto [€/h/°C]	Yhteensä [€/h/°C]
0 - 16 MW	-0,81	0,09	-0,05	0,00	-0,77
16 - 25 MW	-0,55	0,11	-0,05	0,00	-0,49
25 - 35 MW	-0,54	0,35	-0,33	0,00	-0,51
35 - 45 MW	-0,63	1,88	-0,35	-0,31	0,58
45 - 67 MW	-0,96	0,46	0,24	0,00	-0,25
67 - 75 MW	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
75 - 95 MW	-1,88	1,14	-0,28	-7,56	-8,59
95 - 120 MW	-3,85	1,08	-0,06	-15,24	-18,07

Yllä esitetystä taulukosta voidaan huomata, että menolämpötilaa laskemalla suurimaat kustannusvaikutukset ovat alentuneilla verkostohäviöillä. Poikkeuksena tilanteet, joissa kasvava menolämpötila on rajoittanut savukaasupesurin tuotantoa. Toisena poikkeuksena on kaukolämmön tuotanto alue 35–45 MW, missä menolämpötilan laskusta kasvavat pumppauskustannukset ovat suuremmat kuin pienentyneet verkoston lämpöhäviöiden kustannukset. Kyseisellä alueella esitetty positiivinen kustannusvaikutus kuvaa, tilannetta missä menolämpötilaa muista pisteistä poiketen nostaa alimpaan mahdolliseen verrattuna. Tällä välillä menolämpötilaa pidetään sellaisella tasolla, että kaukolämmön pumppaus CHP laitoksella on maksimoitu ja välipumppaamoa käytetään tarvittaessa. Tärkeintä on kuitenkin huomata, että lämpötila ei saa nousta niin suureksi, ettei CHP laitoksen pumppaus ole enää

maksimissa. Muissa pisteissä optimi menolämpötila vastaa matalinta mahdollista menolämpötilaa, huomioiden ettei verkon siirtokyky rajoita halvinta tuotantoa.

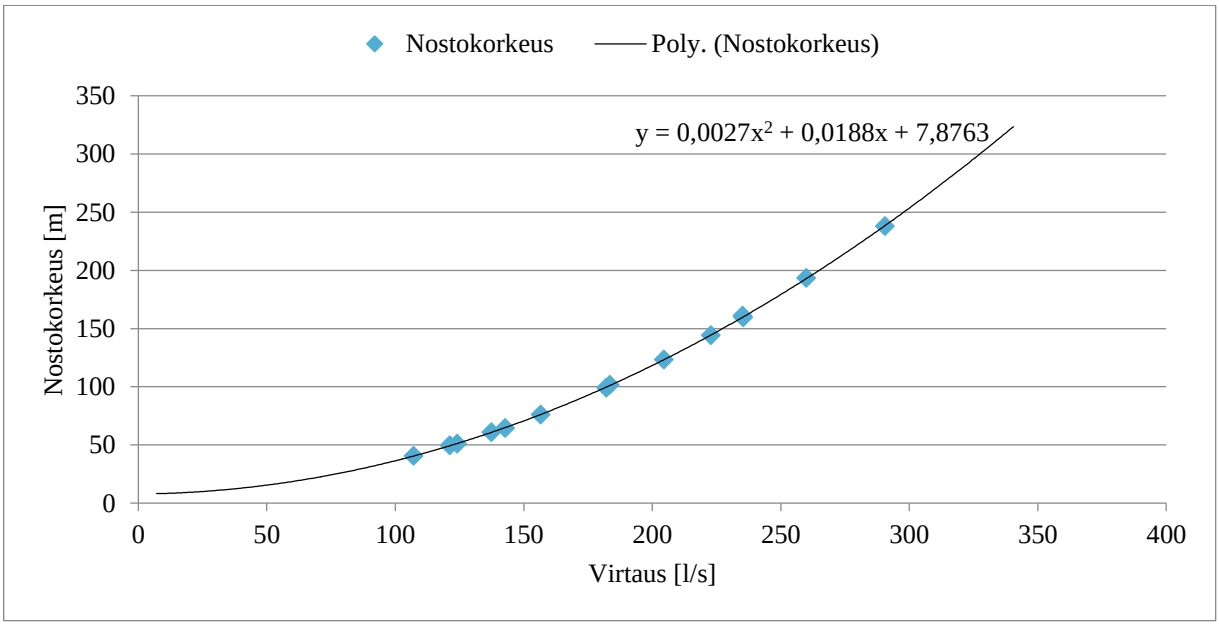
Suurimmat yksittäisen tunnin ja asteen kustannusvaikutukset ovat talvella yli 75 MW tuotannolla, jolloin lämmön marginaalikustannus on huippulämpökeskusten käydessä korkea. Suurin vaikutus näissä pisteissä on kuitenkin kaukolämmön vesivirran rajoittamalla savukaasupesurin tuotannolla. Kyseisiä tunteja on vuositasolla kuitenkin vähän, joten niiden vuosittainen kustannusvaikutus jää melko pieneksi. Vastaavasti pienillä ja keskisuurilla kuormilla menolämpötilan vuotuiset kustannusvaikutukset ovat merkittävämpiä, johtuen niiden suuresta osuudesta koko vuoden tunneista.

Vertaamalla esimerkkiverkon toteutuneita menolämpötiloja optimiin, saadaan vuotuiseksi säästöpotentiaaliksi noin 18,3 k€. Tämä vastaa esimerkkiverkon B kokonaislämmönhankinnalla noin 0,06 €/MWh_{kl} säästöpotentiaalia tuotettua kaukolämpöenergiaa kohden. Suurin osa, noin 14 k€ säätöpotentiaalista koskee kesäajan kaukolämmöntuotantoa, jolloin kokonaistuotanto on alle 25 MW. Toisaalta esimerkkiverkossa olisi mahdollista saavuttaa jopa 80–90 k€/a säästöt huippukattiloiden käytössä nostamalla menolämpötilaa niin, että kaikki peruskuromalaitoksilta saatavissa oleva teho saadaan siirrettyä. Kustannusvaikutusten laskennassa otettiin huomioon vain ne pisteet, jotka olivat optimikäyrän yläpuolella. Kokonaistuotannolla 35–45 MW säästöpotentiaalin laskentaan otettiin huomioon pisteet, jotka olivat optimikäyrän alapuolella.

4.2 Menolämpötilan optimin määrittäminen ilman verkostomallia

Menolämpötilan optimin määrittäminen voidaan toteuttaa myös tuntimittauksiin ja verkoston dimensioihin perustuen. Optimointi toteutetaan samalla periaatteella kuin verkostomallinnuksen avulla, tarkastelemalla menolämpötilan muutoksen kustannusvaikutuksia useassa eri tuotantopisteessä. Pumppauksen sähkönkäytön muutos voidaan arvioida muodostamalla verkostolle nostokorkeuden käyrä tilavuusvirran funktiona. Verkon lämpöhäviöt voidaan määrittää hyödyntämällä Energiateollisuuden vuonna 2016 julkaisemaa kaukolämpöjohtojen eristepaksuuden optimointityökalua (Energiateollisuus 2016). Mahdollisen sähkötuotannon ja savukaskupesurin lämmöntuotannon mallinnus voidaan tehdä erikseen luvussa 4.1 esitetyn mallin mukaisesti.

Pumppauksen sähkönkäytön muutoksen arvioimiseksi verkostolle muodostetaan ominaiskäyrä nostokorkeudesta virtauksen funktiona. Ominaiskäyrän määrittäminen on parasta tehdä päätuotantolaitoksen kaukolämpöpumpun tuntimittausten perusteella, sillä valtaosa vuotuisesta kiertopumppauksesta tapahtuu kyseisestä pisteestä. Kuvassa 26 esitetään esimerkkiverkon B päätuotantolaitoksen kaukolämpöpumpun datasta määritetty putkiston ominaiskäyrä.



Kuva 26: Kaukolämpöpumpun tuntimittausten perusteella määritetty putkiston ominaiskäyrä

Tämän käyrän perusteella pumpun sähkönkäyttö voidaan määrittää yhtälön 3 mukaisesti, kun kaukolämpöveden virtaus tiedetään. Taulukossa 9 esitetään esimerkkiverkon B yhdessä tuotantopisteessä määritetyt pumppauksen sähkönkäytön muutokset neljällä eri menolämpötilalla. Tarkastelupisteenä käytetään edellisessä verkostomallinnuksen esimeikkilaskennassa käytettyä pistettä, missä kaukolämpöteho on 20 MW. Pumpun mekaanisen hyötysuhteeksi oletettiin 85 %.

Taulukko 9: Putkiston ominaiskäyrän muutoksen perusteella määritetyt pumppauksen sähkönkäytön muutokset esimerkkiverkolle B.

Syötetyt arvot (tuntidata)					
Menolämpötila	°C	75	80	**85**	90
Paluulämpötila	°C	50	50	50	50
Kaukolämmön kokonaistuotanto	MW	20	20	20	20
Pumppaus (laskennallinen)					
Virtaus	l/s	194,8	162,4	139,2	121,8
Nostokorkeus	m	114,0	82,1	62,8	50,2
Sähkönkäyttö	kW	251,3	150,8	98,8	69,1

Tarkastelupisteen paluulämpötila määritettiin tuntimittauksiin perustuen. Referenssimenolämpötila 85°C määritettiin niin ikään perustuen todellisuudessa käytettyyn arvoon. Kaukolämpöveden virtaus määritettiin yhtälön 1 mukaisesti kaukolämpöveden lämpötilan muutoksen ja veden ominaislämpökapasiteetin avulla. Kaukolämpöpumpun nostokorkeus määritettiin kaukolämpövirtauksen ja kuvassa 26 esitetyn putkistokäyrän perusteella. Pumppauksen sähkönkäyttö laskettiin nostokorkeuden ja kaukolämpövirtauksen perusteella yhtälön 3 mukaisesti.

Menolämpötilan muutoksen vaikutusta verkoston lämpöhäviöihin arvioitiin Energiateollisuuden julkaisemien kaukolämpöjohtojen eristyspaksuuden optimointityökalun avulla. Optimointityökalu on rakennettu Excel-taulukkolaskenta pohjalle ja sen avulla voidaan laskea verkoston hetkelliset lämpöhäviöt polyuretaanieristetyille MPUK ja 2MPUK johdoille. (Energiateollisuus 2018) Laskenta toteutettiin perustuen esimerkkiverkon B todellisiin putkihalkaisijoihin ja mittoihin perustuen. Laskennassa nimelliskokoa DN150 pienemmät linjat oletettiin MPUK tyyppiseksi. Nimelliskooltaan DN150 ja sitä suuremmat johdot oletettiin 2MPUK tyyppisiksi.

Esimerkkiverkolle B laskentamallin avulla määritetyt verkoston lämpöhäviöt esitetään taulukossa 10. Maaperän lämpötilaksi oletettiin 6 °C.

Taulukko 10: Menolämpötilan muutoksen vaikutus hetkellisiin verkostohäviöihin tarkastelupisteessä esimerkkiverkolle B.

Menolämpötila	**°C**	**75**	**80**	**85**	**90**
Lämpöhäviöt (eristepaksuuden optimointimalli)	kW	2886,0	3013,7	3141,5	3269,2
Lämpöhäviöt (iteroitu)	kW	4103,6	4285,2	4466,8	4648,4

Laskentamallista saadut hetkelliset lämpöhäviöt korjattiin perustuen verkon todellisiin lämpöhäviöihin, sillä laskentamallissa kaikki kaukolämpöjohdot oletetaan polyuretaanieristetyksi. Todellisuudessa verkostossa on käytössä muitakin kanavatyyppejä. Lisäksi optimointi työkalussa kaukolämpöjohtojen eristeominaisuuden oletetaan vakioksi, vaikka todellisuudessa ne vaihtelevat kosteudesta ja iästä riippuen.

Tuotannon mallinnus toteutettiin vastaavalla tavalla, kuin edellisessä verkostomallilla tehdyssä optimoinnissa. Vastapainesähköntuotannon rakennussuhteen oletettiin heikkenevän 0,3 %/°C. Menolämpötilan muutoksen kustannusvaikutukset esimerkkipisteessä esitetään taulukossa 11.

Taulukko 11: Ilman verkostomallinnusta määritetty menolämpötilan kustannusvaikutus esimerkkipisteessä. Negatiivinen luku viittaa alentuneisiin kustannuksiin.

Muutos referenssimenolämpötilasta (85°C)		-10°C	-5°C	+5°C
Verkoston lämpöhäviöt	€/h	-6,4	-3,2	3,2
Pumppauksen sähkönkäyttö	€/h	2,8	1,0	-0,5
Sähköntuotannon myyntitulot	€/h	0,6	0,3	-0,3
SK-pesurin tuotanto	€/h	0,0	0,0	0,0
Yhteensä	**€/h**	-3,0	-2,0	2,4

Kuten verkostomallinnuksella määritetyssä optimoinnista taloudelliseksi optimiksi saadaan alhaisin käsitellyistä menolämpötiloista. Menolämpötilan alaraja voidaan määrittää perustuen verkoston putkistokäyrään. Käyrästä voidaan määrittää maksimivirtaama, jolla verkostossa saadaan lämpö siirrettyä. Optimointiin tarvittavan putkistokäyrän muodostaminen suurelle kaukolämpöverkolle voi olla erittäin hankalaa, johtuen pumppauksen sijainnista eri puolella kaukolämpöverkkoa. Edellä esitelty menetelmä sopii parhaiten kaukolämpöverkoille, missä suurin osa kaukolämmön pumppauksesta toteutetaan yhdestä pisteestä.

4.3 Menolämpötilan optimoinnin tulokset muille kaukolämpöverkoille

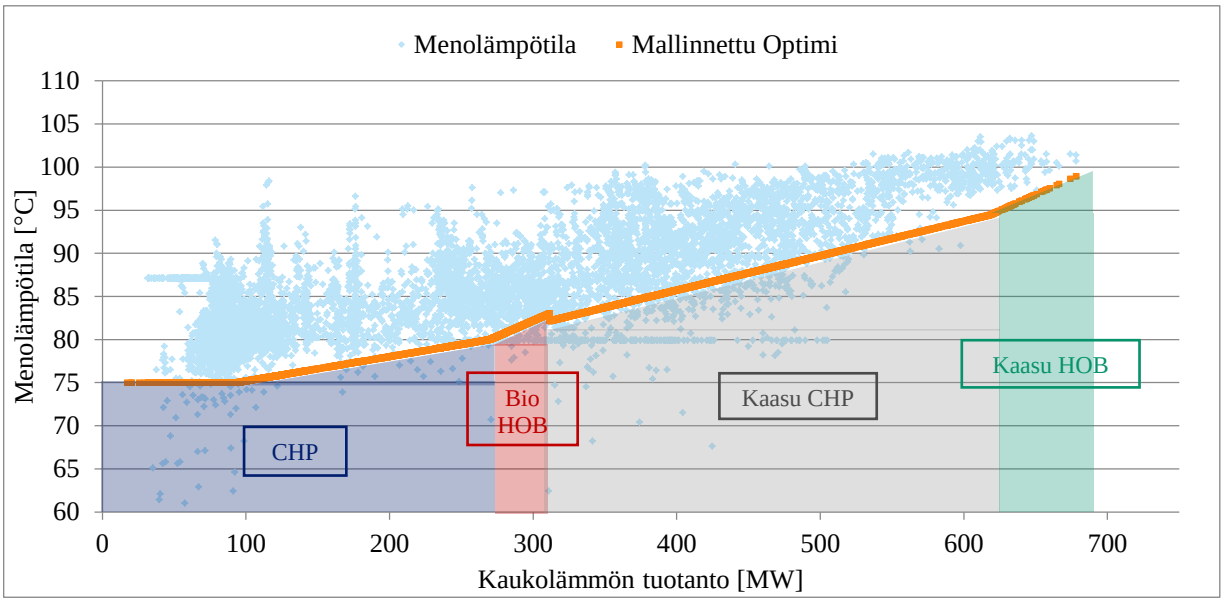
Menolämpötilan optimointi toteutettiin edellä määritetyllä menetelmällä myös esimerkkimerkkiverkoille A ja C. Esimerkkiverkolle C menolämpötilaa mallinnettiin kahdeksassa pisteessä. Menolämpötilan laskun kustannusvaikutukset esitetään taulukossa 12.

Taulukko 12: Menolämpötilan laskun kustannusvaikutukset komponenteittain seitsemällä eri alueella esimerkkiverkolle C. Negatiivisella arvolla viitataan alentuneisiin kustannuksiin.

Kaukolämmön kokonaistuotanto	Verkoston lämpöhäviöt [€/h/°C]	Pumppauksen sähkönkäyttö [€/h/°C]	Sähköntuotanto [€/h/°C]	SK-pesurin tuotanto [€/h/°C]	Yhteensä [€/h/°C]
0 - 94 MW	-3,1	0,2	-0,8	0,0	-3,8
94 - 270 MW	-4,4	1,8	-2,7	0,0	-5,3
270- 311 MW	-4,6	3,7	-2,7	0,0	-3,5
311-382 MW	-5,2	3,7	-3,6	0,0	-5,2
382-619 MW	-7,3	4,4	-6,5	0,0	-9,4
619-751 MW	-43,5	-5,8	-7,4	-22,5	-79,3
751-850 MW	-43,5	-5,8	-7,4	-22,5	-79,3

Jokaisessa mallinnetussa pisteessä menolämpötilan laskun myötä pienentyneiden lämpöhäviöiden kustannusvaikutus on suurempi kuin pumppauksen sähkön käytön kustannusten nousu, mikä asettaa menolämpötilan optimin minimikäyrälle. Tämä on tyypillistä verkolle, jossa pumppauksen saadaan valtaosin omakäyttösähkönä. Suurimmat yksittäisen tunnin kustannusvaikutuksen tunnit ovat suurilla talvitilanteen kuromilla, jolloin korkea lämmön marginaalikustannus nostaa lämpöhäviöiden kustannusvaikutusta. Talvitilanteessa myös kaukolämpövirtaus rajoittaa savukaasupesurin LTO-tehoa, jolloin menolämpötilaa laskemalla voidaan kasvattaa kaukolämpövirtausta olettaen paluulämpötilan pysyvän vakiona. Tällä oletuksella menolämpötilan laskulla voidaan saavuttaa suoria säästöjä polttoainekustannuksissa.

Esimerkkiverkon C vuoden 2016 menolämpötilojen tuntimittaukset sekä mallinnuksella määritetty optimikäyrä kaukolämpökuorman funktiona esitetään kuvassa 27. Alla esitetyn kuvan optimikäyrä vastaa mallinnuksen avulla määritettyä menolämpötilan minimikäyrää.



Kuva 27: Verkostomallinnuksella määritetty optimikäyrä kaukolämmöntuotannon funktiona esimerkkiverkolle C. (Pöyry Finland Oy 2018)

Kuvassa 27 havainnollistetaan lämmöntuotannon tyypillisen ajojärjestyksen perusteella, kuinka eri tuotantoyksiköiden käynnistys vaikuttaa menolämpötilan minimikäyrään. Tuotantoyksikön käynnistys muuttaa verkon jakelualueita, jolloin myös verkon paikallinen siirtokyky voi muuttua. Esimerkkinä noin 310 MW kokonaistuotannon tilanne, jossa menolämpötilaa tulee ensin nostaa jyrkemmin; uuden tuotantoyksikön käynnistyessä menolämpötilaa voidaan taas laskea. Kyseisessä pisteessä kaukolämpö tuotetaan samalla alueella sijaitsevilta CHP-laitokselta ja biolämpökeskukselta. Lämmönsiirto kaupunkiin tapahtuu saman siirtolinjan kautta. Molempien laitosten käydessä täydellä teholla, pumppauksen tarve kasvaa huomattavasti siirtolinjan suhteellisten painehäviöiden kasvaessa. Tällöin menolämpötilaa on nostettava lämmönsiirron varmistamiseksi. Vuonna 2016 esimerkkiverkon C menolämpötila oli keskimäärin 5,24 °C mallinnuksella määritettyä optimimenolämpötilaa korkeampi.

Taulukossa 13 esitetään menolämpötilan optimoinnin kustannusvaikutukset eri kaukolämmön tuotantoalueilla.

Taulukko 13: Esimerkkiverkon C menolämpötilan optimoinnin vuotuiset kustannusvaikutukset eri kaukolämpökuormilla.

Kaukolämmön kokonaistuotanto	Tunteja vuodessa [h]	Kustannusvaikutus [€/a]	Kustannusvaikutus [€/MWh]
0 - 94 MW	2184	-49 036	-0,28
94 - 270 MW	2474	-84 561	-0,21
270 - 311 MW	709	-12 833	-0,06
311 - 382 MW	1140	-36 261	-0,09
382 - 619 MW	2189	-114 403	-0,11
619 - 751 MW	88	-31 912	-0,57
751 - 850 MW	0	0	0

Alentamalla menolämpötilaa keskimäärin 5,24 °C, voidaan esimerkkiverkossa C saavuttaa noin 329 k€ vuotuiset säästöt. Verkon vuosituotannolla tämä vastaa keskimäärin noin 0,15 €/MWh_{kl} säästöä tuotettua kaukolämpöenergiaa kohden. Suurimmat vuotuiset kustannusvaikutukset painottuvat vuotuisen käyttöajan mukaisesti kesä sekä syys- ja kevät aikaan. Talviajan kustannukset eivät ole kuitenkaan merkityksettömiä pienestä käyttöajasta huolimatta, sillä yksittäisen tunnin kustannusvaikutus on huomattavasti muita ajankohtia suurempi. Talviajan menolämpötilan kustannusvaikutukset voivat nousta erittäin merkittäviksi etenkin kylminä talvina.

Menolämpötilan optimointi toteutettiin edellä verkostomallinnuksen avulla myös esimerkkiverkolle A. Menolämpötilan kustannusvaikutukset pumppaukseen, lämpöhäviöihin ja sähköntuotantoon esitetään taulukossa 14.

Taulukko 14: Mallinnuksella määritetyt vuotuiset menolämpötilan muutoksen kustannusvaikutukset esimerkkiverkolle A.

Menolämpötilan muutos	**-5 °C**		**+5 °C**	
	€/a	€/MWh	€/a	€/MWh
Pumppaus	3 886	0,03	-658	0,00
Lämpöhäviöt	-26 746	-0,20	23 085	0,17
Sähkön tuotanto	-5 440	-0,04	5 415	0,04
Yhteensä	**-28 300**	**-0,21**	**27 841**	**0,211**

kaikissa mallinnetuissa pisteissä suurimmat kustannusvaikutukset olivat verkoston lämpöhäviöillä, jolloin menolämpötilan optimi vastaa alhaista menolämpötilaa. Myös

pelkästään parantuneen rakennusasteen johdosta kasvaneet sähköntuotannon myyntitulot ovat suuremmat kuin kasvaneet pumppaussähkön kustannukset. Alentamalla vuoden keskimääräistä menolämpötilaa 5 °C:lla voidaan esimerkkiverkossa saavuttaa n. 0,21 €/MWh_{kl} säästöt tuotettua kaukolämpöenergiaa kohden.

5 MENOLÄMPÖTILAN SÄÄTÖSUOSITUS

Nykyinen ulkolämpötilaan perustuva menolämpötilan säätö, johtaa tyypillisesti liian korkeisiin menolämpötiloihin. Ulkolämpötilan sijasta menolämpötilaa tulisi säätää vastaamaan paremmin verkon todellista tilaa pumppauksen, lämpöhäviöiden ja tuotannon osalta. Tässä luvussa esitetään kaksi eri mahdollisuutta menolämpötilan tehokkaan säädön toteuttamiseksi. Säätösuositukset on määritetty niin, että ne olisivat mahdollisimman yksinkertaisesti toteutettavissa niin pienillä kuin isoilla kaukolämpöverkoilla ilman investointeja. Lisäksi tässä luvussa arvioidaan kaukolämpöverkon automaattista varaamisen yhdistämistä menolämpötilan säätökäyrään luomalla kaukolämmöntuotannolle yksinkertainen ennustenmalli.

5.1 Lämmön varaaminen kaukolämpöverkkoon

Kaukolämpöverkkoa voidaan käyttää lämpövarastona lataamalla verkkoa normaalia ajotilannetta korkeammalla menolämpötilalla. Kaukolämpöverkkoon ladattu ylimääräinen lämpö purkautuu ylilämpöisen veden saavutettua asiakkaiden lämmönvaihtimet. Lämmön varastointia eli verkon varaamista voidaan hyödyntää lyhytaikaiseen kulutushuippujen tasaamiseen, nostamalla menolämpötilaa 5–15 °C. Varauksen ajoittaminen tulee tehdä noin 2–5 h ennen ennakoitua kulutushuippua niin, että lämpimän veden rintama saavuttaa asiakkaat kulutushuipun aikana. (Energiateollisuus 2006, 389)

Kaukolämpöverkkoon ladattu ylimääräinen lämpö puretaan kulutushuipun laskemalla tuotantolaitoksen menolämpötila takaisin ohjekäyrälle tai hieman sen alle. Kulutushuipun aikana asiakkaat saavuttanut lämpimän veden rintama johtaa normaalia kulutushuippua pienempään virtaukseen asiakkaiden säätöventtiilien säätäessä paluulämpötilaa haluttuun arvoon. (Energiateollisuus 2006, 390)

Onnistuneella kaukolämpöverkon varauksella voidaan parhaimmillaan välttää huippukattiloiden käynnistys kulutushuipun aikana. Kaukolämpöverkon varausta voidaan hyödyntää myös vastapainesähköntuotannon lyhytaikaisessa lisäämisessä. Korkeiden sähkönhintojen aikana verkkoa ladataan, jolloin sähkötehoa saadaan hetkellisesti kasvatettua. (Energiateollisuus 2006, 389)

Tyypillisesti kaukolämpöverkon varaus toteutetaan säätämällä menolämpötilaa tai sen ohjekäyrää manuaalistesti operaattorin toimesta. Kaukolämpöverkon varukseen tarkoitettu

menolämpötilakäyrä voidaan myös määrittää automaatiojärjestelmään, jolloin verkon varaus tapahtuu automaattisesti. Kaukolämpöverkon varauksen automatisoinnilla voidaan välttää tyypillinen virhe, missä korkeaa menolämpötilaa ajetaan vielä kulutushuipun aikana. Tämä nostaa verkon keskimääräistä menolämpötilaa johtaen suurempiin lämpöhäviöihin.

5.2 Menolämpötila kaukolämpökuorman funktiona

Menolämpötilan säädön voi ulkolämpötilan sijasta perustua hetkelliseen kaukolämpökuormaan tai kaukolämpökuorman ennusteeseen. Säätö voidaan käytännössä samalla tavalla kuin ulkolämpötilaan perustuen, mutta nyt menolämpötila määräytyisi ulkolämpötilamittauksen sijasta kaukolämmön tehomittauksiin tai tuotantoennusteeseen perustuen. Säädön pohjaksi voidaan muodostaa optimoinnilla määritetty staattinen käyrä. Kuten edellisessä luvussa todettiin, menoveden lämpötila riippuu asiakaslaitteiden rajoitteiden lisäksi kaukolämpöverkon hetkellisestä pumppauksesta ja siirtokyvystä. Säätämällä menolämpötilaa kaukolämmön kokonaistuotannon mukaisesti voidaan välttää tilanteet, missä menolämpötila nousee tarpeettoman suureksi. Pelkkään ulkolämpötilaan perustuva menolämpötilan säätö ei ota huomioon sosiaalisista tekijöistä johtuvaa lämmönkysynnän vaihtelua tuntien ja viikonpäivien välillä.

Kuten luvussa 4.1 todettiin, on kaukolämpöverkon tuotanto mallinnettava perustuen optimoituun ajojärjestykseen. Optimiajojärjestyksen kustannusvaikutukset ovat lähes poikkeuksetta huomattavasti suuremmat kuin menolämpötilan muutoksen, jolloin menolämpötilan säädön pohjana on, ettei menolämpötila rajoita halvimman tuotantoyksikön tuotantoa. Menolämpötilan säätökäyrä tulisi tämän vuoksi tehdä päätuotantolaitoksen tuotannon funktiona. Suuremmilla verkoilla säätökäyrä voidaan määrittää perustuen optimiajojärjestyksen mukaiseen tuotantoon.

Optimikäyrä voidaan helpoiten määrittää verkostomallinnuksen avulla laskemalla tuotanto- ja jakelukustannusten minimin eri tuotantopisteissä. Mallinnuksen pohjana on tärkeää käyttää todellisiin mittaustietoihin perustuvaa dataa esimerkiksi lämpöhäviöiden ja paluulämpötilojen osalta. Optimointi voidaan määrittää myös luvussa 4.2 esitetyn mallin perusteella ilman verkostomallia. Tällöin käyrän muodostaminen voidaan toteuttaa dataan tai testiajoon perustuen. Mikäli menolämpötilan taloudelliseksi optimiksi saadaan alhaisin menolämpötila, voidaan optimikäyrä määrittää muodostamalla menolämpötilasta kaukolämpötuotannon

funktiona pisteparvi. Pisteparven alalaita kuvaa alhaisinta menolämpötilaa, jolla kyseinen kaukolämpötehon on saatu siirrettyä. Kyseistä käyrää voidaan käyttää pohjana menolämpötilan säädölle.

Johtuen kaukolämpöverkolle ominaisesta hitaudesta menolämpötilan säädön vaikutukset kuluttajilla näkyvät vasta muutaman tunnin kultua riippuen verkon mitoista. Tämän vuoksi menolämpötilan säätö voidaan toteuttaa kaukolämmön tuotannon ennusteen perusteella. Tällöin menolämpötilan menolämpötila pyrkii vastaamaan todellista asiakkaiden lämmönkysyntää ennakoitavasti. Ennakoiva säätötapa poistaisi myös tarpeen kaukolämpöverkon varaamiselle, sillä kaukolämpöverkkoa varataan ja puretaan tällöin automaattisesti. Ohjeet yksinkertaisen tuotantoennusteen tekemiselle esitetään seuraavassa alaluvussa.

Kaukolämmön tuotantoon perustuva säätö voidaan toteuttaa myös dynaamisesti, laskemalla menolämpötilan optimia jatkuvasti kaukolämmön tuotannon ja paluulämpötilan perusteella. Tällöin menolämpötilalle lasketaan taloudellinen optimi, määrittämällä verkoston lämpöhäviöiden ja pumppauksen sähkönkäytön kustannukset eri menolämpötiloilla. Verkoston lämpöhäviöiden kustannukset voidaan määrittää verkoston häviötehon ja eri menolämpötilojen välille muodostetun käyrän perusteella. Pumppauksen sähkön käyttö eri menolämpötiloilla saadaan verkolle rakennetusta putkistokäyrästä paluulämpötilan ja kaukolämmöntuotannon perustella. Myös menolämpötilan vaikutukset vastapainesähköntuotantoon ja savukaasupesurin LTO-tehoon voidaan yhdistää optimointi laskentaan. Menolämpötilaa säädetään perustuen optimoinnista saatuun arvoon, ottaen huomioon menolämpötilalle asetetut rajoitteet.

Kuten staattisessa kaukolämpötehoon perustuvassa säädössä, optimointi laskenta voidaan toteuttaa kaukolämmöntuotantoennusteen perustuen. Tämän lisäksi optimointilaskelman toteuttamiseksi tarvitaan paluulämpötila ennuste, joka voidaan määrittää vastaavalla menetelmällä kuin kaukolämmöntuotantoennuste.

Kaukolämmön tuotannon mukaisen menolämpötilan säätö voidaan toteuttaa seuraavien ohjeiden perusteella:

1. Riittävä menolämpötila ja paine-ero on varmistettava kauimmaisellakin asiakkaalla
    - Käyttöveden lämpötila minimissään 55 °C
    - Ilmanvaihto- ja lämmityspattereiden mitoituslämpötilakäyrät
    - Paine-ero asiakaslaitteiston yli minimissään 0,6 bar
2. Verkoston maksimilämpötila ja paine-ero
    - Kaukolämpöveden maksimilämpötila tyypillisesti 120 °C
    - Kaukolämpöverkon menopaine maksimissaan 16 bar
        i. Tyypillisesti KL-pumpun nostokorkeus rajoitta ennen verkoston maksimipainetta
    - Paine-ero asiakkaan lämmönjakokeskuksen yli maksimissaan 5 bar
3. Menolämpötila ei rajoita lämmönsiirtoa halvimmalta tuotantoyksiköltä
4. Menolämpötilaa säädetään kaukolämmön tuotantoon tai tuotantoennusteeseen perustuen
    - Staattinen menolämpötilalle määritetty optimikäyrä kaukolämmöntuotannon funktiona
    - Optimi menolämpötila lasketaan dynaamistesti perustuen nykyiseen tai tulevaan kaukolämmöntuotantoon
        - Menolämpötilan kustannusvaikutus verkostohäviöihin
        - Menolämpötilan vaikutus pumppauskustannuksiin nykyisellä kaukolämmöntuotannolla ja paluulämpötilalla tai niiden ennusteilla
        - Menolämpötilan vaikutus vastapainesähköntuotantoon ja savukaasupesurin lämmöntalteenottoon

5.3 Tuotantoennusteen luominen usean muuttuja lineaarisen regeressiomallin avulla

Kaukolämmön kulutuksen ennustetta hyödynnetään yleensä tuotannon suunnittelussa ja vastapainesähkön tuotantoennusteessa. Tuotantoennusteiden käyttö suomalaisissa energiayhtiöissä vaihtelee huomattavasti riippuen yrityksen koosta; suurimmilla energiayrityksillä ennustemallit ovat kehittyneitä, mutta suurimalla osalla yrityksistä kehittyneistä tuotonennusteita ei käytetä. Tämä johtuu tyypillisesti siitä, että tutkitut ennustemallit vaativat suuren määrän mittausdataa, joka on reaaliaikaisessa luennassa.

Kaukolämmön kulutusennuste perustuu tyypillisesti kahteen päätekijään; säätilaan ja sosiaaliseen komponenttiin. Sosiaalisella komponentilla viitataan eri viikonpäivien ja kellonaikojen mukaan vaihtuvaan kaukolämmön kysynnän vaihteluun. Mallit luodaan perustuen valittujen suureiden toteutuneisiin arvoihin. On huomattava, että mallin luonnissa käytettyjä parametreja tarvitaan myös ennusteen tekemiseen. Tämän vuoksi mallin luonnissa on huomioitava mahdollisuudet ennustemallin käytettävyydestä käytännössä.

Vuonna 2016 Fang & Lahdelman, julkaisemassa tutkimuksessa kaukolämmön kysynnän ennustemalleja luotiin perustuen ulkolämpötilaan, tuulen nopeuteen sekä eri viikonpäivien tyypillisiin kulutusprofiileihin. Tutkimuksessa vertailtiin viittä eri usean muuttujan lineaariseen regressioon perustuvaa mallia, yhteen aikasarjamalliin perustuvaan malliin. Ennustemallien toimivuutta testattiin perustuen datanäytteen ulkopuoliseen todelliseen lämmönkysyntään 20 viikon ajalta. Tutkimuksen testien perusteella tarkimmaksi malliksi todettiin usean muuttujan lineaarinen regressio, jossa muuttujina olivat ulkolämpötila, tuulen nopeus sekä 168 tunnin viikkorytmi. Arkipyhät arvioitiin lauantaiksi tai sunnuntaiksi. (Fang et al. 2016, 545–550)

Kaukolämmön tuotantoennuste voidaan luoda myös mallintamalla asiakkaiden kulutusta sekä verkoston lämpöhäviöitä. Tyypillisesti asiakkaiden lämmönkulutuksen ennustaminen on tarkempaa, kuin tuotannon ennustaminen, sillä lämmönkulutus riippuu ulkolämpötilasta ilman kaukolämpöverkolle ominaista hitautta. Kyseinen malli vaatii historia dataa etäluettavista asiakkaiden mittareista, joissa lämmönkulutusta mitataan tunneittain. Tässä työssä ennustemalli luodaan tuotantodatan perusteella, sillä kaikissa kaukolämpöjärjestelmissä asiakaslaitteistosta ei ole saatavissa tuntimittauksia. Samalla voidaan testata, kuinka regressiomalli huomioi asiakkaiden lämmönkysynnän ja tuotannon välisen viiveen sekä verkostossa tapahtuvat lämpöhäviöt.

Tässä työssä rakennetaan neljä eri ennustemallia perustuen usean muuttujan lineaariseen regressioon sekä yksi malli perustuen pelkään kahden viimeisen tunnin toteutuneeseen kaukolämmöntuotantoon. Muuttujiksi valittiin ulkolämpötila sekä lämmönkulutuksen viikko- ja vuorokausirytmi. Ennusteet luodaan esimerkkiverkon D vuoden 2016 vuoden tuntidatan perusteella.

Lineaarinen regressioanalyysi on statistinen menetelmä, jolla pyritään selittämään tosistaan riippumattomien muuttujien muutoksen vaikutusta selitettävään suureeseen. Selitettävän muuttujan ja selitettävien muuttujien välinen suhde ilmaistaan yhtälön 6 mukaisesti.

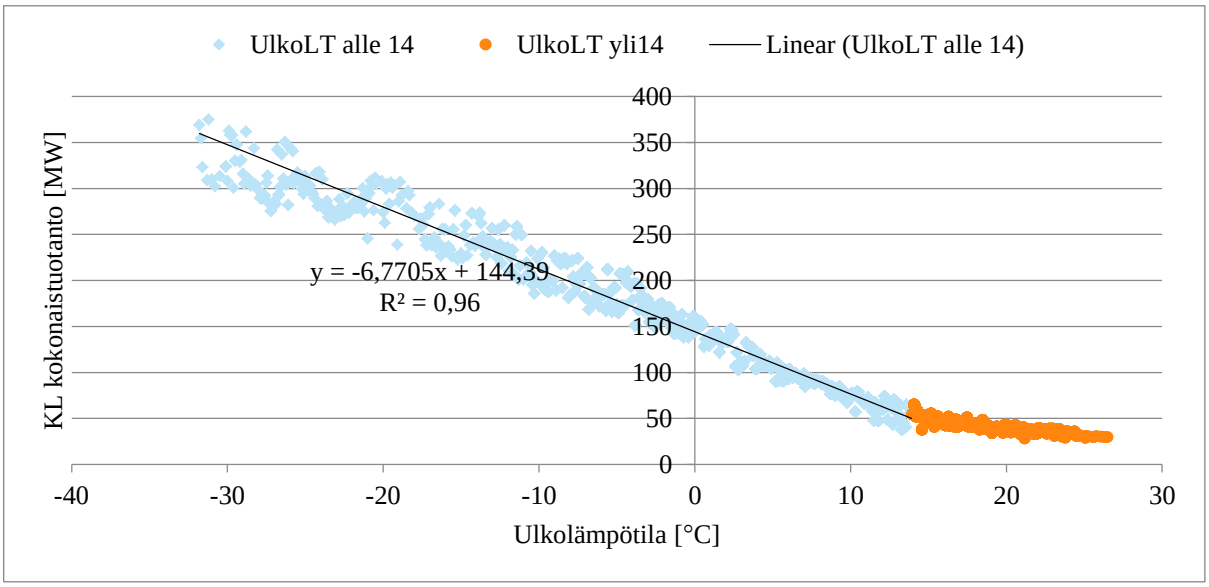
$$y_t = X_t \cdot \beta + \beta_{x(t)} + \varepsilon_t \quad (6)$$

Kaukolämmön tuotantoennuste määritetään tässä työssä neljällä eri regressiomallilla, sekä yhdellä liukuvaan keskiarvoon perustuvalla mallilla, joiden selittävinä tekijöinä ovat.

- y_{lt} Ulkolämpötila
- y_{48h} Ulkolämpötila sekä 48 tunnin arki/viikonloppu tuntirytmi
- y_{72h} Ulkolämpötila 72 tunnin arki, lauantai ja sunnuntai tuntirytmi
- y_{168h} Ulkolämpötila 168 viikkorytmi jokaiselle viikonpäivälle
- y_{t+4} Kahden edellisen tunnin kaukolämmöntuotannon liukuva keskiarvo

Kaikissa eri päivien tuntirytmien mallinnuksessa arkipyhät on oletettu sunnuntaiksi. Malleissa y_{48h}, y_{72h} ja y_{168h} rakennettiin erillinen ulkolämpötilakorjatun kulutuksen profiili datanäytteen keskiarvoihin perustuen. Yhtälössä 6 esitetty kerroin $\beta_{x(t)}$ kuvaa jokaiselle tunnille määritettyä kerrointa. Regressioanalyysi tehtiin tässä työssä Excel taulukkolaskentaohjelman data-analytiikka työkalulla. Regressioanalyysin pohjalta määritetyt arvot perustuvat pienimmän neliösumman menetelmään, missä regressiosuoran ja havaintojen erotuksien neliön summa minimoidaan.

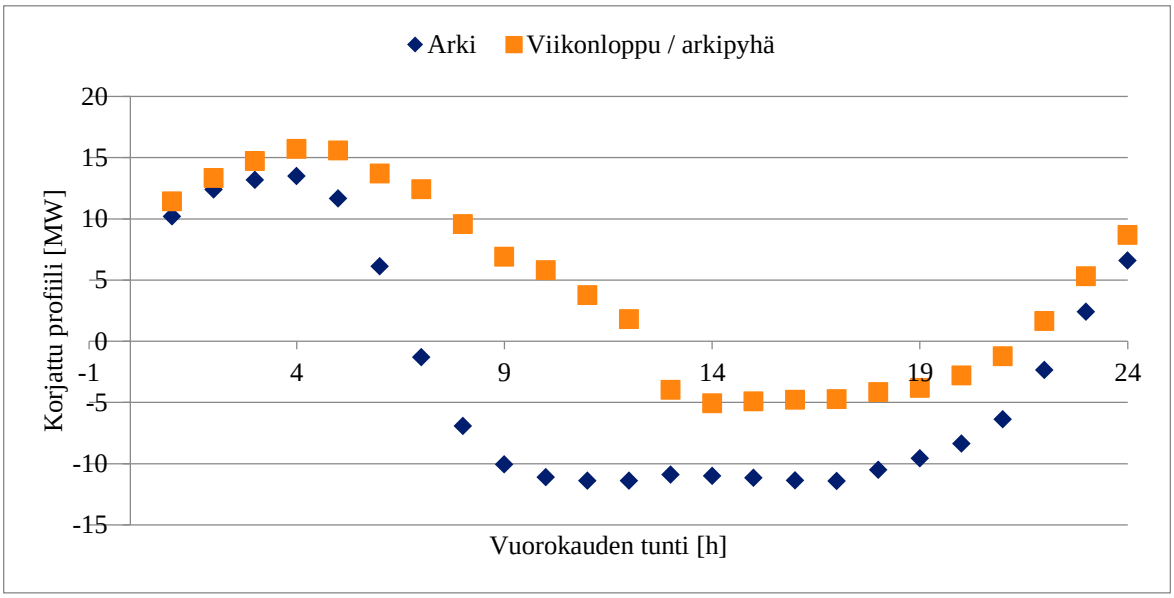
Ennustemallia käytettäessä vain menolämpötilan säätöön, ja automaattiseen verkon varaamiseen, voidaan datasta poistaa kesätunnit, jolloin kaukolämmöntuotannon ulkolämpötilariippuvuus on heikkoa. Kesäaikaan menolämpötilan säätöön ei myöskään ole tarvetta. Regressiomallissa datasta on poistettu alle 14 °C ulkolämpötilaa vastaavat tunnit. Tällä voidaan varmistaa, ettei heikosti lineaarinen data vaikuta vääristävästi regressioanalyysiin. Kuvassa 28 esitetään esimerkkiverkon D vuoden 2016 kaukolämmöntuotanto ulkolämpötilan funktiona. Alla olevassa kuvassa oranssilla merkityt pisteet kuvaavat tarkastelusta ulos jätettyjä pisteitä.



Kuva 28: Regressiosuora ulkolämpötilan ja kaukolämmöntuotannon riippuvuudesta alle 14 °C ulkolämpötiloilla.

Yllä olevassa kuvassa esitetty, alle 14 °C ulkolämpötilalla määritetty lineaarinen sovite vastaa pelkän ulkolämpötilan perusteella määritettyä yhden muuttujan lineaarista regressiomallia. Alle 14 °C ulkolämpötilalla tarkastelupisteiden lukumääräksi saatiin 6802. Kyseisistä pisteistä poistettiin kaksi erillistä noin viikon mittaista data näytettä mallien testausta varten. Mallien kalibrointi tehtiin 6519 tunnin mittausdatalla. Selityskerroin R^2 kuvaa, kuinka hyvin pelkkä kaukolämmöntuotannon vaihtelu voidaan selittää ulkolämpötilan vaihtelulla. Kuvan 28 perusteella voidaan todeta, että noin 96 % kaukolämmöntuotannon vaihtelusta pystytään selittämään pelkällä ulkolämpötilan muutoksen vaihtelulla.

Eri viikonpäivien ja kellonaikojen tuotantoprofiilin vaikutusta kaukolämmöntuotantoon ulkolämpötilan lisäksi tutkittiin kolmella eri menetelmällä. Ennustemalleissa y_{48h} arkipäiville ja viikonlopuille muodostettiin lämpötilakorjatut profiilit, jotka esitetään kuvassa 29.

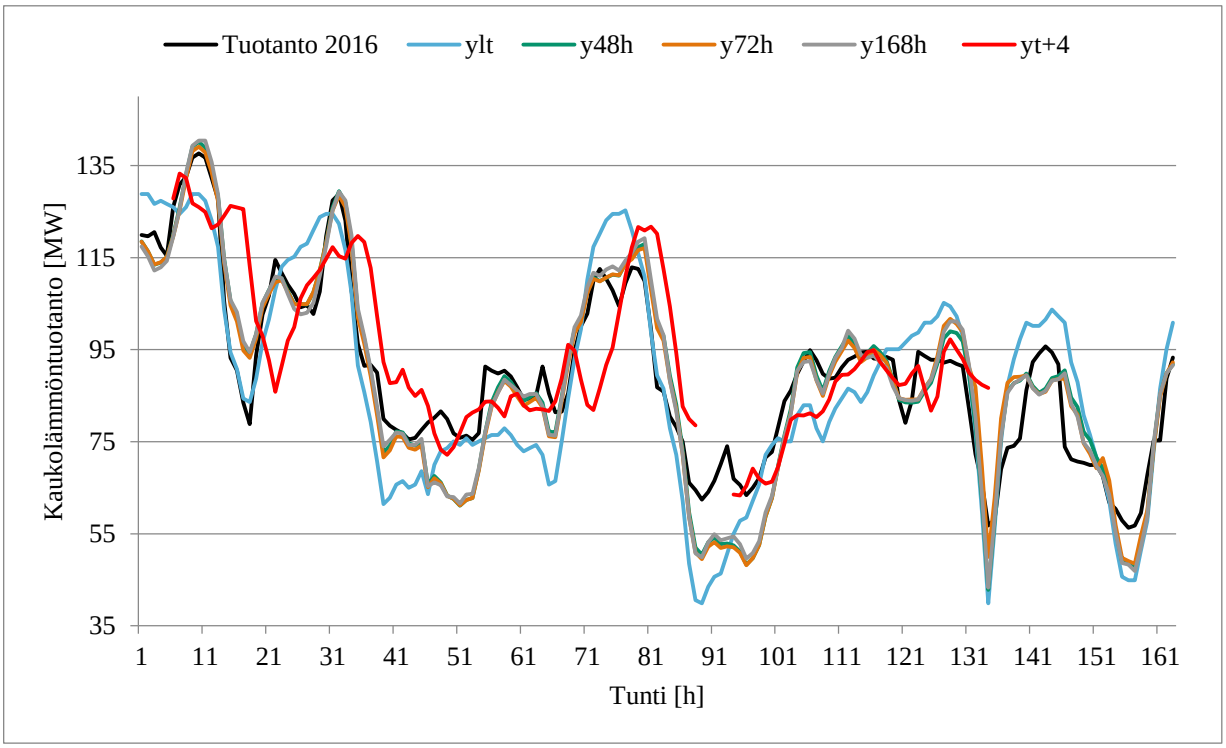


Kuva 29: Ennustemallissa y_{48h} käytetyt lämpötilakorjatut profiilit arkipäiville ja viikonlopulle.

Kuvassa 29 esitetyt käyrät määritettiin tarkastelemalla todellisen lämmöntuotannon erotusta pelkän ulkolämpötilan perusteella määritettyyn lämmöntuotantoon. Kuvan 29 perusteella voidaan todeta, että lämmöntuotanto on vuorokauden ensimmäisellä tunnilla ollut keskimäärin 10MW korkeampi, kuin pelkän ulkolämpötilariippuvuuden perusteella määritetty tuotanto. Mallissa y_{72h} tuotantoprofiili tehtiin erikseen arkipäiville, lauantaille ja sunnuntaille. Arkipyhät oletettiin mallissa sunnuntaiksi. Mallissa y_{168h} jokaiselle viikonpäivälle muodostettiin erillinen profiili. Mallissa y_{t+4} hyödynnettiin jokaiselle viikonpäivän tunnille määritettyä suhteellista muutosnopeutta. Muutosnopeus määritettiin perustuen muutokseen edellisen kahden tunnin liukuvaan keskiarvoon. Tällä pyrittiin tasoittamaan yksittäisten tuntien välistä heiluntaa. Malli kalibroitiin niin, että se ennustaa kaukolämmöntuotantoa 4 tunnin päähän.

Ennustemalleja vertailtiin ennustamalla kaukolämmöntuotantoa kahdella eri testiajanjaksolla, jotka eivät olleet mukana ennustemallien kalibroinnissa. Testijakso 1 perustuu esimerkkiverkon D huhtikuun lopun kaukolämmöntuotannon tuntimittauksiin noin viikon ajalta. Testijakso 2 on viiden päivän ajanjakso Joulukuun 2016 lopusta. testijaksot eivät sisällä tunteja jolloin ulkolämpötila on ollut yli 14°C.

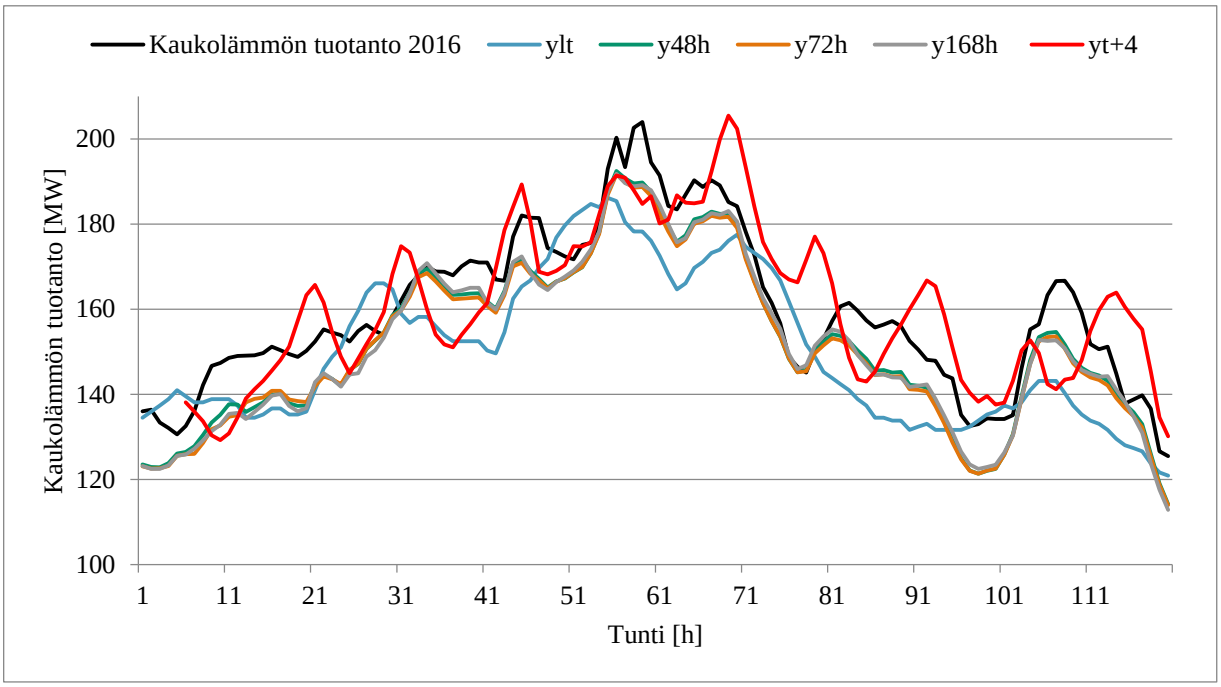
Kuvassa 30 esitetään ennustemallien perusteella määritetyt kaukolämmöntuotantoennusteet ja toteutunut tuotanto testijaksolla 1. Testijakson 1 aikana ulkolämpötila liikkuu 1,3°C…13,7°C välillä.



Kuva 30: Testijakson 1 toteutunut kaukolämmöntuotanto ja ennustemallien avulla määritetty kokonaistuotanto.

Ennustemallissa y_{t+4} testipisteiden määrää on pienempi kuin muissa malleissa, koska mallissa hyödynnetään aina kahden edellisen tunnin toteutunutta kaukolämmöntuotantoa. Muissa malleissa edellisten tuntien tuotantoa ei huomioida.

Ennustemallien mukaan määritetty kaukolämmön tuotantoennuste sekä toteutunut tuotanto testijaksolla 2 esitetään kuvassa 31. Testijaksolla 2 ulkolämpötila liikkuu -6,7°C…2,4°C välillä.



Kuva 31: Testijakson 2 toteutunut kaukolämmöntuotanto sekä ennustemallien avulla määritetty kokonaistuotanto.

Kuvien 30 ja 31 perusteella voidaan todeta vuorokausiprofiilit huomioivien mallien olevan hyvin lähellä toisiaan. Pelkän ulkolämpötilaan perustuva ennuste mukailee todellista tuotantoa pidemmällä ajanjaksolla, mutta se ei reagoi nopeisiin kuorman muutoksiin. Pelkään edellisen kahden tunnin kaukolämmöntuotannon liukuvaan keskiarvoon perustuva malli ennustaa tuotantoa melko hyvällä tarkkuudella, ottaen huomioon ettei mallissa käytetä ulkolämpötilaennustetta.

Taulukossa 15 esitetään regressiomallien korjatut selityskertoimet koko datanäytteen osalta. Selityskertoimella voidaan kuvata kuinka suuren osan selitettävän suureen vaihtelusta voidaan selittää käytettyjen muuttujien avulla.

Taulukko 15: Ennustemallien korjatut selityskertoimet.

Malli	y_{lt}	y_{48h}	y_{72h}	y_{168h}
R^2 **(korjattu)**	0,9553	0,9756	0,9751	0,9759

Taulukon 15 perustella voidaan todeta, että ennustemalli y_{168h} selittää noin 97,6 % kaukolämmöntuotannon vaihtelusta. Kyseisessä mallissa selittävinä tekijöinä ovat

ulkolämpötilan lisäksi jokaiselle viikonpäivälle tehdyt vuorokausiprofiilit. Arki – ja viikonloppuprofiileihin jaetun mallin y_{48h} selityskerroin on yllättävästi korkeampi kuin lauantai- ja sunnuntaiprofiilit huomioiva malli y_{72h}. Tämä voi johtua siitä, että kaikki arkipyhät oletettiin malleissa sunnuntaiksi, vaikka ne voivat kauppojen aukiolosta riippuen vastata myös lauantain profiilia.

Ennustemallien tarkkuutta testijaksoilla arvioitiin keskivirheen ME:n (*eng. mean error*) ja suhteellinen keskivirhe MAPE:n (*eng. mean absolute precentage error*) avulla. Keskivirhe ja suhteellinen keskivirhe laskettiin yhtälöiden 7 ha 8 mukaisesti.

$$\mathrm{ME} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^{N} |\hat{y}_i - y_i| \tag{7}$$

$$\mathrm{MAPE} = \left[\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^{N} \left(\frac{|\hat{y}_i - y_i|}{y_i}\right)\right] \cdot 100\ \% \tag{8}$$

Edellä määriteltyjen yhtälöiden avulla ennustemalleille laskettiin ME ja MAPE arvot molemmilla testijaksoilla. ME ja MAPE-arvot esitetään taulukossa 16.

Taulukko 16: Ennustemallien keskivirhe ja suhteellinen keskivirhe testijaksoilla.

Testijakso 1	**ME**	**MAPE**
$y_{\mathbf{lt}}$	9,07	10,83 %
$y_{\mathbf{48h}}$	6,09	7,63 %
y_{72h}	6,18	7,76 %
y_{168h}	6,25	7,74 %
y_{t+4}	8,95	10,24 %
Testijakso 2		
$y_{\mathbf{lt}}$	12,09	7,48 %
$y_{\mathbf{48h}}$	7,64	4,90 %
y_{72h}	8,20	5,24 %
y_{168h}	7,87	5,05 %
y_{t+4}	9,83	6,22 %

Taulukon 16 perusteella voidaan todeta, että jokaisen viikonpäivän tuotantoprofiilin huomioiva y_{168h} ennustemalli oli molemmilla testijaksoilla tarkin. Kaikki työssä testatuista

ennustemalleista olivat suhteellisesti tarkempia keskimääräiseltä ulkolämpötilalta matalammalla testijaksolla 2. Tämä johtuu matalamman ulkolämpötilan myötä kasvavasta ulkolämpötila riippuvuudesta.

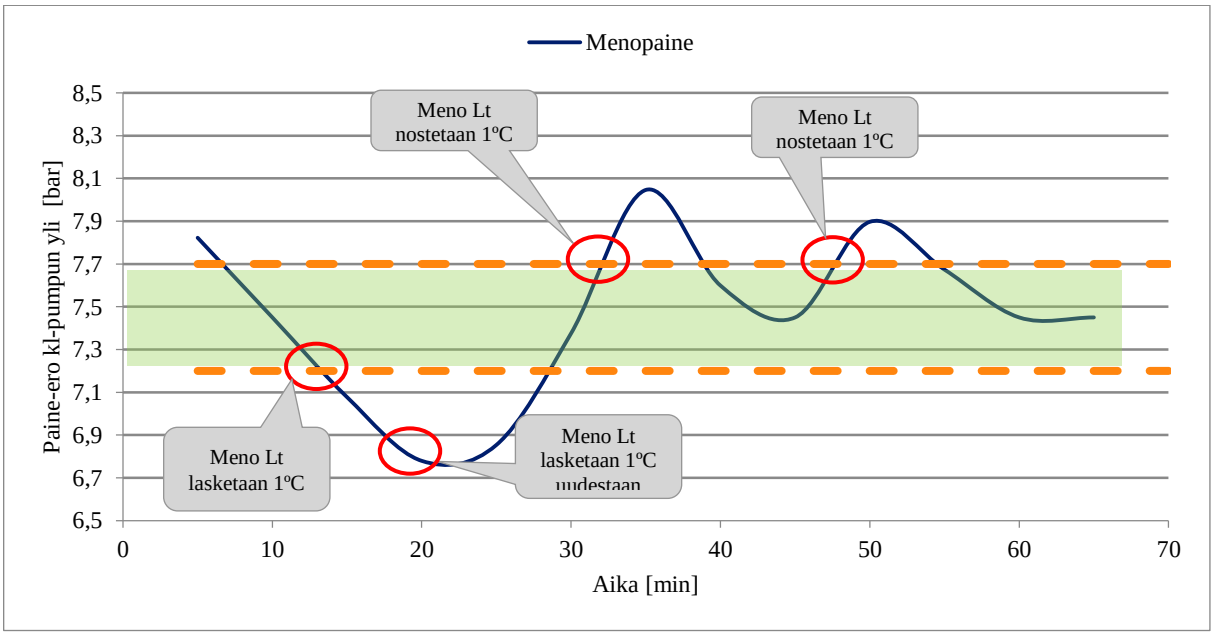
Taulukossa 16 esitettyjen arvojen perusteella voidaan myös todeta, että tässä työssä testatuista ennustemalleista tarkinta y_{168h}, voidaan käyttää menolämpötilan ennakoivaan säätöön, sillä ulkolämpötilaan perustunut menolämpötilan säätö vastaa huonommin verkon todellista tilaa. Huomattavaa on myös, että kahden edellisen tunnin kaukolämmöntuotantoa käyttävä malli oli molemmilla testijaksoilla pelkkään ulkolämpötilaan pohjautuvaa mallia tarkempi. Tämän lisäksi ulkolämpötilaennustetta hyödyntävässä mallissa virhe tulee todellisuudessa kasvamaan johtuen ulkolämpötilaennusteen epätarkkuudesta. Etuna y_{t+4} mallissa on myös sen yksinkertainen toteuttamismahdollisuus. Muiden ennustemallien tapaan se ei vaadi sääennustetietoa menolämpötilan säädön pohjaksi.

5.4 Kelluva menolämpötilan säätö

Menolämpötilan säätö voidaan toteuttaa myös kelluvan säätötapaan perustuen. Kelluva menolämpötilan säätö perustuu kaukolämpöverkon pumppaukselle asetettuihin raja-arvoihin, joiden perusteella menolämpötilaa säädetään. Kelluvassa säädössä kaukolämpöveden virtaus pyritään maksimoimaan jokaisessa tilanteessa menolämpötilaa säätämällä. Kelluvaa menolämpötilan säätöä on testattu menolämpötilatyöryhmän tekemän selvityksen yhteydessä, 9.3–18.4.1978 Lahden kaupungin sähkölaitokselle tehdyissä koeajoissa. Testiajoissa saavutettiin noin 4°C aikaista käytäntöä alhaisempi menolämpötila. Kuluttajille tulevan veden lämpötila ei kokeen aikana alittanut minimilämpötilakäyrää verkon laita-alueillakaan. (Menolämpötilatyöryhmä 1978, 1–5) Kelluvan menolämpötilan säätö sopii kaukolämpöverkoille, joissa menolämpötilan optimi on alhaisin mahdollinen, eikä menolämpötilan optimia ole tarvetta määrittää jatkuvasti.

Kelluvassa menolämpötilan säädössä kaukolämpöpumpun säätö perustuu normaaliin tapaan paine-ero säätöön, missä pumppauksen kierrosnopeutta tai kuristusventtiilin asentoa säädetään kriittisen asiakkaan paine-eron mukaan. Optimaalinen kriittisen asiakkaan paine-eron tavoitearvo on 0,6 bar, joka vastaa asiakaslaitteiston paine-eron minimiä. Korkeampi paine-eron asetusarvo nostaa pumppauskustannuksia.

Kelluvassa säätötavassa menolämpötilan säätö tapahtuu kaukolämpöpumpun nostokorkeudelle asetettujen raja-arvojen perusteella. Nostokorkeuden ylittäessä sille asetettu maksimiarvo menolämpötilaa nostetaan. Nostamalla menolämpötilaa, kaukolämmön vesivirta pienenee yhtälön 1 mukaisesti. Kaukolämpöpumpun nostokorkeuden saavuttaessa sille asetettu alaraja menolämpötilaa lasketaan, kunnes nostokorkeus saadaan halutulle alueelle. Kelluvan menolämpötilan säädön periaate yksinkertaistettu esitetään kuvassa 32.



Kuva 32: Periaatekuva kelluvasta menolämpötilan säädöstä.

Kuten kuvasta huomataan, menolämpötilan säätö tapahtuu niin, että kaukolämpöpumpun nostokorkeus pysyy halutulla alueella. Pumpun hetkellisen nostokorkeuden heilahdellessa nopeasti, voidaan menolämpötilan säädölle määrittää viive jolla säätöä tehdään. Säätimen ollessa liian nopea menolämpötila voi vaihdella liian voimakkaasti. Liian hidas säätö voi johtaa tilanteeseen, missä menolämpötilan säätö ei hitaudesta johtuen säädä pumppauksen nostokorkeutta halutulla tavalla.

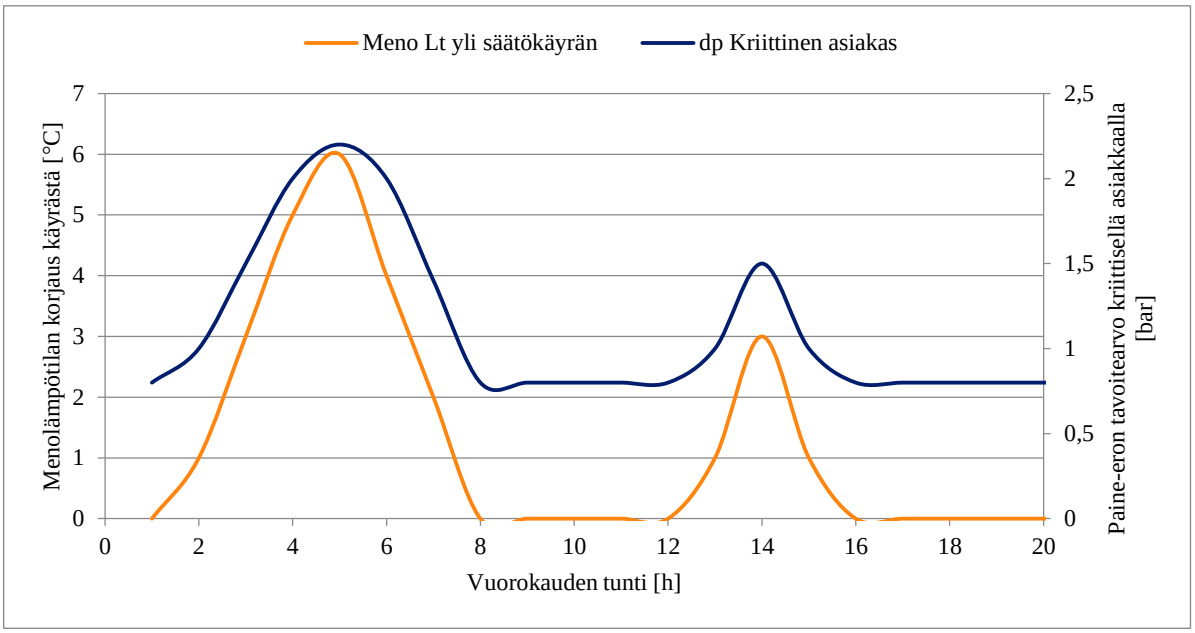
Pumpun nostokorkeuden maksimiraja tulee määrittää niin, että nostokorkeudelle jätetään reservi, jolla asiakkaiden paine-ero saadaan pidettyä tavoitearvossa, ennen menolämpötilan noston vaikutuksia. Pumpun nostokorkeuden alaraja tulee määrittää niin, että kaukolämpöveden virtaus pyritään pitämään mahdollisimman suurena, menolämpötilan alaraja

kaukolämpöasiakkailla huomioiden. Menolämpötilan vaihtelun maksimi ja minimirajan määritetään menolämpötilan rajoitussäätimillä.

Pumppauksen rajojen määritys sekä menolämpötilan säädön viive saadaan parhaiten selville verkkokohtaisilla koeajoilla. Rajojen määrityksessä voidaan käyttää pohjana verkolle määritettyä putkistokäyrä, jonka avulla voidaan arvioida kaukolämpöpumpulta tarvittava nostokorkeus eri virtauksilla. Virtaukset voidaan arvioida perustuen lämmöntuotannon ja paluulämpötilojen mittausdataan. Menolämpötilan säätimen viritys on kuitenkin tehtävä kokeellisesti.

Mikäli kaukolämmön pumppaus toteutetaan peruskuormalaitoksen ja välipumppaamon avulla, säädetään menolämpötilaa perustuen säätävän pumpun raja-arvoihin. Peruskuormalaitoksen pumppauksen ollessa maksimilla, menolämpötilaa ei pumppujen mitoituksesta riippuen ole välttämättä taloudellista säätää maksimiin. Tällöin peruskuormalaitoksen kaukolämpöpumpun ollessa maksimilla, tehdään menolämpötila säätö välipumppaamolle asetettujen raja-arvojen perusteella. Tässä tilanteessa myös välipuupumppaamon pumpulle tulee määrittää raja-arvot, joiden perusteella menolämpötilaa säädetään.

Kaukolämpöverkon varaaminen voidaan toteuttaa kelluvassa menolämpötilan säädössä toteuttaa muodostamalla käyrä latvapisteen asiakkaan paine-eron pyyntiarvolle. Paine-eron pyyntiarvoa nostetaan yöllä muutama tunnin ennen arvioitua kulutushuippu. Tällöin kaukolämpöpumppu lähtee nostamaan paine-eroa yli maksimirajan, minkä seurauksena menolämpötilan säätö nostaa menolämpötilaa kunnes pumpun nostokorkeus palaa halutulle alueelle. Kuvassa 33 esitetään havainnollistava kuva kaukolämpöverkon varauksen toteutuksesta kriittisen asiakkaan paine-erolle määritetyn käyrän avulla.



Kuva 33: Periaatekuva kaukolämpöverkon varaamisesta kelluvan menolämpötilan säädössä.

Kuvassa 33 sininen viiva kuvaa kriittisen asiakkaan paine-eron tavoitearvoa, jota kaukolämpöpumppu säätää. Oranssilla viivalla kuvataan kuinka menolämpötila nousee aikaisemmasta paine-eron tavoitearvoon perustuvasta arvosta. Kyseinen säätökäyrä voidaan viedä suoraan automaatiojärjestelmään, jolloin paine-eron asetusta ei tarvitse säätää operaattorin toimesta.

Kelluvan menolämpötilan säädön etuna on se, että sen avulla voidaan välttää turhan korkeat menolämpötilat missä pumppaus ei rajoita menolämpötilan laskua. Toisaalta menolämpötilan säätö tapahtuu aina hieman myöhässä, johtuen verkolle ominaisesta hitaudesta. Viiveeseen voidaan reagoida laskemalla pumpun nostokorkeuden maksiarvo tarpeeksi alhaiseksi niin, että kriittisen asiakkaan paine-eroa saadaan pidettyä yllä lisäämällä pumppausta ennen nostetun menolämpötilan vaikutusten näkymistä. Kelluva menolämpötilan säätö sopia parhaiten kaukolämpöverkoille, missä menolämpötilan optimi on matalin mahdollinen. Kelluvan menolämpötilan säätö voidaan toteuttaa seuraavien periaatteiden mukaisesti.

1. Riittävä menolämpötila ja paine-ero on varmistettava kauimmaisellakin asiakkaalla
    - Käyttöveden lämpötila minimissään 55 °C
    - Ilmanvaihto- ja lämmityspattereiden mitoituslämpötilakäyrät
    - Paine-ero asiakaslaitteiston yli minimissään 0,6 bar

2. Verkoston maksimilämpötila ja paine-ero
    - Kaukolämpöveden maksimilämpötila tyypillisesi 120 °C
    - Kaukolämpöverkon menopaine maksimissaan 16 bar
        i. Tyypillisesti KL-pumpun nostokorkeus rajoitta ennen verkoston maksimipainetta
    - Paine-ero asiakkaan lämmönjakokeskuksen yli maksimissaan 5 bar
3. Menolämpötila ei rajoita lämmönsiirtoa halvimmalta tuotantoyksiköltä
4. Menolämpötilaa säädetään pumppaukselle asetetun paine-eron minimi ja maksimiarvon mukaan
    - Maksimiarvo määritetään niin, että pumpun nostokorkeudelle jätetään reservi
    - Menolämpötilan säädön ja säätimen viritys tulee tehdä kokeellisesti
5. Pumppauksen kriittisen asiakkaan paine-ero säätö vain yhdellä pumpulla kerrallaan
6. Kaukolämpöverkon varaaminen voidaan toteuttaa muodostamalla kriittisen asiakkaan paine-erolle käyrä

6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Menolämpötila vaikuttaa kaukolämpöjärjestelmän toimintaan sekä tehokkuuteen olennaisesti. Tässä työssä menolämpötilan vaikutusta kaukolämpöjärjestelmässä tutkittiin neljän eri komponentin osalta. Tutkitut komponentit olivat pumppauksen sähkönkäyttö, verkoston lämpöhäviöt, savukaasupesurin LTO-teho sekä vastapainesähköntuotanto. Menolämpötilan muutosten vaikutuksia on syytä tutkia 3–10 eri kuormatilanteessa määrittämällä eri komponenttien kustannusvaikutukset eri menolämpötiloilla. Kyseisen pisteen kokonaiskustannusten minimi vastaa optimimenolämpötilaa. Menolämpötilan muutosten vaikutusten arviointi voidaan tehdä joko verkotonmallinnuksen tai tuntimittausdatan perusteella. Mikäli verkostomallia ei ole saatavilla voidaan laskennassa hyödyntää tuntimittauksiin perustuvaa putkistokäyrää sekä energiateollisuuden julkaisemaa kaukolämpöjohtojen eristepaksuuden optimoinnin laskentatyökalua.

Huomioimalla pumppauksen häviöiden lämmittävä vaikutus pumpattavaan nesteeseen ovat menolämpötilan laskun myötä kasvavat pumppauskustannukset tyypillisesti pienemmät verrattuna lämpöhäviöistä saatuihin säästöihin. Pumppauksen maksimointi eli menolämpötilan lasku on tällöin kannattavaa. Etenkin kaukolämpöverkoilla, missä pumppaus tapahtuu suurelta osin CHP-laitoksen omakäyttösähköllä, on menolämpötilan optimi tyypillisesti matalin mahdollinen. Talviaikana menolämpötilan lasku on tyypillisesti kannattavaa tilanteissa missä kaukolämpövirtaus rajoittaa savukaasupesurin LTO-tehoa. Savukaasupesurin LTO-tehon rajoituksen kustannusvaikutukset ovat tyypillisesti lämpöhäviöiden ja pumppaussähkön käytön kustannusvaikutuksia huomattavasti suuremmat. Menolämpötilan nousun myötä heikkenevän vastapainesähköntuotannon rakennusasteen kustannusvaikutukset eivät olleet merkittäviä. Menolämpötilan laskun ei ole toisaalta ole kannattavaa, jos se rajoittaa halvimman tuotantoyksikön tuotantoa. Esimerkkiverkoille tehdyn menolämpötilan optimointilaskennan perusteella, esimerkkiverkoissa voidaan menolämpötilan säädön optimoinnilla saavuttaa noin 0,1–0,21 €/MWh_{kl} säästöt tuotettua kaukolämpöenergiaa kohden.

Kaukolämmön menoveden lämpötilan optimoinnin perustella on mahdollista johtaa uusi menoveden lämpötilan säätösuositus. Menoveden säätö voidaan toteuttaa kaukolämmön tuotannon funktiona, joko staattiseen käyrään tai jatkuvaan laskentaan perustuen. Staattisessa mallissa menolämpötilan säätö tapahtuu menolämpötilan ja kaukolämmöntuotannon välisen

optimoinnilla määritetyn käyrän perusteella. Kaukolämmön tuotannon käyttäminen ulkolämpötilan sijasta vasta paremmin verkon todellista tilaa, johtaen tehokkaampaan säätöön. Toisaalta optimi menolämpötilaa voidaan laskea jatkuvasti perustuen hetkelliseen kaukolämmöntuotantoon sekä paluulämpötilaan. Tällöin menolämpötilan säätö laskee kustannusoptimin putkistokäyrän ja lämpöhäviötehoille määritetyn käyrän perusteella. Molemmat edellä mainitut säätömenetelmä voidaan yhdistää tuotantoennusteeseen, jolloin menolämpötilaa säädetään tulevaisuuden kaukolämpökuorman mukaan. Ennusteen aikajänne riippuu siitä kuinka kauan kaukolämpöveden siirtyminen tuotantolaitokselta kaupunkiin kestää. Tällöin verkon varaaminen tapahtuu automaattisesti, muutama tunti ennen kulutushuippua. Dynaamiseen säätöön on helposti yhdistettävissä myös muiden parametrien kuten sähkön reaaliaikaisen hintatiedon yhdistäminen.

Kaukolämmön tuotantoennustemalli voidaan yksinkertaisesti luoda historiadataan perustuen. Ulkolämpötilan ja eri vuorokausien välisen profiilin huomioon ottamalla mallilla voidaan ennustaa kaukolämmöntuotantoa 5,1–7,5 % tarkkuudella olettaen ulkolämpötilaennuste oikeaksi. Lyhyen aikajänteen ennuste voidaan toteuttaa kohtuullisella tarkkuudella pelkän kahden edellisen tunnin kaukolämmöntuotannon liukuvan keskiarvon ja vuorokausiprofiilien avulla. Pelkään edellisten tuntien liukuvaa keskiarvoa hyödyntävällä mallilla kaukolämmön tuotanto voidaan ennustaa noin 6,2–10,4 % tarkkuudella.

Yksinkertaisissa verkoissa menolämpötilan säätö voidaan toteuttaa myös niin sanotulla kelluvalla menolämpötilan säädöllä, missä menolämpötilaa säädetään kaukolämpöpumpun nostokorkeudelle asetettujen raja-arvojen mukaisesti. Kyseinen säätötapa sopii erityisesti yksinkertaisiin kaukolämpöverkkoihin, missä kaukolämpöveden optimi menolämpötila on yleensä alhaisin käytettävissä oleva menolämpötila.

Tässä työssä menolämpötilan optimointi laskennassa ei otettu huomioon menolämpötilan muutoksen vaikutuksia kaukolämpöverkon menopuolelle kytketyn lämpöpumpun hyötysuhteeseen; korkeampi menolämpötila heikentää lämpöpumpun hyötysuhdetta. Kyseinen kustannusvaikutus tulisi huomioida menolämpötilan optimointi laskentaa tehtäessä. Lisäksi työssä tehty laskenta pohjautui vakio sähkön hintaan, joka voi todellisuudessa vaihdella voimakkaasti muuttaen menolämpötilan optimia. Tämän työn pohjalta jatkotutkimusta voisi tehdä koeajoilla verkossa, jossa menolämpötila on optimoitu tarkasteltavalle verkolle.

Koeajoilla voidaan tarkemmin kartoittaa menolämpötilan optimoinnin toimivuutta erilaisissa kaukolämpöverkoissa. Lisäksi koeajoilla olisi mahdollista tuotantoennusteeseen yhdistettyä säätöä sekä kaukolämpöverkon automaattista varaamista.

7 YHTEENVETO

Tässä työssä tutkittiin kaukolämpöveden menolämpötilan taloudellista optimointia Pöyry Finland Oy:n ja Energiateollisuus ry:n toimeksiannosta. Työn tarkoituksena oli kuvata menolämpötilan säädön vaikutuksia kaukolämpöjärjestelmässä sekä arvioida uuden menolämpötilan säätösuosituksen johtamismahdollisuuksia taloudelliseen optimiin perustuen. Lisäksi työssä arvioitiin kaukolämpöverkon automaattisen varaamisen yhdistämismahdollisuutta säätösuositukseen kaukolämmöntuotannon ennustemallin avulla. Kirjallisten lähteiden lisäksi tutkimuksessa hyödynnettiin neljän pohjoismaalaisen kaukolämpöverkon tuntimittausdataa sekä verkostomalleja.

Menolämpötilan vaikutuksia kaukolämpöjärjestelmässä tutkittiin verkoston lämpöhäviöiden, pumppauksen sähkönkäytön, vastapainesähköntuotannon sekä savukaasupesurin lämmöntalteenoton osalta. Menolämpötilan taloudellinen optimointi toteutettiin kyseisten komponenttien osalta kolmelle esimerkkiverkolle verkostomallinnuksella sekä tuotannon mallinnukseen laskentamallilla. Tyypillisesti suurimmat kustannusvaikutukset olivat verkoston lämpöhäviöillä, jolloin menolämpötilan taloudellinen optimi asettui matalimpaan käytettävissä olevaan menolämpötilaan, jota mallinnetussa verkostossa oli mahdollista käyttää. Esimerkkiverkoille tehtyjen laskelmien perusteella menolämpötilan optimoinnilla voidaan saavuttaa noin 0,1–0,21 €/MWh_{kl} keskimääräiset säästöt tuotettua kaukolämpöenergiaa kohden.

Menolämpötilan optimiin perustuva säätö on mahdollista toteuttaa optimoimalla menolämpötilaa jatkuvalla laskennalla kaukolämmöntuotantoon ja paluulämpötilaan perustuen tai muodostamalla menolämpötilan optimikäyrä kaukolämmön tuotannon funktiona. Edellä mainitut säätömenetelmät voidaan myös yhdistää kaukolämmön tuotantoennusteeseen, jolloin menolämpötilaa säädetään tulevaisuuden kaukolämmöntuotannon ja paluulämpötilan mukaisesti. Tällöin myös kaukolämpöverkon varaaminen tapahtuu automaattisesti. Menolämpötilan optimiin perustuva säätö voidaan toteuttaa myös kelluvalla menolämpötilan säädöllä, missä menolämpötilaa säädetään kaukolämpöpumpun nostokorkeudella asetettujen raja-arvojen perusteella. Kyseinen säätötapa sopii etenkin pieniin kaukolämpöverkkoihin, missä menolämpötilan optimi on matala.

LÄHTEET

Bolonina, A. – Bolonins, G. – Blumberga D. 2014. Environmental and Climate Technologies. Analysis of the Impact of Decreasing District Heating Supply Temperature on Combined Heat and Power Plant Operation. Riga Technical University. Vol. 1 s. 41–45.

Condens Heat Recovery Oy, 2017. Laskuri savukaasupesurin lämmöntalteenottotehon arvioimiseksi. [Verkkosivu] [Viitattu 5.3.2018] Saatavilla: http://www.condens.fi/fin/laskenta.htm

Energiateollisuus 2006. Kaukolämmön käsikirja. Helsinki. Energiateollisuus ry. 566 s. ISBN 952-5615-08-1

Energiateollisuus 2011. Kaukolämmön pumppausjärjestelyt – Suositus L10/2011. Helsinki. Energiateollisuus ry. s.14.

Energiateollisuus 2014. Rakennusten kaukolämmitys – Määräykset ja ohjeet – Julkaisu K1/2013. Helsinki. Energiateollisuus ry. 106 s. ISBN 978-952-5615-42-5

Energiateollisuus 2017a. Kaukolämpötilasto 2016. Helsinki. Energiateollisuus ry. 71 s. ISSN 0786-4809

Energiateollisuus 2017b. Energiavuosi 2016 – Kaukolämpö. [Verkkojulkaisu] [Viitattu 4.1.2017] Saatavilla: https://energia.fi/ajankohtaista_ja_materiaalipankki/materiaalipankki/kaukolampo_2016_graafeina.html#material-view

Energiateollisuus 2018. Materiaalipankki – Kaukolämpöjohtojen eristyspaksuuden optimointityökalut. [Verkkosivu] [Viitattu 26.7.2018] Saatavilla: https://energia.fi/ajankohtaista_ja_materiaalipankki/materiaalipankki/kaukolampojohtojen_eristyspaksuuden_optimointityokalut.html

Fang, T. – Lahdelma, R. 2016. Evaluation of a multiple linear regression model and SARIMA model in forecasting heat demand for district heating system. Espoo, Aalto University. Vol 179. s.544–552.

Gadd, H.–Werner, S. 2014. Applied Energy. Achieving low return temperatures from district heating substations. Halmstad, School of Business and Engineering. Vol. 136. s. 59–67.

Gülich, J. 2010. Centrifugal Pumps. 2nd Edition. Berlin. Springer. s.956. ISBN 978-3-642-12823-3

Jalovaara, J. – Aho, J. – Hietamäki, E. – Hyytilä, H. 2003. Paras käytettävissä oleva tekniikka (BAT) 5–50 MW:n polttolaitoksissa Suomessa. Suomen Ympäristö 649. Helsinki. Suomen ympäristökeskus. 126 s. ISBN 952-11-1488-6

Laakkonen, L – Korpela, T. – Kaivosoja, J. – Vilkko, M. – Majanne, Y. – Nurmoranta, M. Energy procedia. Predective Supply Temperature Optimization of District Heating Networks Using Delay Distributions. Tampere, Tampere University of Technology. Vol. 116, s.297–309

Menolämpötilatyöryhmä 1978. Kaukolämmön menolämpötilan säätösuositus – Suositus 1/78.

Mäkelä, V–M. – Tuunanen, J. 2015. Suomalainen Kaukolämmitys. Mikkeli. Mikkelin Ammattikorkeakoulu. 159 s. ISBN 97851-588-506-7

Nummila, J. – Järvenreuna, J. 2015. Nykyaikainen savukaasupesuri. Caligo Industria Oy. 4s. [Verkkojulkaisu] [Viitattu 24.1.2018] Saatavilla: https://core.ac.uk/download/pdf/81235941.pdf

Pöyry Finland Oy 2010. Kaukolämpöjärjestelmän paluuveden hyväksikäyttö kiinteistöjen lämmityksessä. Viite: 60N50162.01-E0001. [Verkkojulkaisu] [Viitattu 12.7.2018] Saatavilla: https://docplayer.fi/1158112-Energiateollisuus-ry.html

Pöyry Finland Oy 2018. Tuntimittausdata kaukolämpöyhtiöiltä.

Saarinen, L 2008. Modelling and control of a district heating system. Uppsala Universitet. [Verkkojulkaisu] [Viitattu 8.8.2018] Saatavilla: http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:461661/FULLTEXT01.pdf

Tilastokeskus 2018a. Energian hinnat. 3. Vuosineljännes 2017, Liitekuvio 3. Voimalaitospolttoaineiden hinnat. [Verkkojulkaisu] Helsinki: Tilastokeskus [viitattu 22.1.2018] Saatavilla: https://www.stat.fi/til/ehi/2017/03/ehi_2017_03_2017-12-07_kuv_005_fi.html

Tilastokeskus 2018a. Energian hinnat. 3. Vuosineljännes 2017, Liitekuvio 5. Sähkönhinta kuluttajatyypeittäin. [Verkkojulkaisu] Helsinki: Tilastokeskus [viitattu 22.1.2018] Saatavilla: https://www.stat.fi/til/ehi/2017/03/ehi_2017_03_2017-12-07_kuv_005_fi.html

Tilastokeskus 2017. Energia 2016 – Taulukkopalvelu. [Verkkosivu] [Viitattu 4.1.2018.] Saatavilla: http://pxhopea2.stat.fi/sahkoiset_julkaisut/energia2016/html/suom0006.htm

Wang, H. – Meng, H, Zhu, T. 2017. Energy Conversion and Management. New model for onsite heat loss state estimation of general district heating network with hourly measurements. Sahghai, Tongi University. Vol 157. s. 71–85.