



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU  
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Tomi Katila

KAUHAVAN  
KAUKOLÄMPÖLAITOKSEN  
MENOVEDEN LÄMPÖTILAKÄYRÄN  
OPTIMOINTI

Tekniikka  
2018

## TIIVISTELMÄ

Tekijä	Tomi Katila
Opinnäytetyön nimi	Kauhavan kaukolämpölaitoksen menoveden lämpötilakäyrän optimointi
Vuosi	2018
Kieli	suomi
Sivumäärä	55
Ohjaaja	Jukka Hautala

---

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli muodostaa Kauhavan kaukolämpölaitokselle verkon hyötysuhteen kannalta parempi menoveden lämpötilakäyrä. Menoveden lämpötilakäyrä määrää kaukolämpöverkkoon syötettävän veden lämpötilan vallitsevan ulkolämpötilan mukaan.

Kaukolämpöverkkoon menevän veden lämpötila vaikuttaa verkon hyötysuhteeseen. Vähentämällä menoveden lämpötilasta aiheutuvia jäähtymiä ja lämpöhäviöitä verkon hyötysuhde nousee. Tässä työssä pyrittiin selvittämään erilaisia menoveden lämpötilakäyriä kokeilemalla, millaisilla menoveden lämpötiloilla verkossa saavutetaan korkeimmat verkon hyötysuhteet asiakkaiden lämpötehon tarve huomioiden. Havaintojen perusteella muodostettiin optimaalinen menoveden lämpötilakäyrä, jonka testituloksista arvioitiin taloudellisia hyötyjä. Päätelmiä varten tässä opinnäytetyössä kerättiin verkosta mittava määrä lukemia alkuperäisen lämpötilakäyrän käytön ajalta sekä testattavien lämpötilakäyrien ajalta.

Lyhyen testijakson aikana optimikäyrällä saavutettiin parempi verkon hyötysuhde kuin alkuperäisen käyrän käytön aikana vastaavissa ulkolämpötiloissa. Taloudellisuuslaskelmat osoittivat, että optimikäyrän kustannussäästöt voivat nousta kymmeneen tuhansiin euroihin, mikäli verkon hyötysuhde toteutuisi vuositasolla. Todelliset säästöt nähdään kuitenkin vasta pidemmän ajan kuluttua.

## ABSTRACT

Author	Tomi Katila
Title	Optimization of the Supply Water Temperature Curve for the Kauhava District Heating Plant
Year	2018
Language	Finnish
Pages	55
Name of Supervisor	Jukka Hautala

---

The purpose of this thesis was to create a better supply water temperature curve for the Kauhava district heating plant. The supply water temperature curve determines the temperature of the water to be supplied to the district heating network according to the prevailing outdoor temperature.

The temperature of the supply water entering the district heating network affects the efficiency of the network. By reducing heat losses caused by the temperature of supply water the efficiency of the network increases. The aim of this thesis was to find out the best supply water temperatures for network efficiency by experimenting with different supply water temperature curves and by taking the customer's need of thermal power into consideration. Based on the observations, an optimal supply temperature curve was formed, whose economic benefits were estimated from the test results. To create conclusions, a large number of readings were collected from the network over the use of the original temperature curve and the temperature curves tested.

During the short test period, the optimal curve achieved a better network efficiency than the original curve at the corresponding outdoor temperatures. Economic calculations showed that the cost savings of the optimal curve could rise to tens of thousands of euros if the efficiency of the network would be achieved annually. However, real savings will only be seen after a long time.

---

Keywords	District heat, supply water temperature curve, efficiency of the network and temperature curve optimization
----------	---

# SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

1	JOHDANTO.....	8
2	KAUKOLÄMPÖ SUOMESSA .....	10
	2.1 Historia.....	10
	2.2 Nykytila.....	10
3	KAUKOLÄMMÖN TUOTANTO.....	13
	3.1 Jakelun toimintaperiaate .....	13
	3.2 Sähkön ja lämmön yhteistuotanto.....	14
	3.3 Erillistuotanto.....	14
	3.3.1 Tulitorvi-tuliputkikattilat.....	15
	3.3.2 Vesiputkikattilat .....	15
	3.3.3 Polttotekniikat .....	15
	3.4 Polttoainetyypit .....	16
	3.5 Kaukolämpöjohdot.....	18
	3.6 Kaukolämpötehon siirto.....	19
4	KAUKOLÄMPÖVERKON HÄVIÖT .....	21
	4.1 Lämpöhäviöt .....	21
	4.2 Painehäviöt.....	22
	4.3 Vuotohäviöt.....	22
5	KAUKOLÄMPÖVERKON KÄYTTÖ.....	23
	5.1 Lämpötilan säätö .....	23
	5.2 Paine-eron säätö .....	24
6	KAUHAVAN KAUKOLÄMPÖ OY .....	25
	6.1 Laitokset.....	25
	6.1.1 Kauhavan 10 MW:n laitos .....	25
	6.1.2 Kauhavan vanhempi laitos .....	26
	6.1.3 Muut laitokset .....	27
	6.2 Polttoaineet .....	27

6.3	Kaukolämpöverkko.....	28
7	KERÄTTY DATA .....	30
7.1	Järjestelmät .....	30
7.1.1	PlantSys.....	30
7.1.2	360°tools .....	30
7.1.3	inWorks .....	30
7.2	Käsitteet .....	31
7.2.1	Lämpötilat .....	31
7.2.2	Verkkoon syötetty energia .....	31
7.2.3	Asiakkaiden käyttämä energia .....	31
7.2.4	Lämpöhäviö.....	31
7.2.5	Verkon hyötysuhde .....	31
7.2.6	Pumppaussähkön kulutus .....	32
7.2.7	Virtaus .....	32
7.2.8	Seurattavat asiakkaat.....	32
8	ALKUPERÄINEN MENOVEDEN LÄMPÖTILAKÄYRÄ.....	34
8.1	Menoveden lämpötilakäyrä.....	34
8.2	Havainnot.....	35
8.2.1	Paluulämpötila .....	35
8.2.2	Kulutuksen vaikutus verkon hyötysuhteeseen .....	36
9	TESTAAMINEN.....	39
9.1	Lämpötilakäyrän valinnan periaatteet kirjallisuuden mukaan .....	39
9.2	Testikäyrät.....	40
9.3	Optimikäyrän muodostaminen testilukemia tulkitsemalla.....	41
9.3.1	Optimikäyrä.....	45
9.4	Yhteenveto testilukemista.....	46
10	TULOKSET .....	48
10.1	Tulosten laskentakaavat .....	48
10.2	Taloudellisuus .....	49
10.2.1	Polttoaine .....	49
10.2.2	Polttoaineen laskentakaavat .....	50
10.2.3	Pumppaussähkö.....	50

10.2.4 Pumppaussähkön laskentakaavat .....	50
10.3 Pohdintaa tuloksista .....	51
11 JOHTOPÄÄTÖKSET .....	52
LÄHTEET .....	54

## KUVIO- JA TAULUKKOLUETTELO

<b>Kuva 1.</b> Lämmityksen markkinaosuudet asuin- ja palvelurakennuksissa vuonna 2017. /2/	11
<b>Kuva 2.</b> Kaukolämmön lämpötilakorjattu kysyntä. /2/	12
<b>Kuva 3.</b> Jakelun toimintaperiaate. /7/	14
<b>Kuva 4.</b> Kaukolämmön energianlähteet vuonna 2017. /2/	16
<b>Kuva 5.</b> Yksiputkinen 2Mpuk-johto. /1 s. 139/	18
<b>Kuva 6.</b> Kaksiputkinen Mpuk-johto. /1 s. 140/	19
<b>Kuva 7.</b> Pyörivä kekoarina. /14/	25
<b>Kuva 8.</b> Kauhavan uudelle laitokselle toimitettujen polttoaineiden MWh-määrät vuonna 2017.	27
<b>Kuva 9.</b> Kauhavan alueen kaukolämpöverkko.	28
<b>Kuva 10.</b> Kauhavan kaukolämpöverkon putkijakauma.	29
<b>Kuva 11.</b> Seurattavat asiakkaat.	33
<b>Kuva 12.</b> Alkuperäinen menoveden lämpötilakäyrä.	35
<b>Kuva 13.</b> Menoveden lämpötila ja paluueden lämpötila.	36
<b>Kuva 14.</b> Kulutuksen vaikutus verkon hyötysuhteeseen.	37
<b>Kuva 15.</b> Menoveden lämpötilan ja ulkolämpötilan lämpötilaeron suhde kulutukseen.	38
<b>Kuva 16.</b> Testattavat lämpötilakäyrät.	40
<b>Kuva 17.</b> Menoveden lämpötila ja verkon hyötysuhde ulkolämpötilassa 5–6 °C.	42
<b>Kuva 18.</b> Menoveden lämpötila ja verkon hyötysuhde ulkolämpötilassa 1–2 °C.	43
<b>Kuva 19.</b> Menoveden lämpötila ja verkon hyötysuhde ulkolämpötilassa -12...-14 °C.	44
<b>Kuva 20.</b> Optimikäyrä ja alkuperäinen menoveden lämpötilakäyrä.	45

# 1 JOHDANTO

Kaukolämpölaitosta ohjataan menoveden lämpötilakäyrällä, joka säätelee kaukolämpöveden menolämpötilaa vallitsevan ulkolämpötilan mukaan. Kauhavan Kaukolämpö Oy haluaa kokeellisesti selvittää, minkälaisella lämpötilakäyrällä saavutetaan parhaat verkon hyötysuhteet eri ulkolämpötiloilla. Verkon hyötysuhteeseen vaikuttaa merkittävästi menoveden lämpötila, sillä verkon lämpöhäviöt vaihtelevat pääasiassa menolämpötilan mukaan.

Tässä työssä testataan viittä erilaista kaukolämpölaitoksen menoveden lämpötilakäyrää, jokaista viikon verran kerrallaan. Käyristä saatavia lukemia aletaan kerätä päivän kuluttua käyrän muuttamisesta. Lämpötilakäyrät käydään läpi yhteensä kolme kertaa. Saatuja lukemia vertailemalla etsitään Kauhavan kaukolämpöverkon hyötysuhteen kannalta parhaimmat menoveden lämpötilat eri ulkolämpötiloissa. Havaintojen perusteella muodostetaan Kauhavan kaukolämpölaitokselle optimaalinen menoveden lämpötilakäyrä, jonka testituloksista arvioidaan kustannussäästöjä.

Tutkittava aihe on tärkeä Kauhavan Kaukolämpö Oy:lle. Verkon hyötysuhdetta kasvattamalla voidaan lämpölaitoksella kuluttaa vähemmän polttoainetta, jolla voidaan saavuttaa merkittäviäkin säästöjä. Lisäksi aiheesta ei ole tehty vastaavan kokoluokan testausta aiemmin. Jo ennestään saatavilla olevaa tietoa ei voida sellaisenaan suoraan hyödyntää, koska eri kaupunkien kaukolämpöverkot eroavat toisistaan suuresti esimerkiksi rakenteen ja koon osalta.

Kauhavan Kaukolämpö Oy on perustettu vuonna 1955. Yhtiön konttori sijaitsee Kauhavan Fransuntiellä Infratalolla. Ensimmäinen kiinteän polttoaineen laitos otettiin käyttöön vuonna 1984. Sen jälkeen Kauhavalle on rakennettu joulukuussa 2015 valmistunut uudempi kiinteän polttoaineen laitos. Yhtiöllä on lämpölaitokset lisäksi Alahärmässä, Korttesjärvellä ja Ylihärmässä, jotka liittyivät Kauhavaan kuntaliitoksessa vuonna 2009. Kauhavan Kaukolämpö Oy työllistää 6 henkilöä.



Tämä opinnäytetyö käsittelee vain entisen Kauhavan alueen kaukolämpöverkkoa, jota ajetaan ainoastaan uudemmalla laitoksella kesän huoltotaukoa lukuun ottamatta.

## 2 KAUKOLÄMPÖ SUOMESSA

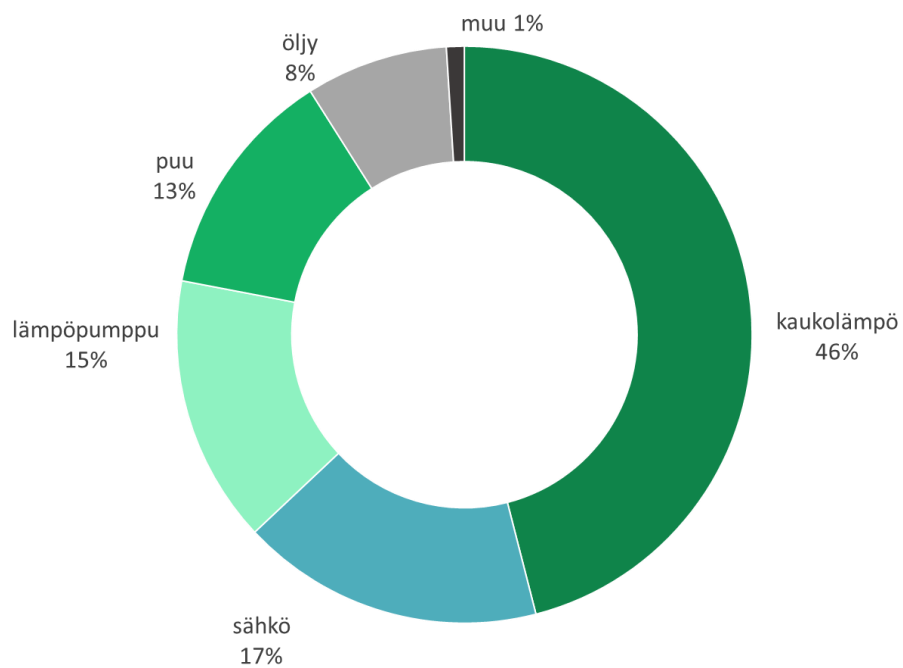
Kaukolämmöllä tarkoitetaan voimalaitoksessa tai lämpökeskuksessa tuotettua lämpöä, joka siirretään veden välityksellä kuluttajille putkista koostuvaa kaukolämpöverkkoa pitkin. Kaukolämpöä käytetään rakennusten ja niiden lämpimän käyttöveden lämmitykseen. Asiakkaalla jäähtynyt vesi palaa laitokselle uudelleenlämmitettäväksi.

### 2.1 Historia

Yhdysvalloissa ja Saksassa kaukolämpö otettiin käyttöön jo 1800-luvun lopulla, mutta Suomessa ensimmäinen asuinalueen kaukolämpöjärjestelmä rakennettiin 1940-luvulla Helsingin olympiakylään. Suomessa huomattiin että teollisuuden sähköntuotannon yhteydessä syntyi hukkaan menevää lauhdelämpöä, jota haluttiin alkaa hyödyntää. Idea lähti siis alun perin liikkeelle sähkön ja lämmön yhteistuotannosta. Kaukolämmön merkitys alkoi kasvaa vuoden 1973 energiakriisin seurauksena, jolloin sen energiataloudelliset edut huomattiin. /1, s. 34/

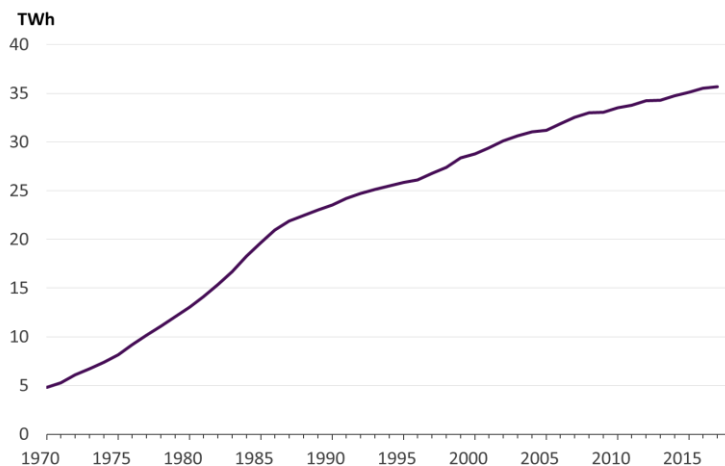
### 2.2 Nykytila

Kaukolämpö on yleisin lämmitysmuoto Suomessa ja vuonna 2017 sillä lämmitettiin 46 % Suomen asuin- ja palvelurakennuksista. Kaukolämpörakennuksissa asui 2,8 miljoonaa ihmistä ja vuotuinen energian myynti oli 33,2 TWh. Kaukolämmön keskihinta oli 7,6 snt/kWh sisältäen verot. Kuvassa 1 on eri lämmitysmuotojen markkinaosuudet asuin- ja palvelurakennuksissa vuonna 2017. /2/



**Kuva 1.** Lämmityksen markkinaosuudet asuin- ja palvelurakennuksissa vuonna 2017. /2/

Kaukolämmön kysyntä on kasvanut tasaisesti viimevuosina. Vuonna 2017 lämpötilakorjattu kysyntä kasvoi 0,4 %. Lämpötilakorjatun kysynnän kasvu esiintyy kuvassa 2. /2/



**Kuva 2.** Kaukolämmön lämpötilakorjattu kysyntä. /2/

Vuonna 2016 Energiateollisuus ry:n tilastoissa mukana olevat kaukolämpöyritykset jakelivat kaukolämpöä yhteensä 166:ssä kunnassa. Yrityksistä 46 myi suurimmaksi osaksi sähkön kanssa yhteistuotantona tuotettua kaukolämpöä ja 57 yritystä myi lämpökeskuksissa tuotettua kaukolämpöä. Vuonna 2016 kaukolämpöjohtojen yhteenlaskettu pituus oli 14 800 kilometriä. /3/

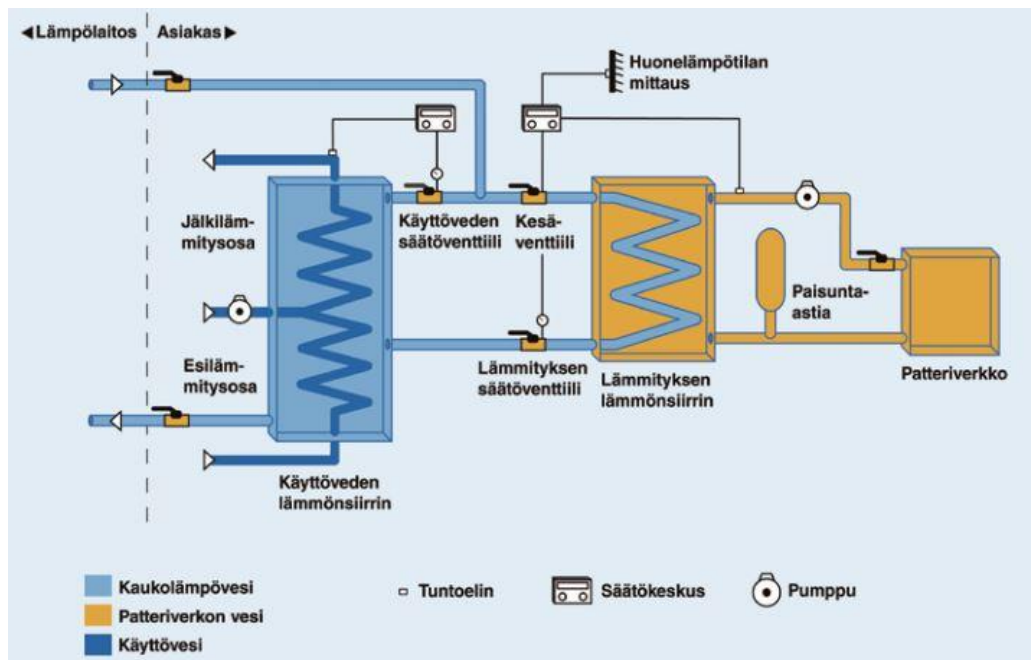
Kaukolämpö on nykypäivänä hyvin toimitusvarma lämmitystapa. Energiateollisuus ry arvioi vuonna 2016 kaukolämmön toimitusvarmuuden olleen noin 99,98 % ja lämmön jakelun keskeytysaika asiakasta kohden noin 2 tuntia. /4/

## 3 KAUKOLÄMMÖN TUOTANTO

### 3.1 Jakelun toimintaperiaate

Kaukolämpö tulee asiakkaalle kaukolämpöverkkoa pitkin kuumana vetenä. Veden lämpötila vaihtelee ulkolämpötilan mukaan 65:stä 115 asteeseen. Asiakkaalla on kiinteistössään lämmönjakokeskus, jonka lämmönsiirtimet siirtävät lämpimän kaukolämpöveden sisältämän lämmön talon omiin lämmitysjärjestelmiin. Kaukolämpövesi ei missään vaiheessa sekoitu asiakkaan järjestelmiin. Talon lämmitystä, käyttövetä ja mahdollista ilmanvaihtokonetta varten asiakkaalla on jokaiselle oma lämmönsiirtimensä. Venttiilit säätävät siirtimen läpi virtaavaa kaukolämpöveden määrää lämmitystarpeen ja kulutuksen mukaan. Lämmityksen säädin ohjaa lämmitysverkoston ja mahdollisen ilmanvaihtokoneen tuloilman lämpötilaa vallitsevan ulkolämpötilan mukaan. Lämmitysverkostolle tarvitaan kiertovesipumppu veden kierrättämiseen, verkoston täyttöventtiili ja varoventtiili. Lisäksi tarvitaan paisunta-astia, koska verkostossa olevan veden tilavuus kasvaa lämpötilan noustessa. Patteriverkoston lisäksi asiakkaalla voi olla lattialämmitys. Patteriverkostossa veden lämpötila voi kovimmilla pakkasilla nousta jopa yli 70 asteen. Lattialämmitystä varten tarvitaan oma lämmönsiirrin ja säätöventtiilit, koska lattialämmityksessä kiertää pattereita haaleampaa 30–40 asteista vettä. Pattereissa ja lattialämmityksessä on termostaatit, jotka sulkeutuvat kun tietty huonelämpötila ylittyy. Käyttöveden lämpötilansäädin ohjaa käyttöveden lämpötilaa, jonka tulee olla vähintään 55 asteista bakteerien vähentämiseksi, mutta kuitenkin alle 65 asteista tapaturmien välttämiseksi. Asiakkaalla jäähtynyt kaukolämpövesi palaa laitokselle uudelleen lämmitettäväksi. Palaavan veden lämpötila vaihtelee yleensä 40:stä 60 asteeseen riippuen ulkolämpötilasta ja lämpökuormasta /5/. Kuva 3 havainnollistaa edellä mainittua toimintaperiaatetta.

/6/



**Kuva 3.** Jakelun toimintaperiaate. /7/

### 3.2 Sähkön ja lämmön yhteistuotanto

Sähköä tuottaessa syntyy hukkalämpöä. Sen sijaan, että hukkalämpö päästettäisiin luontoon, se käytetään hyödyksi kaukolämpönä. Tämä niin sanottu sähkön ja lämmön yhteistuotanto tapahtuu voimalaitoksissa. Yhteistuotantolaitosten hyötysuhde on korkeampi kuin erillistuotantolaitoksissa, joissa tuotetaan pelkkää lämpöä. Erilaisia yhteistuotantolaitosten voimalaitostyyppjä ovat Energiategollisuus ry:n mukaan:

- höyryvoimalaitos (vastapaine- tai väliottolauhdutuslaitos)
- kaasuturbiinilaitos
- kombivoimalaitos (yhdistetty höyry- ja kaasuturbiiniprosessi)
- moottorivoimalaitos (diesel- tai kaasumoottori). /1 s. 47/

### 3.3 Erillistuotanto

Lämmön erillistuotanto tapahtuu lämpökeskuksissa, joissa tuotetaan pelkästään lämpöä. Lämpö siirretään joko veteen tai höyryyn. Lämpökeskuksissa kattilan

hyötysuhde on yleensä 85–93 %. Tämä vaihtelee polttoaineesta, polttotekniikasta, kattilan mitoituksesta sekä ajotavasta riippuen. Laitoksen sisällä suurin häviö on savukaasuhäviö, joka riippuu savukaasun happipitoisuudesta ja loppulämpötilasta. Tämän häviön pienentämiseksi monella laitoksella on käytössään savukaasupesuri, joka ottaa talteen savukaasujen lämpöä. Lämpökeskuksien pääpolttoaineita ovat raskas polttoöljy, kevyt polttoöljy, maakaasu, puu ja turve. Kattilatyyppejä ovat tulitorvi-tuliputkikattilat ja vesiputkikattilat. /1 s. 282/

### **3.3.1 Tulitorvi-tuliputkikattilat**

Tulitorvi-tuliputkikattilassa savukaasut virtaavat tulitorvessa ja tuliputkissa. Kuumat savukaasut lämmittävät ympärillä olevan veden. Tämän tyyppisessä kattilassa on enemmän vettä kuin vastaavan kokoisessa vesiputkikattilassa. Kattiloiden teho on yleensä 15 MW yhtä tulitorvea kohti. /1 s. 282/

### **3.3.2 Vesiputkikattilat**

Vesiputkikattilassa putkissa oleva vesi lämpenee ympärillä olevan kuumen savukaasun vaikutuksesta. Vesiputkikattilat jaetaan vielä kuumavesikattiloihin, kylläisen höyryn kattiloihin ja tulistetun höyryn kattiloihin. Kaukolämpökattiloista suurin osa on kuumavesikattiloita. Vesiputkikattilassa tulipinta on vesitilavuuteen verrattuna isompi kuin tulitorvi-tuliputkikattilassa. /1 s. 283/

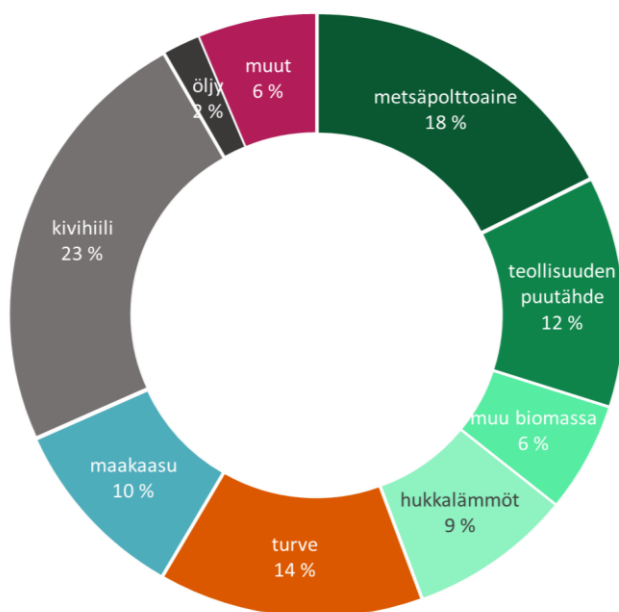
### **3.3.3 Polttotekniikat**

Arinapolttoa on käytetty kiinteiden aineiden poltossa jo teollistumiskauden alusta lähtien. Arinoita on sekä kiinteitä että mekaanisia, ja myös näiden yhdistelmiä. Arinan polttopinta voi myös olla joko tasossa tai viistossa. Mekaanisessa viistoarinassa on hydraulisesti liikuteltavia arinarautoja, jotka kuljettavat polttoainetta eteenpäin. Kiinteässä viistoarinassa taas polttoaine valuu painovoiman vaikutuksesta alaspäin. Palamisilma koostuu arinan alta syötettävästä primääri-ilmasta ja polttoaineesta haihtuvien palavien kaasujen polttamiseen tarkoitettusta sekundääri-ilmasta. Yhteistä erilaisille arinoille on, että polttoaineesta jää jäljelle tuhkaa, joka usein poistuu putoamalla arinan läpi. /1 s. 285–288/

Leijupolttoa on kehitetty 1970-luvulta lähtien ja se soveltuu monenlaisille polttoaineille. Etuna on että polttoaineen laatu ja ominaisuudet voivat vaihdella paljonkin. Palaminen leijupoltossa tapahtuu pedissä, joka muodostuu petimateriaalista ja sen päälle syötetystä polttoaineesta. Petimateriaalina käytetään yleensä hiekkaa. Petiin puhalletaan ilmaa sen alapuolelta arinan läpi, mikä saa pedin leijumaan. Leijukattiloita on kahdenlaisia. Kerrosleijukattilassa hiukkaset ja petimateriaali pysyvät pedissä, mutta kiertoleijukattilassa ne nousevat kaasujen mukana ylöspäin ja ne täytyy prosessin jatkumiseksi palauttaa takaisin erotuslaitteella, esimerkiksi syklonilla. /1 s. 289–291/

### 3.4 Polttoainetyypit

Kaukolämmön pääpolttoaineita ovat puu tai muut biomassat, kivihiili, maakaasu, turve, jäte ja öljy /8/. Kuvassa 4 esitetään vuonna 2017 kaukolämmön tuottamiseen käytettyjen energianlähteiden osuudet koko tuotannosta.



**Kuva 4.** Kaukolämmön energianlähteet vuonna 2017. /2/

Uusiutuvia polttoaineita eli metsäpolttoaineita, teollisia puutähteitä ja muita biomassoja oli yhteensä 36 % kaikista energianlähteistä. Uusiutumattomista



energianlähteistä kivihiili, turve ja maakaasu muodostivat yhdessä 47 %:n osuuden. Öljyn osuus oli 2 % ja muiden polttoaineiden eli muiden jätteiden kuin biojätteiden sekä sähkön osuus 6 %. Hukkalämpö eli muuten hyödyntämättä jäävä lämpöenergia luetaan ilmastoneutraaleihin energianlähteisiin. Hukkalämpöä saadaan talteen esimerkiksi jätevesistä ja savukaasuista, ja vuonna 2017 hukkalämmön osuus oli 9 %. Hukkalämmön hyödyntäminen on 2,8-kertaistunut 2010-luvulla. Kotimaisten polttoaineiden osuus koko tuotannosta vuonna 2017 oli 62 %. Kasvua uusiutuvien polttoaineiden sekä kotimaisten polttoaineiden käytössä oli kummassakin 2 % vuoteen 2016 nähden. /2/

Viime vuosina biomassalla on korvattu turpeen käyttöä. Turpeen käyttö on vähentynyt yli 30 % 2010-luvulla. Kivihiilen osuus kaukolämmön tuotannossa kasvoi vuoden 2016 aikana 21 %:sta 26 %:iin, mutta laski vuonna 2017 23 %:iin. Maakaasun osuus laski vuonna 2016 reilusta 20 %:sta vajaaseen 18 %:iin, ja vuonna 2017 maakaasun osuus oli vain 10 %. Nämä uusiutumattomien polttoaineiden kulutusvaihtelut johtuvat osittain hintasuhteista. Kivihiilen osuus kasvoi vuonna 2016 polttoaineen hinnan alennuttua. Maakaasun käyttö on vähentynyt, kun polttoaineen hinta on noussut verotuksen myötä. Kivihiilen käytön voidaan olettaa laskevan lähivuosina energialaitosten uusien investointien myötä. /2, 9/

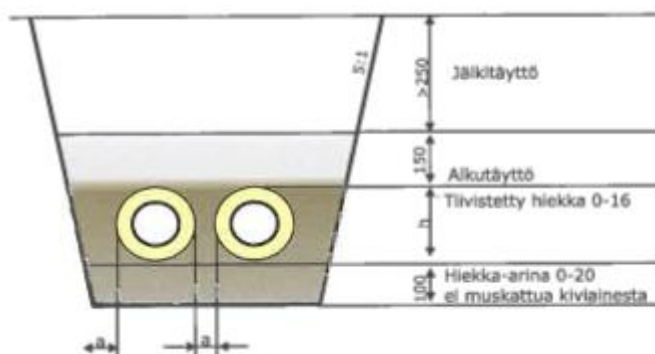
Tulevaisuudessa kaukolämmön tuotannossa pyritään yhä enemmän päästöttömyyteen. Kuluvalle vuosikymmenellä hiilidioksidipäästöt ovat laskeneet 26 %. Vuonna 2017 hiilidioksidipäästöt olivat 149 g/kWh, joka oli 4 % edellisvuotta pienempi. Pienimmän hiilijalanjäljen kaukolämmön polttoaineista aiheuttavat puupohjaiset polttoaineet. Oletuksena on, että puun polttamisessa vapautuvat CO<sub>2</sub>-päästöt ovat yhtä suuret kun puun kasvaessaan tarvitsema CO<sub>2</sub> määrä, joten puun polttamisesta ei näin ollen synny hiilidioksidipäästöjä. Polttamisessa syntyy kuitenkin esimerkiksi CH<sub>4</sub> ja N<sub>2</sub>O kasvihuonekaasuja, joiden hiilidioksidiekvivalentit päästöt ovat puun hankinnan ja polttamisen aikana yhteensä 12 g/kWh. Uusiutumattomista polttoaineista pienimmän hiilijalanjäljen aiheuttaa maakaasu, jonka hankinnan ja polttamisen hiilidioksidiekvivalentit päästöt ovat yhteensä 233 g/kWh. /2, 10/

### 3.5 Kaukolämpöjohdot

Suomessa käytetään kaksiputkijärjestelmää, joka tarkoittaa, että kaukolämpöverkossa on yksi putki menovettä varten ja toinen paluuvettä varten. Käyttötarkoituksensa perusteella kaukolämpöjohdot voidaan jakaa siirtojohtoihin, jakelujohtoihin ja liittymisjohtoihin. Siirtojohdot lähtevät lämpölaitokselta kulutusalueelle. Putkikoko vaihtelee DN100 ja DN1000 välillä. Jakelujohdot erkanevat siirtojohdoista ja vievät lämmön rakennusten lähelle. Putkikoko vaihtelee DN40 ja DN300 välillä. Liittymisjohdot erkanevat jakelujohdoista rakennuksiin. Putkikoko vaihtelee DN20 ja DN100 välillä. /11/

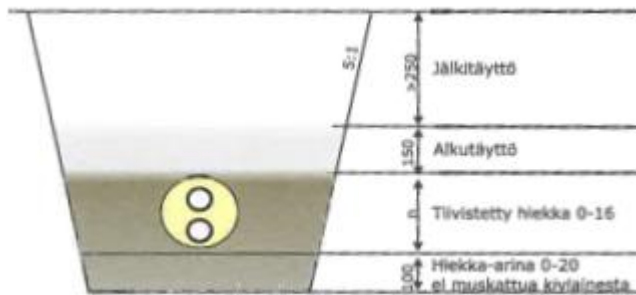
Nykyään rakennettavien verkostojen johdot ovat lähes 100-prosenttisesti kiinnivaahdotettuja 2Mpuk- ja Mpuk-muovisuojakuorijohtoja /12/. Kiinnivaahdotetut johdot otettiin Suomessa käyttöön 1970-luvulla, ja 1980-luvun puolivälin jälkeen lähes kaikki uudet johdot ovat olleet tätä johtotyyppiä /1 s. 138/.

Johdon 2Mpuk-nimessä numero 2 tarkoittaa erillistä meno- ja paluuputkea. Kirjain M tarkoittaa johdon muovista ulkokuorta, joka on yleensä polyeteeniä. Kirjaimet pu tarkoittavat polyuretaanivaahtoa, joka toimii eristeenä ja yhdistää virtausputken suojakuoreen yhdeksi kokonaisuudeksi. Kirjain k tarkoittaa putkien olevan kiinni eristyksessä. Yksiputkista 2Mpuk-johtoa (kuva 5) valmistetaan yleensä kokoluokissa DN20–DN600. /1 s. 137–139/



**Kuva 5.** Yksiputkinen 2Mpuk-johto. /1 s. 139/

Kaksiputkisessa Mpuk-johdossa (kuva 6) meno- ja paluuputki on liitetty polyuretaanieristeellä kiinni suojakuoreen samassa johdossa. Lämpöhäviön vähentämiseksi menoputki on sijoitettu paluuputken alle, jolloin osa putken lämpöhäviöistä siirtyy ylempänä olevaan paluuputkeen. Tämän ansiosta kaksiputkisessa johdossa on pienemmät lämpöhäviöt kuin vastaavassa yksiputkisessa johdossa. Kaksiputkijohtoa valmistetaan pääasiassa kokoluokissa DN20–DN200. /1 s. 139/



**Kuva 6.** Kaksiputkinen Mpuk-johto. /1 s. 140/

### 3.6 Kaukolämpötehon siirto

Kaukolämpöverkkoa mitoitettaessa perustana on verkkoa ajavien laitosten suunniteltu siirrettävä lämpöteho eri käyttötilanteissa /1 s. 198/.

Siirrettävä lämpöteho riippuu verkossa kiertävästä virtauksesta sekä lämpötilaerosta seuraavasti:

$$\Phi = c_p m \Delta t = c_p \rho V \Delta t, \text{ jossa } \Phi = \text{lämpöteho [W]} \quad (1)$$

$c_p$  = veden ominaislämpökapasiteetti  
[J/kg, °C]

$m$  = veden massavirta [kg/s]

$\rho$  = veden tiheys [kg/m<sup>3</sup>]

$V$  = veden tilavuusvirta [m<sup>3</sup>/s]

$\Delta t$  = meno- ja paluulämpötilojen erotus [°C]

Verkon tehonsiirtokyvyn ylärajan määrittää Energiateollisuus ry:n mukaan:

- putkikoko
- sallittu painetaso, painehäviö ja paine-ero
- lämmöntuotantolaitosten pumppujen maksimimitoitus
- asiakkaiden kaukolämpölaitteiden mitoitus ja mahdollinen virtauksen rajoitus. /1 s. 198/

## 4 KAUKOLÄMPÖVERKON HÄVIÖT

### 4.1 Lämpöhäviöt

Pienemmissä kaukolämpöverkoissa, joissa putkikoko on keskimäärin DN50, lämpöhäviöt ovat luokkaa 10–20 %. Suuremmissa verkoissa, joissa putkikoko on keskimäärin DN150, lämpöhäviöt ovat luokkaa 4–10 %. Pienempien verkkojen suuremmat lämpöhäviöt johtuvat suuremmasta vaippapinta-alasta suhteessa siirtokykyyn. Kaukolämpöputkissa lämpöhäviö syntyy lämmön johtumisesta maaperään ja ympäristöön. Osa menoputken veden lämmöstä johtuu myös paluuputkeen. Tätä ei lueta lämpöhäviöksi, sillä paluuputken veden lämpö hyödynnetään kaukolämpölaitoksella. /1 s. 203/

Energiateollisuus ry:n mukaan yleisimpiä lämpöhäviöiden aiheuttajia kaukolämpöverkossa ovat:

- verkon liian korkea käyttölämpötila
- putkiston liian ohut lämpöeristys
- putkiston eristeen suuri lämmönjohtavuus eristeaineen vanhentumisen vuoksi
- kaivojen huono lämmöneristys
- vuotovedet ulkopuolisena jäähdyttäjänä
- suuri maaperän lämmönjohtavuus
- putkiston matala peitesyvyys
- eristystyön heikko laatu
- verkon huono käyttöaste (putkikokojen ylimitoitus)
- lämmön mittausepä-tarkkuudet (tulkitaan häviöksi, koska näistä ei voida laskuttaa). /1 s. 209/

Kaukolämmön jakelukustannuksista suurin on verkoston lämpöhäviöistä aiheutuvat kustannukset. Kuten on aiemmin mainittu, tämän opinnäytetyön tarkoituksena on kokeellisesti löytää lämpöhäviöitä pienentävä, verkon hyötysuhteen kannalta parempi kaukolämpölaitoksen menoveden lämpötilakäyrä, minkä onnistuessa saavutetaan myös kustannussäästöjä.

## 4.2 Painehäviöt

Kitka aiheuttaa kaukolämpöputkessa painehäviön veden virratessa, joka kasvaa noin nelinkertaiseksi virtausnopeuden kaksinkertaistuessa. Samassa suhteessa kasvaa myös niin sanottujen kertavastuksien kuten esimerkiksi käyrien, haarojen ja venttiileiden aiheuttamat painehäviöt. Virtausvastuksista aiheutuu huomattava häviö, joten putket on pyrittävä mitoittamaan mahdollisimman edullisesti vastusten ja putkikoon suhteen. /1 s. 199–202/

Mitoitustilanteessa kokonaispainehäviönä käytetään 1–4 bar/km putkea. Verkkoa suunniteltaessa ei kuitenkaan aina tiedetä tulevaisuuden kuormitusta, joten painehäviöt saattavat poiketa paljonkin suunnitelluista arvoista. Verkon silmukointi ja lisärakentaminen tekevät painehäviöiden laskemisen kuitenkin niin vaikeaksi, että on käytännössä mahdollista laskea vain likiarvoja ATK-ohjelmistoilla. /1 s. 155–156/

## 4.3 Vuotohäviöt

Verkon vuotaessa verkon paine laskee, jolloin vuotanut vesi täytyy korvata lisävedellä. Lisäveden kulutuksen määrä on paras mittari verkon kunnolle /1 s. 349/. Lisäveden kulutukset nähdään kaukolämpölaitoksella. Yleensä kaukolämpövesi on värjättyä, joten vuotoja voidaan havaita myös silmämääräisesti. Normaalisti verkon vesi vaihtuu noin kerran vuodessa. Jos lisävedenkulutus on tätä suurempi, voi verkossa olla tekninen vika tai vettä käytetään luvattomasti. /1 s. 374/

## 5 KAUKOLÄMPÖVERKON KÄYTTÖ

Kuten on aiemmin todettu, kaukolämpöteho riippuu veden virtausmäärästä sekä menoveden ja paluueden välisestä lämpötilaerosta. Menoveden lämpötilaa ohjataan kaukolämpölaitoksen lämpötilakäyrällä, mutta virtauksen suuruus riippuu kuluttajista /1 s. 335/. Kaukolämpölaitokset voivat näin ollen säätää vain menoveden lämpötilaa ja paine-eroa.

### 5.1 Lämpötilan säätö

Kaukolämpölaitoksen lämpötilakäyrä määrää menoveden lämpötilan vallitsevan ulkolämpötilan mukaan. Menoveden lämpötila ei saa olla liian alhainen, sillä asiakkaiden tehontarve tulee tyydyttää, ja jokaiselle asiakkaalle tulevan veden tulisi olla vähintään 65 asteista, jotta asiakkaiden lämmönvaihtimet pystyvät tuottamaan kuumaa käyttövedtä. Korkeilla lämpötiloilla verkon lämpöhäviöt kasvavat. Paluueden lämpötila riippuu asiakkaiden laitteista. Verkossa on mahdollista käyttää myös niin sanottua akkumulointia, joka tarkoittaa, että kulutushuippuja pyritään ennakoimaan varaamalla verkkoon jo ennalta hieman lämpimämpää vettä, jolloin verkko toimii lämmönvaraajana. Usein voi kestää useita tunteja ennen kuin lämmöntuotannon muutokset vaikuttavat verkossa halutulla tavalla, joten viive täytyy muutoksia tehdessä ottaa huomioon. /1 s. 335/

Menoveden lämpötilan alarajan määrää:

- asiakkaiden kaukolämpölaitteiden mitoitus ulkolämpötilan ja muiden sääolosuhteiden mukaisesti
- käyttöveden lämmityksen mitoituksen riittävyys
- mahdollisten prosessien mitoitus
- lämpöhäviöistä johtuva menolämpötilan lasku etäisemmille asiakkaille
- mahdollisesti verkon siirtokyky, jolloin vesivirran noston rajallisuuden takia on nostettava menolämpötilaa ja lämpötilaeroa. /1 s. 335/

Menoveden lämpötilan ylärajan määrää:

- verkon suunnittelulämpötila

- yhdistetyn sähkön- ja lämmöntuotannon parempi sähköntuotanto alhaisemmilla menolämpötiloilla
- mahdollisimman alhaisen menolämpötilan pitäminen lämpöhäviöiden pienentämiseksi. /1 s. 336/:

Kuten on aiemmin todettu, käytännössä menoveden lämpötila voi vaihdella 65 asteen ja 115 asteen välillä. Kirjallisuuden mukaan lämpöhäviöiden pienentämiseksi menoveden lämpötilakäyrän tulisi olla mahdollisimman alhainen, mutta samalla täyttää asiakkaiden tarpeet.

## **5.2 Paine-eron säätö**

Vesi saadaan kiertämään kaukolämpöverkossa kaukolämpöpumppujen paine- ja imu puolen välisellä paine-erolla. Vesi virtaa aina pienemmän paineen suuntaan. Pumppausta tarvitaan veden kiertonopeuden kasvattamiseksi ja kitkavoimien voittamiseen. Yleisimmät tavat pumpun paine-eron säätöön ovat kuristussäätö ja pyörimisnopeussäätö. Pyörimisnopeussäädössä käytetään taajuusmuuntajia, joilla voidaan tarpeen mukaan muuttaa pumpun ominaiskäyrää. Kaikille asiakkaille taataan yleensä 0,6 barin paine-ero. Käytännössä varmistetaan, että tämä paine-ero toteutuu myös verkon kriittisillä asiakkailla, jotka sijaitsevat verkon kauimmaisissa tai epäedullisimmissa paikoissa. Tarpeettoman suuri verkon paine-ero lisää kiertovesipumppujen sähkönkulutusta. /1 s. 340–341/

On tärkeää, että verkon paine pysyy verkon jokaisessa kohdassa ilmanpainetta korkeampana, jottei vesi pääse höyrystymään. Veden höyrystyttyä syntyy vaarallinen tilanne, kun keskipainetta aletaan nostaa. Tällöin höyrystynyt vesi lauhtuu äkkiä takaisin vedeksi ja syntyy vesi-isku, joka voi rikkoa laitteistoa. /1 s. 335/



## 6 KAUHAVAN KAUKOLÄMPÖ OY

### 6.1 Laitokset

#### 6.1.1 Kauhavan 10 MW:n laitos

Kauhavalla on käytössä joulukuussa 2015 valmistunut nimellisteholtaan 10 MW:n kiinteän polttoaineen lämpölaitos. Laitoksella tuotetaan ainoastaan lämpöä eli se on erillistuotantolaitos. Laitoksen kattila on tulitorvi- tuliputkikattila. Arina on tyypiltään pyörivä kekoarina ja sen on valmistanut Kpa Unicon Oy.

Pyörivässä kekoarinassa (kuva 7) polttoaine syötetään alapuolelta polttoaineen syöttöruuveilla arinan keskelle. Keskellä arinaa polttoaine kuivuu etupesän muurausten lämpösäteilyn vaikutuksesta. Polttoaine liikkuu keskeltä ulospäin alkaen palaa. Arinan kiekot liikkuvat vastakkaisiin suuntiin sekoittaen palavaa polttoainetta. Kun polttoaine on kokonaan palanut tuhkaksi, tuhka putoaa arinan reunoilta vedellä täytettyyn tuhkatilaan. /13/



**Kuva 7.** Pyörivä kekoarina. /14/

Laitoksella on käytössä myös savukaasupesuri, joka puhdistaa palamisesta tulevia savukaasuja. Savukaasupesurin ansiosta hiukkas- ja rikki päästöt vähenevät käytetystä polttoaineesta riippuen noin 80 % ja NO<sub>x</sub> päästöt noin 15 %. Tämän lisäksi savukaasupesuri ottaa talteen savukaasuissa olevaa lämpöenergiaa. Savukaasupesuri tuottaa energiaa siten, että palamisprosessista tulevat kuumat savukaasut lauhtuvat pesurissa lauhdevedeksi, joka lämmönvaihtimessa luovuttaa lämpöenergiansa kaukolämpöveden. Laitoksen savukaasupesurin nimellisteho on 3 MW ja sen on valmistanut Caligo Industria Oy. Yhdessä savukaasupesurin kanssa laitoksen nimellisteho on 13 MW. /15/

Kaukolämpöveden pumppaamiseen laitoksella on kolme kiertovesipumppua. Näistä pienin 37 kW:n pumppu on käytössä lämpimillä keleillä noin 6 MW:n tuotantotehoon asti. Tämän jälkeen laitoksen automatiikka kytkee isomman 90 kW:n tehoisen pumpun käyttöön pienemmän pumpun rinnalle, ja tällöin pienempi pumppu tulee sammuttaa manuaalisesti. Laitoksella on vielä toinen 90 kW:n pumppu siltä varalta, että muihin pumppuihin tulee vikaa, jotta kaukolämpöveden jakelu voidaan taata kaikissa tilanteissa. Paineenpitopumppuja on kaksi 1,5 kW:n tehoista.

Korkeimmilla noin -25 °C pakkasilla laitoksen tehot eivät riitä. Tällöin kaukolämpöpumput pumppaavat täydellä teholla, mutta verkon paine-ero laskee silti mittauspisteissä liian alhaiseksi. Laitosten automatiikka lukee etäluettavan paine-ero mittarin lukemia ja kytkee vanhemman laitoksen öljykattilan ja kaukolämpöpumpun päälle. Öljyä poltetaan sen verran, että verkkoon saadaan aikaan tarvittava paine-ero kaikille asiakkaille.

Laitoksella ei käytetä niin sanottua akkumulointia eli verkon varaamista etukäteen kulutushuippuja ennakoiden. Akkumulointia on kokeiltu, mutta sillä ei saatu haluttuja tuloksia.

### **6.1.2 Kauhavan vanhempi laitos**

Kauhavan ensimmäinen kiinteän polttoaineen laitos valmistui vuonna 1984. Kattila on teholtaan 4,5 MW ja arina on kiinteä kekoarina. Savukaasupesurin

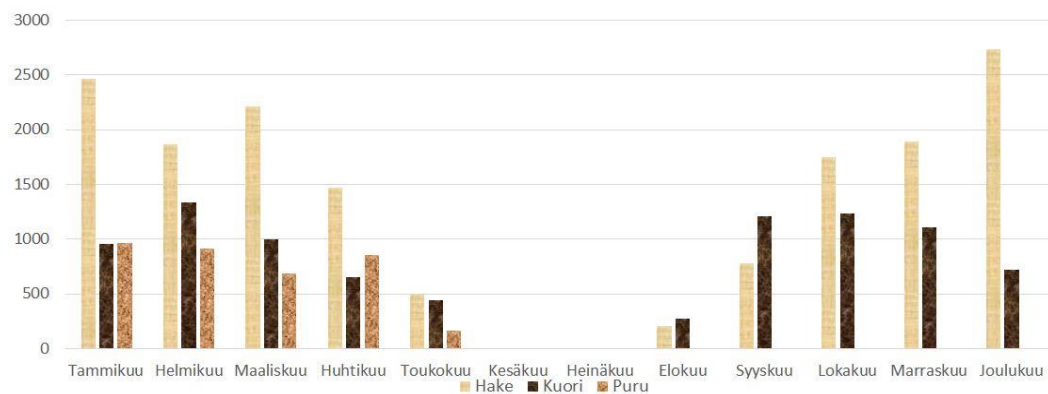
kanssa laitoksen teho on 5,5 MW. Laitoksella on lisäksi kolme öljykattilaa, joilla voidaan polttaa raskasta polttoöljyä. Lähitulevaisuudessa öljykattilat muunnetaan kevyelle polttoöljylle sopiviksi. Öljykattiloiden tehot ovat 3 MW, 4 MW ja 5 MW. Uudemman laitoksen valmistuttua vanhempi laitos on jäänyt varalaitokseksi, eikä sitä ole enää tarkoitus käyttää muuten kuin uudemman laitoksen kesähuoltojen aikana. Kummatkin Kauhavan laitokset sijaitsevat samalla tontilla.

### 6.1.3 Muut laitokset

Kauhavan laitosten lisäksi yhtiöllä on kiinteän polttoaineen laitokset Alahärmässä, Korttesjärvellä ja Ylihärmässä. Nämä lämpölaitokset ovat omissa kaukolämpöverkoissaan, ja sen takia ne eivät ole oleellisia tämän opinnäytetyön kannalta.

## 6.2 Polttoaineet

Kauhavalla poltetaan kiinteitä biopolttoaineita. Laitoksille ostetaan kotimaista rankahaketta, puunkuorta ja purua.



**Kuva 8.** Kauhavan uudelle laitokselle toimitettujen polttoaineiden MWh-määrät vuonna 2017.

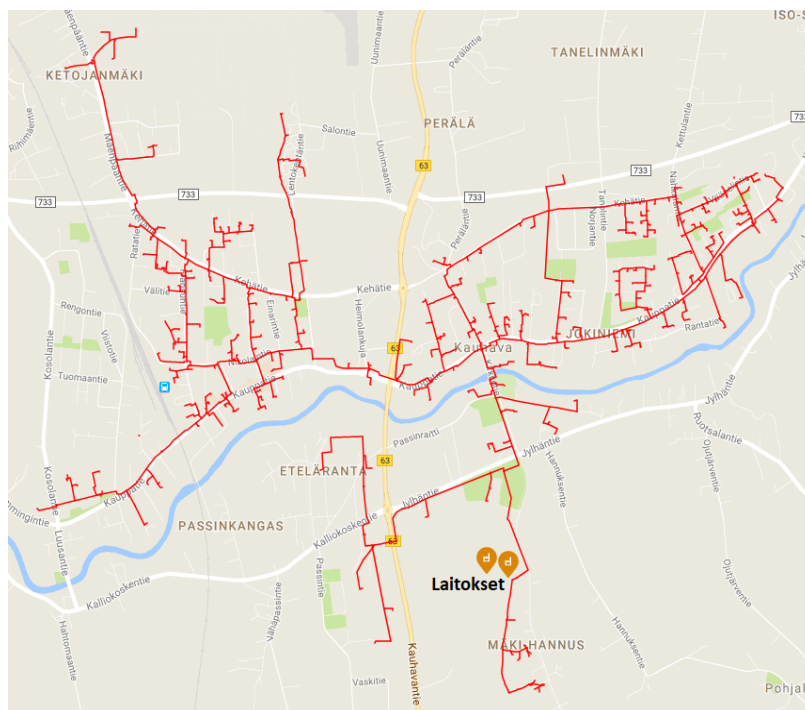
Selvästi suurin osa vuotuisesta energiantarpeesta täytetään rankahakkeella, jonka kosteus vaihtelee 50 %:n molemmiin puolin. Vuonna 2017 Kauhavan uudelle

laitokselle toimitettiin haketta hieman alle 16 GWh, kuorta hieman alle 9 GWh ja purua noin 3,5 GWh.

### 6.3 Kaukolämpöverkko

Kauhavan alueen kaukolämpöverkkoon kuului vuonna 2016 yhteensä 282 asiakasta, joiden yhteiskulutus samana vuonna oli n. 38 GWh ja tilausteho n. 21 MW. Asiakkaista 149 kappaletta oli omakotitaloja, 49 kpl kerrostaloja, 33 kpl liikerakennuksia, 18 kpl rivitaloja, 17 kpl ketjutaloja, 10 kpl teollisuusrakennuksia ja muita rakennuksia 6 kpl.

Verkon kattavuus on lähellä maksimipotentialia. Verkon ulkoreunoja ei ole kannattavaa jatkaa enää kauemmas. Yksittäisiä taloja varten ei kannata lähteä rakentamaan uusia linjoja, vaan uusien linjojen rakentamiseen tarvittaisiin useamman lähekkäin sijaitsevan talon liittyminen verkkoon samaan aikaan. Tällaiset asuinalueet on jo liitetty verkkoon. Kuva 9 esittää pääpiirteittäin Kauhavan alueen verkon.



**Kuva 9.** Kauhavan alueen kaukolämpöverkko.

Verkko koostuu erikokoisista kiinnivaahdotetuista kaksiputkisista Mpuk-johdoista ja yksiputkisista 2Mpuk-lämpöjohdoista. Johtojen kokojakauma näkyy kuvassa 10. Verkon siirtojohdot, eli DN150-, DN200- ja DN250-putket ovat suurimmilta osin peräisin 1980-luvun puolivälistä, jolloin verkkoa on alettu rakentaa. Tämän jälkeen verkkoa on laajennettu vähitellen. Putkia ei ole uusittu muuten kuin vuotojen tukkimiseksi.

DN20:	1 405 m	1.0 m <sup>3</sup>
DN25:	3 072 m	4.0 m <sup>3</sup>
DN32:	507 m	1.1 m <sup>3</sup>
DN40:	7 197 m	20.9 m <sup>3</sup>
DN50:	4 899 m	23.0 m <sup>3</sup>
DN65:	4 293 m	33.5 m <sup>3</sup>
DN80:	3 211 m	34.4 m <sup>3</sup>
DN100:	1 554 m	28.0 m <sup>3</sup>
DN125:	974 m	26.9 m <sup>3</sup>
DN150:	3 629 m	146.6 m <sup>3</sup>
DN200:	895 m	62.0 m <sup>3</sup>
DN250:	1 213 m	131.0 m <sup>3</sup>
???:	196 m	0.2 m <sup>3</sup>
<b>Yhteensä:</b>	<b>33 054 m</b>	<b>512.5 m<sup>3</sup></b>

**Kuva 10.** Kauhavan kaukolämpöverkon putkijakauma.

Yli 33:n kilometrin mittaisessa verkossa on tilavuutta reilu 500 m<sup>3</sup>. Vaikka pienikokoisempia putkia on metreinä paljon, niiden muodostama tilavuus on kuitenkin suhteessa paljon pienempi kuin isojen putkien. Noin 66 % verkon tilavuudesta muodostavat DN150-, DN200- ja DN250-kokoiset putket, vaikka metreinä niiden pituus jää alle 18 %:n verkon kokonaispituudesta.

Kaukolämpökaivoja verkossa on 116 kappaletta. Välipumppaamoja ei ole.

## **7 KERÄTTY DATA**

Tätä opinnäytetyötä varten on kerätty lukemia alkuperäisen menoveden lämpötilakäyrän käytön ajalta, ja vastaavia lukemia testattavien käyrien ajalta. Lukemien kerääminen on vienyt merkittävän osan koko opinnäytetyön tekemiseen käytetystä ajasta. Yhteensä lukemia sisältäviä soluja kertyi yli 9 000 kappaletta. Suurimman osan lukemista olen kerännyt yksitellen selaimen kautta eri järjestelmistä ja syöttänyt ne kaiken datan kokoavaan Excel-tiedostoon. Tiedosto on lähetetty useasti Kauhavan Kaukolämpö Oy:lle opinnäytetyön tekemisen aikana.

Seuraavaksi esitellään Kauhavan Kaukolämpö Oy:llä käytössä olevat järjestelmät, joista data on kerätty, sekä kerrotaan mitä milläkin käsitteellä tarkoitetaan.

### **7.1 Järjestelmät**

#### **7.1.1 PlantSys**

PlantSys on KPA Unicon Oy:n järjestelmä, josta löytyy kaukolämpölaitoksen tuotantoon liittyviä lukemia. Tässä työssä PlantSys-ohjelmistosta on haettu päivän keskiarvolukemina laitoksen ulkolämpötila, menoveden lämpötila, paluueden lämpötila ja virtaus. Lisäksi on haettu päivittäinen pumppaussähkönkulutus, lisäveden kulutus ja energian tuotanto.

#### **7.1.2 360°tools**

360°tools on Elomatic Oy:n järjestelmä, josta löytyy monipuolisesti verkon tietoja ja huolto-ohjelma. Tästä ohjelmasta on tässä työssä haettu asiakkaiden päivittäinen kokonaisenergiankulutus verkon hyötysuhteen laskentaa varten, ja verkon rakenteeseen liittyviä lukuja sekä verkon kartta.

#### **7.1.3 inWorks**

InWorks on inPulse Works Oy:n kehittämä järjestelmä, jonka kautta luetaan asiakastietoja ja hoidetaan laskutusta. Tässä työssä inWorksistä on haettu

yksittäisten asiakkaiden menoveden ja paluueden päivittäisiä keskiarvolämpötiloja testaamisen seurantaan varten.

## **7.2 Käsitteet**

### **7.2.1 Lämpötilat**

Kerättyjä lämpötila-arvoja ovat kaukolämpölaitoksella mitattu ulkolämpötila ja laitoksella mitatut menoveden sekä paluueden lämpötilat. Menoveden ja paluueden erotuksesta muodostuu jäähtymä. Kaikki kerätyt lämpötilat ovat päivän keskiarvolukemia ja ne ovat yksikköä °C.

### **7.2.2 Verkkoon syötetty energia**

Verkkoon syötetyllä energialla tarkoitetaan kaukolämpölaitoksella päivän aikana kaukolämpövedeen siirrettyä lämpöenergiaa, joka on yksikköä MWh.

### **7.2.3 Asiakkaiden käyttämä energia**

Kaukolämpöverkon asiakkaat käyttävät vain osan kaikesta kaukolämpöveden sisältämästä energiasta. Tätä työtä varten on kerätty kaikkien verkkoon kuuluvien asiakkaiden päivittäinen kaukolämpöenergian yhteiskulutus, joka on yksikköä MWh.

### **7.2.4 Lämpöhäviö**

Verkon lämpöhäviö muodostuu verkkoon syötetyn energian ja asiakkaiden käyttämän energian erotuksesta. Yksikkö on MWh.

$$\text{Lämpöhäviö [MWh]} = \text{Verkkoon syötetty energia [MWh]} - \text{Asiakkaiden käyttämä energia [MWh]} \quad (2)$$

### **7.2.5 Verkon hyötysuhde**

Verkon päivittäinen hyötysuhde muodostuu tässä työssä kaikkien asiakkaiden käyttämän ja verkkoon syötetyn energian välisestä osamäärästä. Hyötysuhteessa voitaisiin ottaa huomioon myös päivittäisen lisäveden tarpeen lämmitykseen

käytetty energia ja lisätä tämä määrä asiakkaiden käyttämään energiaan. Opinnäytetyön tekemisen aikana kävi kuitenkin ilmi, että kerätyt lisäveden käytön määrät eivät pidä paikkaansa, joten lisäveden lämmitys päätettiin jättää hyötysuhteen laskennasta pois. Tällä ei kuitenkaan ole juurikaan merkitystä, sillä eroa näiden hyötysuhteiden laskentatapojen välillä on vain muutamia prosentin kymmenyksiä.

$$\text{Verkon hyötysuhde [\%]} = \frac{\text{Asiakkaiden käyttämä energia päivässä}}{\text{Verkkoon syötetty energia päivässä}} \times 100 \quad (3)$$

### 7.2.6 Pumppaussähkön kulutus

Kaukolämpölaitoksella sijaitsevat kiertovesipumput kuluttavat sähköä vaadittavan verkon paine-eron ylläpitämiseen. Tätä päivän aikana kuluvaa sähkömäärää sanotaan pumppaussähköksi ja se on yksikköä MWh.

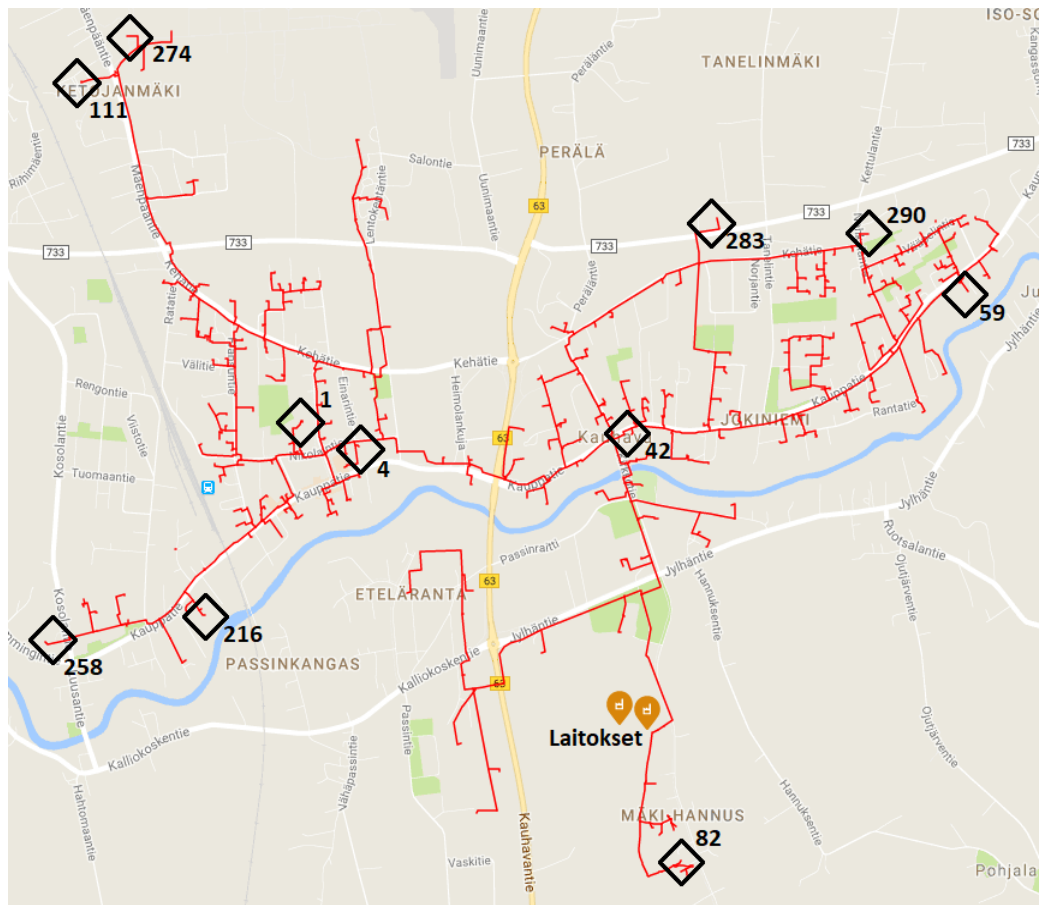
### 7.2.7 Virtaus

Virtauksella tarkoitetaan kaukolämpöverkossa virtaavan veden keskiarvoista tilavuusvirtaa päivän aikana, jota ohjaavat pääasiassa kuluttajat energiantarpeellaan. Yksikkö on m<sup>3</sup>/h.

### 7.2.8 Seurattavat asiakkaat

Seurattaviksi asiakkaiksi opinnäytetyön ajaksi valikoitui 11 eri asiakasta Kauhavan kaukolämpöverkon alueelta, joiden mittauslaitteiden uskottiin olevan luotettavia. Lisäksi osa seurattavista asiakkaista sijaitsee verkon kriittisissä paikoissa, joiden perusteella kaukolämpöverkkoa säädetään. Seurattavien asiakkaiden lukemista otettiin ylös menoveden lämpötila sekä asiakkaalta lähtevä paluuv veden lämpötila. Yksittäisten asiakkaiden lukemia seuraamalla saadaan realistinen kuva eri käyrien vaikutuksista asiakkaisiin. Seurattavien asiakkaiden sijainnit verkossa sekä asiakasnumerot esitetään kuvassa 11.





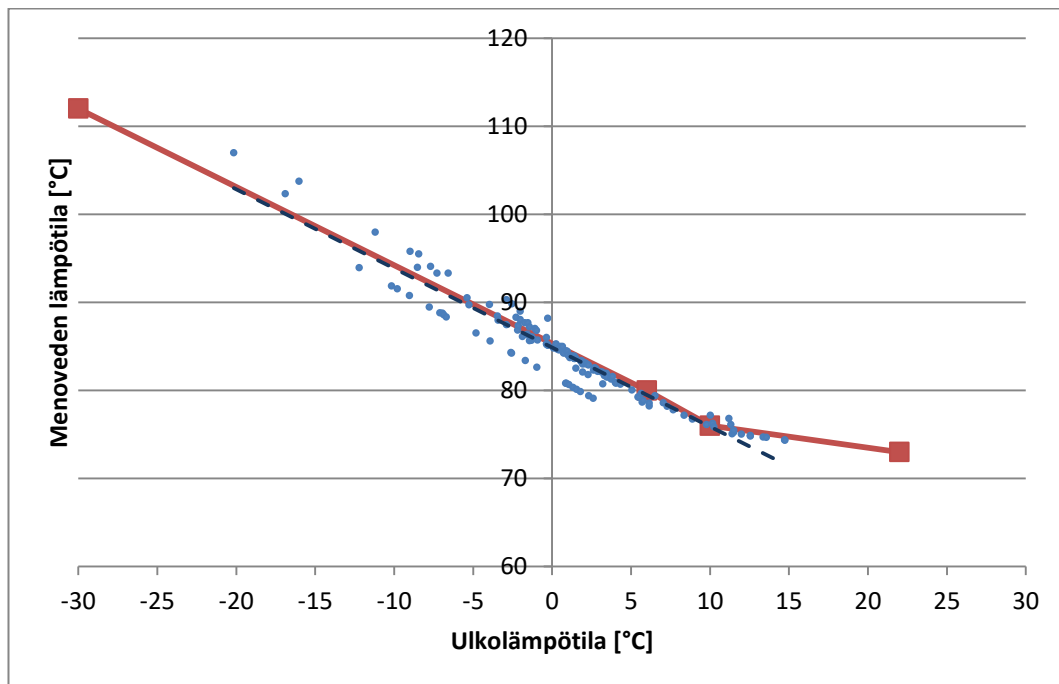
**Kuva 11.** Seurattavat asiakkaat.

## **8 ALKUPERÄINEN MENOVEDEN LÄMPÖTILAKÄYRÄ**

Tässä luvussa käsitellään alkuperäisen menoveden lämpötilakäyrän käytön ajalta kerättyä dataa ja siitä tehtyjä havaintoja. Kerättyjä lukemia on päivästä 1.12.2016 alkaen aina 25.9.2017 asti. Lukemia ei ollut saatavilla ajalta ennen vuoden 2016 joulukuuta, koska PlantSys-järjestelmä toimi tätä ennen vajanaisesti. Saatavilla olevan ajanjakson aikana oli useita muun muassa huolloista ja koeajoista johtuneita taukoja, joiden ajalta lukemia ei voinut kerätä. Kesällä 2017 oli pisin tauko, joka kesti 13.5.2017–6.9.2017 välisen ajan. Yhteensä taukoja oli 146 päivää ja luotettavia lukemia on yhteensä 147:ltä päivältä.

### **8.1 Menoveden lämpötilakäyrä**

Alkuperäisen lämpötilakäyrän mukaan 22 asteen ulkolämpötilassa menoveden lämpötila on 73 astetta, 10:ssä asteessa 76 astetta, 6:ssa asteessa 80 astetta ja -30:ssä asteessa 112 astetta. Näiden pisteiden kautta kulkeva suora on kaukolämpölaitoksen alkuperäinen lämpötilakäyrä, joka näkyy punaisella kuvassa 12.



**Kuva 12.** Alkuperäinen menoveden lämpötilakäyrä.

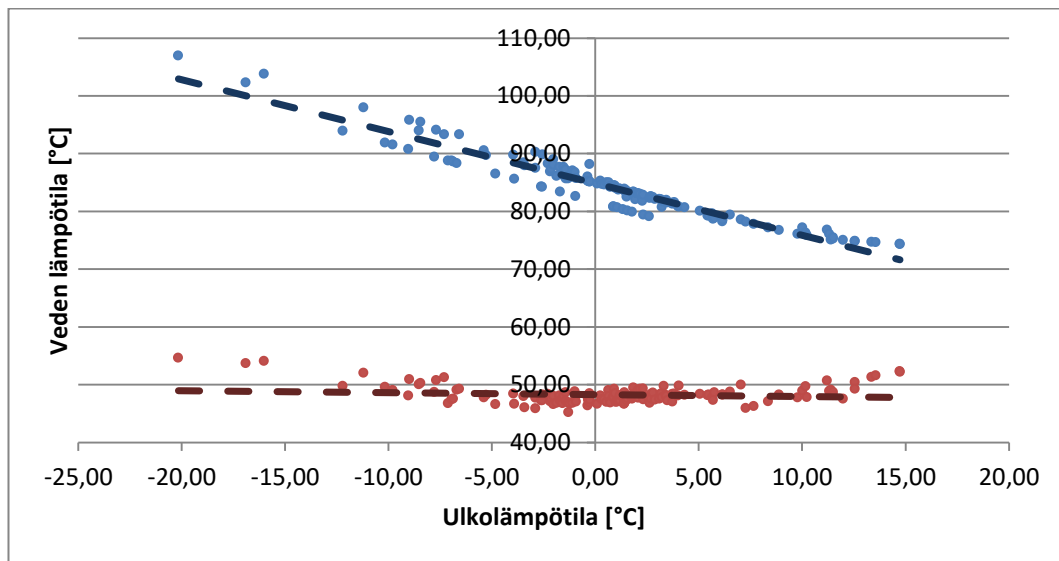
Kuvan vaaka-akselilla on ulkolämpötila ja pystyakselilla menoveden lämpötila. Sinisellä olevat pisteet ovat toteutuneita päivän keskiarvolukemia käyrän käytön ajalta. Pisteistä tehty sininen lineaarinen katkoviiva on yhtenevä lämpötilakäyrän kanssa, joten kaukolämpölaitoksen voidaan todeta noudattavan lämpötilakäyrää.

## 8.2 Havainnot

Seuraavaksi esitetään muutamia mielenkiintoisimpia ja selkeimpiä havaintoja alkuperäisen lämpötilakäyrän käytön ajalta kerätyistä päivittäisistä lukemista.

### 8.2.1 Paluulämpötila

Kerätyistä lukemista voidaan havaita, että vaikka ulkolämpötila laskee ja samalla menoveden lämpötila kasvaa, niin paluulämpötila ei kasva samassa suhteessa, vaan paluulämpötiloista muodostettu lineaarinen viiva on lähes vaakasuora. Kuvassa 13 sinisellä olevat pisteet ovat menoveden lämpötiloja ja punaiset pisteet ovat paluuveden lämpötiloja. Vaaka-akselilla on ulkolämpötila.

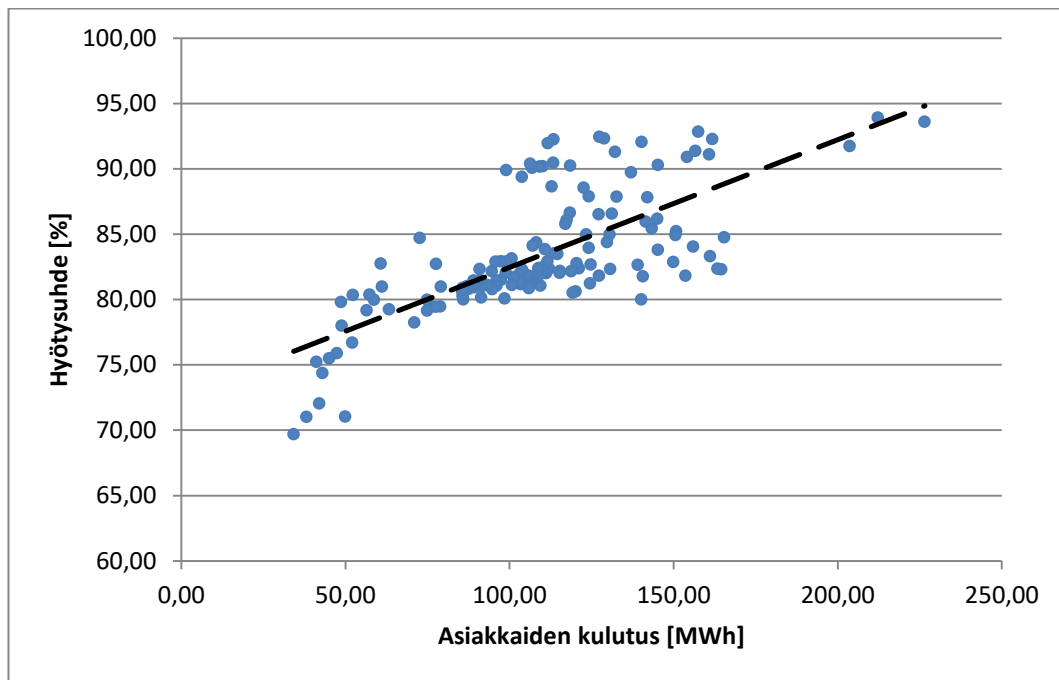


**Kuva 13.** Menoveden lämpötila ja paluueden lämpötila.

Voidaan todeta, että paluulämpötila riippuu enimmäkseen asiakkaiden laitteista ja niiden lämmönhyödyntämiskyvystä. Kuvasta voidaan myös todeta paluulämpötilojen hieman kasvavan kovemmissa pakkasilla sekä lämpimimmillä keleillä. Lämpimien kelien suurempi paluulämpötila selittyy asiakkaiden pienemmällä tehontarpeella, jolloin menoveden sisältämää lämpöenergiaa ei kuluteta yhtä hyvin hyödyksi kuin kylmemmillä keleillä. Lisäksi lämpöhäviöitä tapahtuu luonnollisesti vähemmän mitä korkeampi ulkolämpötila on.

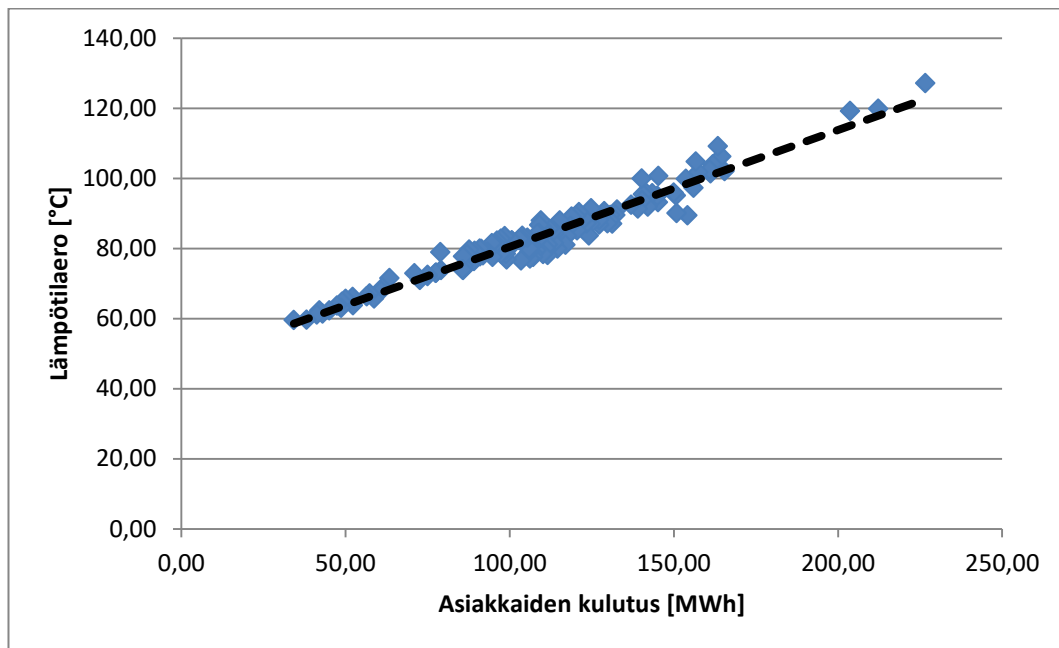
### 8.2.2 Kulutuksen vaikutus verkon hyötysuhteeseen

Kuvassa 14 vaaka-akselilla on asiakkaiden kuluttama energia megawattitunteina ja pystyakselilla verkon hyötysuhde. Katkoviivalla on pisteistä muodostettu lineaarinen suora.



**Kuva 14.** Kulutuksen vaikutus verkon hyötysuhteeseen.

Kuvasta voidaan huomata, että verkon hyötysuhde paranee kulutuksen kasvaessa. Lämpöenergian kulutus kasvaa ulkolämpötilan kylmetessä, jolloin kaukolämpöveden menolämpötila kasvaa. Ulkolämpötilan kylmetessä ja menolämpötilan kasvaessa lämpöhäviöt kasvavat määrällisesti, mutta eivät kuitenkaan samassa suhteessa kulutuksen kasvun kanssa. Kuvasta 15 nähdään, että esimerkiksi 50 MWh kulutuksella menoveden lämpötilan ja ulkolämpötilan välinen lämpötilaero on noin 65 °C, mutta kun kulutus kasvaa nelinkertaiseksi eli lukemaan 200 MWh niin lämpötilaero on vain noin 116 °C ja 1,8-kertainen verrattuna 50 MWh lukemaan.



**Kuva 15.** Menoveden lämpötilan ja ulkolämpötilan lämpötilaeron suhde kulutukseen.

## 9 TESTAAMINEN

Tarkoituksena on testata viittä erilaista menoveden lämpötilakäyrää, jokaista viikon kerrallaan. Kun kaikki käyrät on käyty kertaalleen läpi, toistetaan sama kierto vielä kaksi kertaa. Näitä viiden viikon kiertoja tehdään siis kolme kappaletta, eli jokaiselle käyrälle tulee yhteensä kolmelta viikolta lukemia. Käyrän vaihtaminen tapahtuu jokaisen viikon maanantaina. Tiistaiksi verkon tilanne on tasaantunut, jolloin voi alkaa ottaa ylös vastaavia lukemia kuin alkuperäisen käyrän käytön ajalta. Jokaiselta viikolta otetaan siis kuudelta päivältä lukemia.

Käyriä testaamalla on tarkoitus saada lukemia kattavasti erilaisista menoveden lämpötiloista eri ulkolämpötiloilla. Saatuja lukemia vertailemalla yritetään muodostaa verkon hyötysuhteen kannalta optimaalisin käyrä. Käyrien muodostamista rajoittaa mahdollisuus muodostaa käyrä ainoastaan neljän pisteen kautta. Pisteiden lisääminen ei ole nopealla aikataululla mahdollista, koska se vaatisi kaukolämpölaitoksen automaatiojärjestelmien muutoksia.

Käyrien testaaminen alkoi 9.10.2017, jolloin ensimmäinen uusi käyrä vaihdettiin kaukolämpölaitokselle. Kolmen suunnitellun kierron aikana kaukolämpöyhtiöllä oli muun muassa huolloista aiheutuneita viivästyksiä, joiden takia kaikille käyrille ei tullut ihan yhtä monelta päivältä lukemia, mutta tällä ei ollut juurikaan vaikutusta opinnäytetyön kannalta.

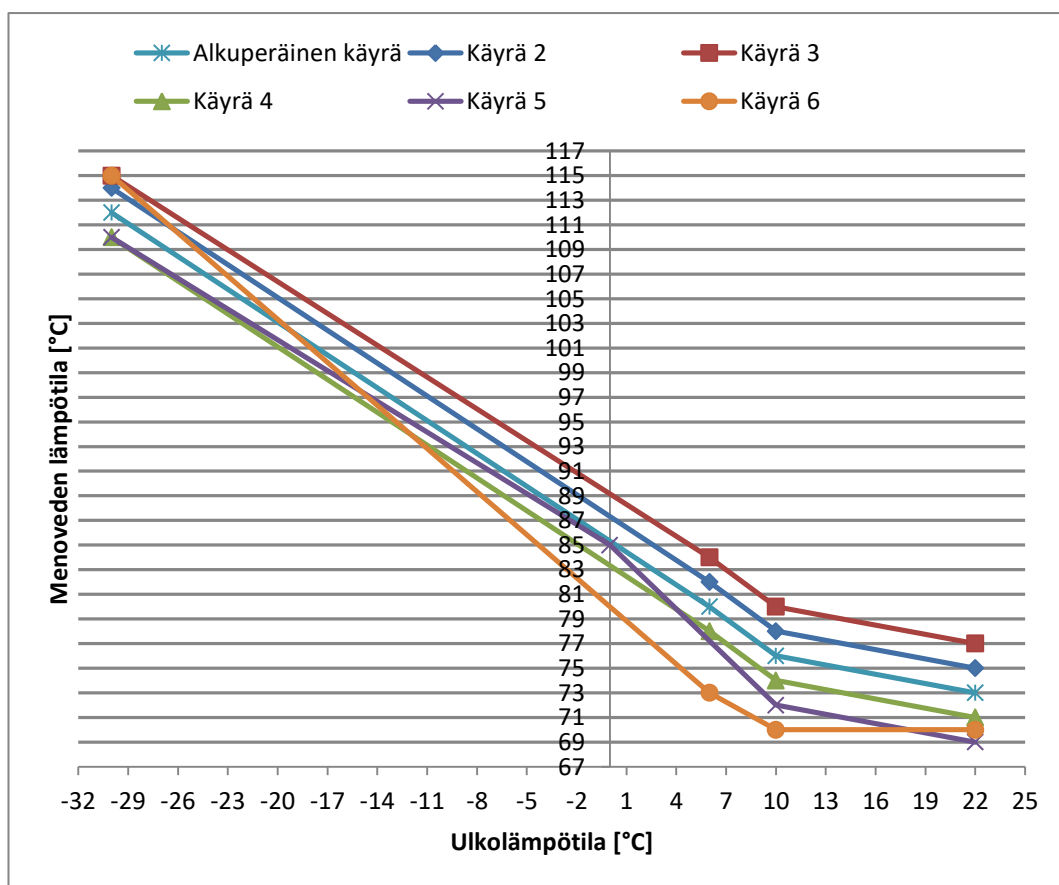
### 9.1 Lämpötilakäyrän valinnan periaatteet kirjallisuuden mukaan

Kuten on aiemmin todettu, kirjallisuuden mukaan menoveden lämpötilan tulisi olla mahdollisimman alhainen ja samalla täyttää asiakkaiden tarpeet. Tällöin lämpöhäviöiden tulisi pienentyä. Jos kuvitellaan, että siirrettävä lämpöteho pysyy samana, niin menolämpötilan laskiessa virtauksen tulisi nousta. Tämä tarkoittaa pumppaussähkön määrän kasvua, eli pumppaus aiheuttaa enemmän kustannuksia, mutta samalla lämpöhäviöt pienenevät niin paljon, että menolämpötilan laskeminen on taloudellisesti kannattavaa. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että menoveden lämpötilan tulisi aina olla mahdollisimman vähän 65 °C yläpuolella verkon kriittisimmällä asiakkaalla. Huomioitavaa kuitenkin on, että 65 °C

minimilämpötilan lisäksi kaukolämpölaitoksella sijaitsevien kiertovesipumppujen tulisi tuottaa verkon kriittiselle asiakkaalle aina vähintään 0,6 barin paine-ero.

## 9.2 Testikäyrät

Testattavat lämpötilakäyrät ovat Kauhavan kaukolämpö Oy:n valitsemia. Käyrät 2 ja 3 ovat alkulämpötiloiltaan alkuperäistä lämpötilakäyrää korkeampia ja käyrät 4, 5 ja 6 ovat alkuperäistä käyrää matalampia. Testattavat käyrät sekä alkuperäinen menoveden lämpötilakäyrä ovat kuvassa 16.



**Kuva 16.** Testattavat lämpötilakäyrät.

Kuvasta nähdään että käyrät alkavat 22 °C ulkolämpötilasta. Saavuttaessaan 10 °C ulkolämpötilan kaikki käyrät ovat kasvaneet tasaisesti kolmella lämpöasteella paitsi käyrä 6, jonka lämpötila pysyy muuttumattomana. 10 °C ulkolämpötilasta testattavat käyrät 2, 3 ja 4 kasvavat neljällä lämpöasteella saavuttaessaan



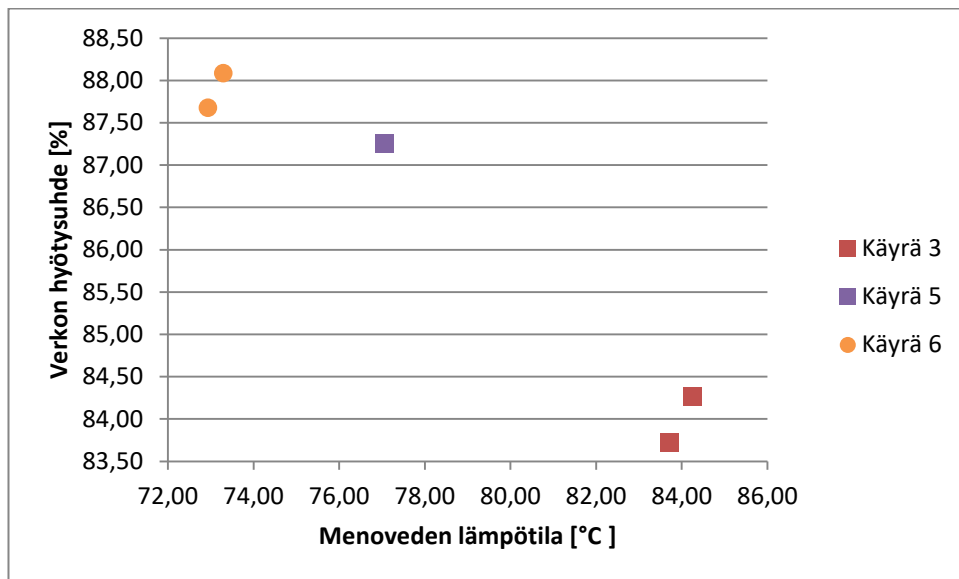
ulkolämpötilan 6 °C, jolloin käyrä 6 on kasvanut kolmella lämpöasteella. Ulkolämpötilasta 6 °C käyrät kasvavat tasaisesti -30 °C ulkolämpötilaan asti. Käyrät 2, 3 ja 4 kasvavat 6 °C ulkolämpötilan jälkeen kaikki hyvin samansuuntaisesti joko 31 tai 32 lämpöastetta, mutta käyrä 6 on jyrkempi kasvaen 42 astetta.

Muista käyristä poiketen käyrä 5 jatkaa 10 °C ulkolämpötilasta 0 °C ulkolämpötilaan kasvaen tällä välillä 13 lämpöastetta. Koska käyrä 5 on tällä välillä muita käyriä jyrkempi, on se tästä eteenpäin -30 °C ulkolämpötilaan tultaessa muita käyriä loivempi kasvaen tällä välillä 25 lämpöastetta.

### **9.3 Optimikäyrän muodostaminen testilukemia tulkitsemalla**

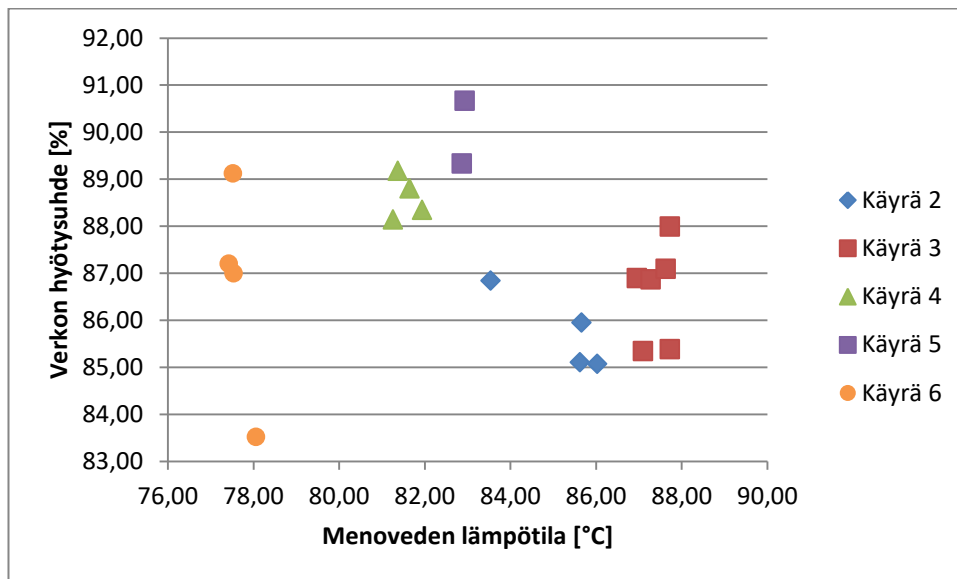
Seuraavaksi testikäyristä saatuja lukemia vertaillaan verkon hyötysuhteen osalta. Ottamalla eri käyrillä toteutuneet menoveden lämpötilat ja niitä vastaavat verkon hyötysuhteet eri ulkolämpötiloissa, voidaan koettaa muodostaa hyötysuhteeltaan optimaalisinta käyrää.

Keräämällä menoveden lämpötilat ja verkon hyötysuhteet samaan kuvaajaan edeten aina yksi ulkolämpötila-aste kerrallaan, saadaan selville verkon hyötysuhteen kannalta parhaat menolämpötilat eri ulkolämpötiloille. Testijaksojen aikana korkein ulkolämpötila oli 7,4 °C, joten lukemia ei saanut käyrän ensimmäistä 22 °C pistettä varten. Seuraavaksi esitellään lämpötiloja, joiden lukemista voidaan helpoiten tehdä johtopäätöksiä. Ensimmäisenä on vuorossa ulkolämpötila 5–6 °C, josta kerääntyi viisi lukemaa, jotka esiintyvät kuvassa 17.



**Kuva 17.** Menoveden lämpötila ja verkon hyötysuhde ulkolämpötilassa 5–6 °C.

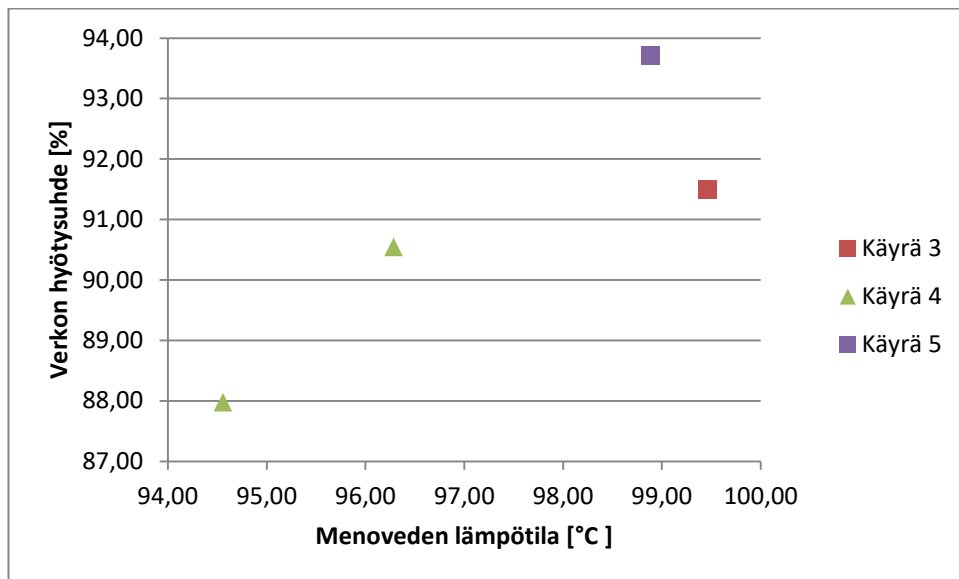
Kuvasta voidaan huomata, että 5–6 °C ulkolämpötilassa verkon hyötysuhde kasvaa menolämpötilan pienentyessä. Käyrän 6 lukemat ovat verkon hyötysuhteeltaan selkeästi parempia kuin käyrän 3 vastaavat lukemat. Kun tarkastellaan kuvassa näkyviä käyrän 6 pisteitä kriittisten asiakkaiden 274 ja 290 osalta, on asiakkaiden menoveden lämpötila ollut kyseisillä pisteillä välillä 65–66 °C. Kuvassa 16 näkyvä käyrän 6 piste ulkolämpötilassa 6 °C menoveden lämpötilalla 73 °C on siis ihanteellinen. Seuraavaksi tarkastellaan vastaavia lukemia ulkolämpötilassa 1–2 °C.



**Kuva 18.** Menoveden lämpötila ja verkon hyötysuhde ulkolämpötilassa 1–2 °C.

Kuvasta 18 nähdään, että 1–2 °C ulkolämpötilassa parhaimmat verkon hyötysuhteet on saavutettu käyrillä 4 ja 5, joiden menoveden lämpötilat ovat olleet noin 81–83 °C. Tämän perusteella verkon hyötysuhteen kannalta optimaalinen käyrä kulkisi suunnilleen pisteen 82 °C kautta ulkolämpötilassa 1 °C.

Testilukemien perusteella optimaalisen käyrän loppupäätä muodostettaessa hankaluuksia aiheuttaa hieman kovempien pakkaspäivien niukkuus testausjakson aikana. Kuitenkin kun tarkasteluväliä suurennetaan yhdellä asteella ja katsotaan menolämpötiloja ja hyötysuhteita välillä -12...-14 °C, saadaan kuvan 19 lukemista tehtyä joitain johtopäätöksiä.



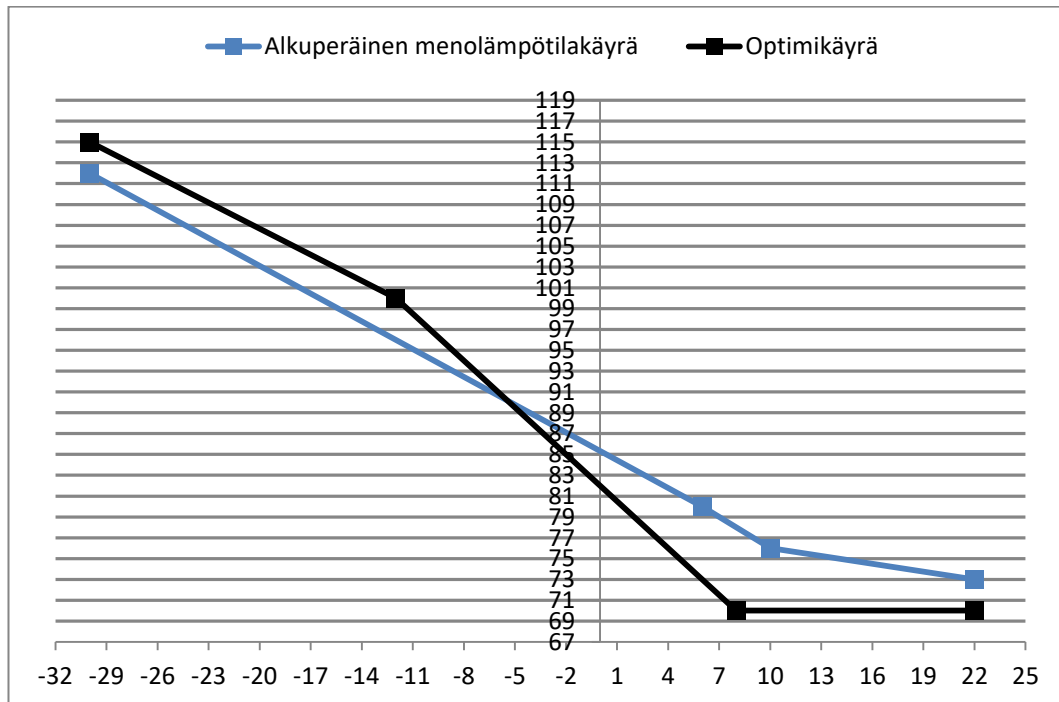
**Kuva 19.** Menoveden lämpötila ja verkon hyötysuhde ulkolämpötilassa -12...-14 °C.

Kuvasta 19 huomataan että -12...-14 °C ulkolämpötiloissa verkon hyötysuhde kasvaa käyrien 3 ja 5 suuremmilla menolämpötiloilla käyrän 4 matalampiin menolämpötiloihin verrattuna. Kuvan perusteella optimaalinen käyrä kulkisi sunnilleen pisteen 99 °C kautta ulkolämpötilassa -13 °C. Tätä havaintoa tukeakseni katsoin myös alkuperäisen lämpötilakäyrän ajalta kerättyjä lukemia. Helmikuussa 2017 mitattiin eräänä päivänä ulkolämpötilaksi -12,2 °C ja menoveden lämpötilaksi 94 °C, jolloin verkon hyötysuhde oli vain 82,3 %. Alkuperäisen käyrän lukema tukee päätelmää, jonka mukaan noin -13 °C ulkolämpötilassa menoveden lämpötilan tulisi olla lähellä 100 °C. Oleellista on myös, että Kauhavan Kaukolämpö Oy raportoi kuvan 19 matalammassa käyrän 4 pisteessä paine-eron jääneen verkon viimeisellä asiakkaalla liian alhaiseksi. Myöskin tällä perusteella menoveden lämpötilan tulisi olla hieman korkeampi kuin kuvan 19 käyrän 4 pisteillä.

Alin mitattu ulkolämpötila testijakson aikana oli -14,4 °C, joten optimaalista käyrää muodostettaessa ei alkupään tavoin myöskään loppupäästä pysty testilukemien perusteella vetämään johtopäätöksiä.

### 9.3.1 Optimikäyrä

Esitettyäni testijaksosta keräämäni datan ja näkemykseni käyrän optimaalisista pisteistä Kauhavan Kaukolämpö Oy:lle, päätyivät he muodostamaan viimeisen optimaalisen testikäyrän, joka esiintyy kuvassa 20 mustalla yhdessä sinisellä olevan alkuperäisen lämpötilakäyrän kanssa.



**Kuva 20.** Optimikäyrä ja alkuperäinen menoveden lämpötilakäyrä.

Kuten kuvasta huomataan, käyrä kulkee suunnilleen esittelemieni pisteiden kautta, joita olivat 73 °C menoveden lämpötila ulkolämpötilassa 6 °C, 82 °C menoveden lämpötila ulkolämpötilassa 1 °C ja 99 °C menoveden lämpötila ulkolämpötilassa -13 °C. Alkupään osalta, josta ei kerääntynyt lukemia testijakson aikana, Kauhavan Kaukolämpö Oy päätyi asettamaan käyrän 22 °C pisteen menolämpötilaksi 70 °C. Tämän jälkeen käyrä jatkaa muuttumattomana ulkolämpötilaan 8 °C asti, josta käyrä nousee ulkolämpötilaan -12 °C, jolloin menolämpötila on 100 °C. Tämän jälkeen käyrä päättyy -30 °C pisteeseen lämpötilassa 115 °C.

#### 9.4 Yhteenveto testilukemista

Testikäyristä saaduista lukemista voidaan todeta, että 6 °C ulkolämpötilassa (kuva 17) matalimman käyrä 6:n menoveden lämpötilat olivat selkeästi parhaimpia verkon hyötysuhteen kannalta. Lukemat osoittavat hyvin, että tässä ulkolämpötilassa menolämpötilan tulisi olla mahdollisimman alhainen eli mahdollisimman lähellä suositeltua 65 °C rajaa kriittisillä asiakkailta. Voidaan olettaa, että tilanne on samanlainen myös lämpimämmillä ulkolämpötiloilla.

Noin 1 °C ulkolämpötilaan tultaessa (kuva 18) testikäyrien perusteella ei ole enää täysin selvää minkälaiset menoveden lämpötilat ovat verkon hyötysuhteen kannalta parhaimpia. Tässäkin ulkolämpötilassa matalin käyrä 6 ei saavuta enää kiistattomasti korkeimpia verkon hyötysuhteita vaan korkeimmat hyötysuhteet mitattiin tässä ulkolämpötilassa keskimmaisella käyrällä 5. Kun vielä huomioidaan, että pumppauskustannukset nousevat sen mukaan mitä matalampi käyrä on, ei enää tässä ulkolämpötilassa näiden lukemien perusteella ole syytä käyttää mahdollisimman matalia menoveden lämpötiloja. Käyrän 4 lukemat kuvassa 18 ovat hyötysuhteeltaan hyviä ja osuvat tuskin täysin sattumalta hyvin lähekkäin toisiaan, joten on perusteltua laittaa optimikäyrä kulkemaan tässä ulkolämpötilassa suunnilleen käyrä 4:n ja 5:n menolämpötiloja mukailleen.

Kylmempiä alle -10 °C ulkolämpötilan lukemia kertyi testijakson ajalta harmittavan vähän, mutta tärkeä havainto saatiin kuitenkin käyrällä 4, jolla paine-ero jäi liian pieneksi verkon viimeisellä asiakkaalla noin -13 °C ulkolämpötilassa menoveden lämpötilalla 94,5 °C (kuva 19). Tässä ulkolämpötilassa ei siis ole mahdollista laittaa optimikäyrää kulkemaan tuota pistettä alemmaksi vaan vastaavan tilanteen välttämiseksi optimikäyrä kannattaa laittaa kulkemaan ainakin muutaman menoveden lämpötila-asteen verran ylempää. -13 °C ulkolämpötilassa ei siis jää kovin suurta mahdollisuutta lämpötilan valinnalle, koska käyrän on jatkuttava vielä tästäkin pisteestä ylöspäin, jotta paine-ero ei lopu kesken ennen -30 °C ulkolämpötilaa. Kuvan 19 käyrien 3 ja 5 lukemat ovat verkon hyötysuhteen osalta erinomaisia, joten on luonnollinen valinta laittaa optimikäyrä kulkemaan tässä ulkolämpötilassa niiden läheltä.

Testijakson aikana kertyi luonnollisesti lukemia myös kolmen esitetyn ulkolämpötila-alueen väliin jääviltä ulkolämpötiloilta, mutta niissä ei esiintynyt mitään esitetyistä havainnoista poikkeavaa.

Testijakson perusteella voidaan todeta, että menoveden lämpötilan säätökäyrästä riippumatta kriittisillä asiakkailla voidaan saavuttaa suositeltu 65 °C menolämpötila vain ulkolämpötilan 6 °C tietämille asti. Tästä eteenpäin ulkolämpötilan kylmetessä asiakkaiden lämmöntarve alkaa kasvaa niin suureksi, että menoveden lämpötiloja täytyy alkaa nostaa enemmän, ja menolämpötilan säätökäyrän alarajaa määrää verkon viimeiselle asiakkaalle taattava 0,6 barin paine-ero.

## 10 TULOKSET

Optimikäyrä vaihdettiin lämpölaitokselle 13.3.2018. Lukemia kertyi tämän opinnäytetyön aikana 16:lta päivältä. Testijakson alin päivittäinen keskilämpötila oli -11,9 °C ja ylin päivittäinen keskilämpötila oli 0,2 °C. Keskilämpötila koko testijakson aikana oli -4,6 °C. Verkon hyötysuhde optimikäyrällä oli keskimäärin 87,7 % ja pumppaussähkön määrä myytyä MWh kohden keskimäärin 4,1 kWh.

Ottamalla kaikki alkuperäisen käyrän vastaavat lukemat samalta -11,9°C–0,2°C ulkolämpötilaväliltä, tulee verkon hyötysuhteen keskiarvoksi 85,2 % ja pumppaussähkön määräksi myytyä MWh kohden keskimäärin 4,3 kWh päivässä. Optimikäyrän verkon hyötysuhde oli näin ollen 2,5 % parempi kuin alkuperäisen käyrän verkon hyötysuhde vastaavilla ulkolämpötiloilla. Pumppaussähkön määrä oli optimikäyrällä päivässä keskimäärin 0,2 kWh pienempi myytyä MWh kohden kuin alkuperäisellä käyrällä.

### 10.1 Tulosten laskentakaavat

Tulosten laskennassa verkon keskimääräinen hyötysuhde laskettiin seuraavalla kaavalla:

$$\text{Verkon hyötysuhde keskimäärin [\%]} = \frac{\sum \text{Verkon päivittäinen hyötysuhde}}{\text{Päivien lukumäärä}} \quad (4)$$

Pumppaussähkön päivittäistä keskimäärää laskettaessa käytettiin seuraavia kaavoja:

$$\text{Pumppaussähkö päivässä [kWh/MWh]} = \frac{\text{Päivittäinen pumppaussähkö [kWh]}}{\text{Asiakkaiden kuluttama energia päivässä [MWh]}} \quad (5)$$

$$\text{Pumppaussähkö keskimäärin päivässä [kWh/MWh]} = \frac{\sum \text{Pumppaussähkö päivässä [kWh/MWh]}}{\text{Päivien lukumäärä}} \quad (6)$$



## 10.2 Taloudellisuus

Seuraavaksi esitettävät säästölaskelmat kuvaavat tilannetta, jossa optimikäyrän testijakson tulokset toteutuisivat vuositasolla. Optimikäyrän tuloksien toteutumiselle vuositasolla ei ole minkäänlaisia takeita, koska testijakso oli vain 16:n päivän mittainen ja sisälsi lukemia vain kapealta ulkolämpötila-alueelta. Testijakson lukemia ei näin ollen voi pitää luotettavina vuosittaista säästöpotentiaalia arvioitaessa vaan oikeat säästöt nähdään vasta pidemmän ajan kuluttua. Seuraavaksi esitettävien säästölaskelmien tarkoituksena on hahmottaa mahdollisten säästöjen suuruusluokkaa, jos optimikäyrän testijakson tulokset toteutuisivat vuositasolla.

### 10.2.1 Polttoaine

Kauhavan kaukolämpöverkon asiakkaiden lämpöenergian yhteiskulutus eli myyty lämpöenergia oli vuonna 2017 noin 31 000 MWh. Vertaamalla aiemmin mainittuja optimikäyrän ja alkuperäisen käyrän verkon hyötysuhteita saadaan osviittaa mahdollisten polttoainesäästöjen suuruusluokasta.

Kun asiakkaiden vuotuinen lämpöenergian kulutus 31 000 MWh jaetaan optimikäyrän hyötysuhteella 87,7 %, saadaan optimikäyrällä vuodessa tuotettavan lämpöenergian määräksi 35 348 MWh. Kun vastaavasti 31 000 MWh jaetaan alkuperäisen käyrän hyötysuhteella 85,2 %, saadaan alkuperäisellä lämpötilakäyrällä tuotettavan lämpöenergian määräksi 36 385 MWh. Optimikäyrällä tarvitsisi siis tuottaa 1 037 MWh vähemmän lämpöenergiaa vuodessa kuin alkuperäisellä menoveden lämpötilakäyrällä, mikäli testijakson aikaiset verkon hyötysuhteet toteutuisivat vuositasolla. Kun otetaan huomioon kattilan 90 % hyötysuhde, polttoainetta tarvitaan 1 152 MWh vähemmän vuodessa. Vuoden 2017 joulukuussa lämmöntuottoon käytettävän metsähakkeen hinta oli Tilastokeskuksen mukaan 20,58 €/MWh (alv 0%) /16/. Lisäksi kattilan sähkönkulutus maksaa 2,5 €/MWh, joten vuotuiset kustannussäästöt olisivat 26 598 €.

### 10.2.2 Polttoaineen laskentakaavat

Vuodessa tuotettavan lämpöenergian määrä optimikäyrällä ja alkuperäisellä lämpötilakäyrällä laskettiin kaavalla:

$$\text{Vuodessa tuotettava lämpöenergia [MWh]} = \text{Asiakkaiden vuotuinen kulutus [MWh]} / \text{Verkon hyötysuhde} \quad (7)$$

Tarvittava polttoaineen määrä vuodessa laskettiin seuraavalla kaavalla:

$$\text{Polttoaineen määrä vuodessa [MWh]} = ( \text{Alkuperäisellä lämpötilakäyrällä vuodessa tuotettava lämpöenergia [MWh]} - \text{Optimikäyrällä vuodessa tuotettava lämpöenergia [MWh]} ) / \text{Kattilan hyötysuhde} \quad (8)$$

Vuotuiset kustannussäästöt laskettiin kaavalla:

$$\text{Säästöt} = \text{Polttoaineen määrä vuodessa [MWh]} \times ( \text{Polttoaineen hinta €/MWh} + \text{Kattilan sähkönkulutus €/MWh} ) \quad (9)$$

### 10.2.3 Pumppaussähkö

Optimikäyrän käytön aikana kului pumppaussähköä päivässä keskimäärin 0,2 kWh vähemmän myytyä MWh kohden kuin alkuperäisen käyrän vastaavilla ulkolämpötiloilla. Kauhavan Kaukolämpö Oy ilmoitti pumppaussähkön maksavan yritykselle noin 110 €/MWh sisältäen energiamaksun, sähkönsiirron ja sähköveron (alv 0%). Kun asiakkaiden vuotuinen lämpöenergian kulutus oli 31 000 MWh vuonna 2017, optimikäyrä kuluttaisi vuodessa 6,2 MWh vähemmän pumppaussähköä kuin alkuperäinen lämpötilakäyrä, joten säästökseksi tulisi 682 €.

### 10.2.4 Pumppaussähkön laskentakaavat

Optimikäyrän pumppaussähkön säästön määrä vuodessa laskettiin kaavalla:

$$\text{Vuotuinen pumppaussähkö [MWh]} = \text{Pumppaussähkön keskimääräinen säästö päivässä [kWh/MWh]} \times \text{Asiakkaiden vuotuinen kulutus [MWh]} / 1000 \quad (10)$$

Vuotuiset kustannussäästöt laskettiin kaavalla:

$$\text{Säästöt} = \text{Vuotuinen pumppaussähkö [MWh]} \times \text{Pumppaussähkön hinta [€/MWh]} \quad (11)$$

### 10.3 Pohdintaa tuloksista

Näiden tulosten tarkoituksena oli osoittaa, mitä kokoluokkaa säästöt olisivat toteutuessaan. Optimikäyrän lukemia kerkesi kertyä vain 16:lta päivältä ennen opinnäytetyön loppua. Tarkoitukseni oli ottaa lukemia vielä yhdeltä viikolta, mutta 360°tools-järjestelmän katkoksen takia asiakkaiden yhteiskulutuksia ei ollut saatavilla kyseiseltä viikolta.

Kerätyt tulokset antavat kuitenkin suuntaa antavan kuvan  $-11,9 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ja  $0,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ulkolämpötilavälin vuotuisesta säästöpotentiaalista. Suurin säästöpotentiaali on kuitenkin tämän testijakson lämpötilaväliä lämpimämmillä ulkolämpötiloilla, jolloin optimikäyrän ja alkuperäisen menoveden lämpötilakäyrän ero on suurempi. Optimikäyrän kulkiessa huomattavasti alkuperäistä lämpötilakäyrää alemmaa (kuva 20) pumppaussähkön kulutus toki kasvaa, mutta laskelmat osoittavat, että verkon hyötysuhteen parantuessa saavutetaan silti merkittäviä säästöjä polttoaineen kulutuksen vähentyessä.

Jää nähtäväksi, millaisia verkon hyötysuhteita optimikäyrällä saavutetaan pitkällä aikavälillä Kauhavan kaukolämpölaitoksella, mutta tämän lyhyen testijakson tulokset ovat säästöpotentiaalın suuruusluokan suhteen suuntaa antavia. Pumppaussähkön kulutuksen voidaan olettaa kasvavan vuositasolla nyt esitetyistä tuloksista, koska tämän testijakson keskilämpötila oli vain  $-4,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , ja koko vuoden keskilämpötila tulee olemaan huomattavasti korkeampi. Testijaksoa lämpimämmillä ulkolämpötiloilla optimikäyrän menoveden lämpötilat jäävät enemmän alkuperäisen käyrän menoveden lämpötilojen alapuolelle, jolloin pumppaussähkön kulutus kasvaa. Vuositasolla pumppaussähköstä ei näin ollen voi olettaa tulevan säästöjä vaan on hyvin mahdollista, että pumppauskustannukset kasvavat hieman aiempaa suuremmiksi.

## 11 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tämän opinnäytetyön ensisijaisina tavoitteina oli kerätä dataa Kauhavan kaukolämpöverkosta alkuperäisen menoveden lämpötilakäyrän käytön ajalta, verrata tätä dataa testattavista lämpötilakäyristä saataviin lukemiin, ja päätellä verkon hyötysuhteen kannalta parhaimmat menoveden lämpötilat eri ulkolämpötila-alueilla. Tavoitteet täyttyivät ja eri järjestelmistä kerätystä datasta muodostui kattava Excel-tiedosto, jota itseni lisäksi hyödynsi myös Kauhavan Kaukolämpö Oy opinnäytetyöprosessini aikana. Päätelmieni perusteella Kauhavan Kaukolämpö Oy muodosti optimaalisen menoveden lämpötilakäyrän, jonka testijakson lukemista arvioin käyrän taloudellista kannattavuutta. Testijakson lukemat ja niistä tehdyt laskelmat osoittivat, että verkon hyötysuhteen parantuessa prosenteilla säästöt liikkuvat kymmenissä tuhansissa euroissa. Lopullinen hyöty nähdään kuitenkin vasta pidemmän ajan kuluttua, kun optimikäyrällä on kerääntynyt lukemia kattavasti eri ulkolämpötiloista.

Opinnäytetyöprosessi syvensi ja monipuolisti tietämystäni kaukolämpöalasta kokonaisuudessaan. Eniten opin kaukolämpölaitoksella tehtävistä verkkoa koskevista säädöistä ja niiden vaikutuksista verkon toimintaan. Pääsin myös tutustumaan energia-alan yrityksen käytössä oleviin järjestelmiin. Lisäksi lukemia kerätessä ja analysoidessa Excel-taitoni kehittyivät.

Opinnäytetyöni tekemistä häiritseviä seikkoja oli 360°tools-järjestelmän katkokset, jolloin asiakkaiden päivittäisiä energiankulutuksia ei ollut aivan kaikilta päiviltä saatavilla. Lisäksi PlantSys-järjestelmän virheelliset lisäveden käytön lukemat estivät lisäveden käytön huomioimisen verkon hyötysuhteen laskennassa kokonaan, jolloin verkon hyötysuhteen tarkkuus heikkeni. Testikäyrien testaamisen aikana kaukolämpölaitoksella oli huoltoja ja epätavallisia ajotilanteita, jolloin en voinut kerätä kyseisiltä päiviltä lukemia. Viivästykset kaukolämpöyhtiön puolella venyttivät alkuperäisen testisuunnitelman läpivientä, ja jos opinnäytetyöprosessin aikana muodostetun optimikäyrän olisi saanut kaukolämpölaitokselle jo aiemmin, olisi käyrän lukemia kerääntynyt useammalta päivältä, jolloin tulosten luotettavuus olisi ollut parempi.

Lopulta näistä häiriötekijöistä ei ollut lopputuloksen kannalta liian suurta haittaa, ja tulosten muodostaminen onnistui hyvin.

Tulevaisuudessa Kauhavan Kaukolämpö Oy:n kannattaa jatkaa verkon hyötysuhteen seuraamista. Vaikka tämän työn aikana luotiinkin niin sanottu optimikäyrä, niin uskon olevan mahdollista luoda vieläkin optimaalisempi menoveden lämpötilakäyrä. Opinnäytetyön aikana tehtyyn Excel-tiedostoon kerääntyi valtava määrä verkkoa koskevaa dataa, ja kyseistä tiedostoa voidaan hyödyntää tulevaisuudessakin menoveden lämpötilakäyrää jatkojalostettaessa.

## LÄHTEET

- /1/ Energiateollisuus ry. 2006. Kaukolämmön käsikirja. Helsinki.
- /2/ Energiateollisuus ry. 2018. Energiavuosi 2017 - Kaukolämpö. Viitattu 31.1.2018.  
[https://energia.fi/files/1559/Energiavuosi2017\\_Kaukolampo\\_20180131.pptx](https://energia.fi/files/1559/Energiavuosi2017_Kaukolampo_20180131.pptx)
- /3/ Energiateollisuus ry. 2017. Kaukolämpötilasto 2016. Viitattu 9.4.2018.  
[https://energia.fi/files/2085/Kaukolampotilasto\\_2016.pdf](https://energia.fi/files/2085/Kaukolampotilasto_2016.pdf)
- /4/ Energiateollisuus ry. 2017. Kaukolämmön keskeytystilasto 2016. Viitattu 9.4.2018. [https://energia.fi/files/1821/Kaukolammon\\_keskeytystilasto\\_2016.pdf](https://energia.fi/files/1821/Kaukolammon_keskeytystilasto_2016.pdf)
- /5/ Energiateollisuus ry. Kaukolämpöverkkoja lähes 15 000 km. Viitattu 31.8.2017. [https://energia.fi/perustietoa\\_energia-alasta/energiaverkot/kaukolampoverkot](https://energia.fi/perustietoa_energia-alasta/energiaverkot/kaukolampoverkot)
- /6/ Lappalainen, I., Tiitinen, M. 2012. Lämpöä kotiin keskitetysti. Viitattu 29.8.2017.  
[https://www.motiva.fi/files/7963/Lampoa\\_kotiin\\_keskitetysti\\_Kaukolampo.pdf](https://www.motiva.fi/files/7963/Lampoa_kotiin_keskitetysti_Kaukolampo.pdf)
- /7/ Rauman Energia Oy. Oma koti kaukolämpöön. Viitattu 16.2.2018. <https://fl-cdn.scdn1.secure.raxcdn.com/files/sites/1780/omakotikaukolampoon.pdf>
- /8/ Energiateollisuus ry. Kaukolämpö tuotetaan lähellä asiakasta. Viitattu 30.8.2017. [https://energia.fi/perustietoa\\_energia-alasta/energiantuotanto/kaukolammon\\_tuotanto](https://energia.fi/perustietoa_energia-alasta/energiantuotanto/kaukolammon_tuotanto)
- /9/ Energiateollisuus ry. 2017. Kaukolämpövuosi 2016: uusiutuvuus monipuolista kaukolämmössä. Viitattu 30.8.2017.  
[https://energia.fi/ajankohtaista\\_ja\\_materiaalipankki/materiaalipankki/kaukolampo\\_vuosi\\_2016\\_uusiutuvuus\\_monipuolista\\_kaukolammossa.html](https://energia.fi/ajankohtaista_ja_materiaalipankki/materiaalipankki/kaukolampo_vuosi_2016_uusiutuvuus_monipuolista_kaukolammossa.html)
- /10/ Krzysztof, K., Knuuti, A., Vares, S., Heikkinen, J., Rämä, M., Laitinen, A., Ahvenniemi, H., Hoang, H., Sheimeikka, J., Sipilä, K. 2014. Tulevaisuuden kaukolämpöasuinalueen energiaratkaisut. Viitattu 30.8.2017.  
[https://energia.fi/files/988/TulevaisuudenKl-ratkaisut\\_T187\\_2014\\_VTT.pdf](https://energia.fi/files/988/TulevaisuudenKl-ratkaisut_T187_2014_VTT.pdf)
- /11/ Tiehallinto. 2005. Kaukolämpöjohdot ja maantiet. Viitattu 31.8.2017.  
[http://alk.tiehallinto.fi/thohje/pdf/2100032-v-05kaukol\\_ja\\_maant.pdf](http://alk.tiehallinto.fi/thohje/pdf/2100032-v-05kaukol_ja_maant.pdf)
- /12/ Energiateollisuus ry. 2015. Maanalaisten kiinnivaahdotettujen kaukolämpöjohtojen rakentamiskustannukset 2015. Viitattu 31.8.2017.  
[https://energia.fi/files/1168/Johtorakennuskustannukset\\_2015.pdf](https://energia.fi/files/1168/Johtorakennuskustannukset_2015.pdf)
- /13/ KPA Unicon. KPA Unicon Biograte Combustion. Viitattu 7.3.2018.  
<https://www.youtube.com/watch?v=WNugfZLcCCg>

/14/ Kpa Unicon. Unicon Biograte. Viitattu 24.8.2017.  
[http://www.kpaunicon.fi/fi/unicon\\_biograte](http://www.kpaunicon.fi/fi/unicon_biograte)

/15/ Järvenreuna, J. 2014. Savukaasupesuri parantaa lämpöyhtiön kannattavuutta. Viitattu 24.8.2017. <http://promaintlehti.fi/Tuotantotehokkuuden-kehittaminen/Savukaasupesuri-parantaa-lampoyhtion-kannattavuutta>

/16/ Tilastokeskus. 2018. Energian hintoja lämmöntuotannossa joulukuussa 2017. Viitattu 6.4.2018. [https://www.stat.fi/til/ehi/2017/04/ehi\\_2017\\_04\\_2018-03-13\\_tau\\_002\\_fi.html](https://www.stat.fi/til/ehi/2017/04/ehi_2017_04_2018-03-13_tau_002_fi.html)