

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
LUT School of Energy Systems
Energiatekniikan koulutusohjelma

Janika Hakkarainen

**Meno- ja paluuvesien lämpötilojen hallinta
silmutoidussa kaukolämpöverkossa**

Tarkastajat: Professori, TkT Esa Vakkilainen
 TkT Jussi Saari
Ohjaaja: DI Lotta Lyytikäinen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
LUT School of Energy Systems
Energiatekniikan koulutusohjelma

Janika Hakkarainen

Meno- ja paluuvesien lämpötilojen hallinta silmukoidussa kaukolämpöverkossa

Diplomityö

2019

96 sivua, 47 kuvaa, 4 taulukkoa ja 13 yhtälöä

Tarkastajat: Professori, TkT Esa Vakkilainen
TkT Jussi Saari

Ohjaaja: DI Lotta Lyytikäinen

Hakusanat: kaukolämpö, lämpöpumppu, lämpöhäviöt, verkostohyötysuhde

Diplomityön tavoitteena on selvittää lämpöpumpputekniikan hyödyntämisen potentiaalia ja kannattavuutta Turku Energian kaukolämpöverkon meno- ja paluupuolen lämpötilojen laskemisessa. Matalan kulutuksen aikaan vesi jäähtyy useita asteita matkalla verkon viimeisille asiakkaille. Näiden asiakkaiden takia täytyy verkkoon syöttää verkon alkupään kannalta tarpeettoman kuumaa vettä, mikä lisää jakeluverkon lämpöhäviöitä. Työssä tutkitaan mahdollisuutta nostaa kaukolämpöverkon häntäpäiden lämpötiloja lämpöpumpulla hyödyntäen paluupuolen lämpöä. Tällöin menupuolen lämpötilaa verkon alkupäässä voitaisiin alentaa.

Lämpöpumppujen hyödyn arvioimiseksi paikallistettiin Turun alueen kaukolämpöverkosta alueita, joissa useiden asiakkaiden menolämpötilat laskevat alle 60 °C lämpötilan. Näistä kolmen alueen lämpötiloja simuloitiin eri kulutustilanteissa ja määritettiin lämpöpumpun vaikutus alueen syöttöpisteen meno- ja paluulämpötiloihin.

Simulointien perusteella verkon häntäpäihin asennetuilla lämpöpumpuilla voitaisiin alentaa koko verkon menupuolen lämpötilaa. Paluupuolen lämpötilaan ei todennäköisesti merkittävästi voida vaikuttaa, koska verkon häntäpäiden virtaus on vain pieni osa koko verkon virtauksesta. Hankkeen kannattavuuteen vaikuttaa merkittävästi tarvittavien lämpöpumppujen määrä, kaukolämmön tuotantohinta ja sähkön hinta.

Työn tulosten perusteella hanketta voidaan pitää teknisesti toteuttamiskelpoisena. Toteuttaminen vaatii kuitenkin tarkempia tutkimuksia keskimääräisen lämpötilatason alentamisen vaikutuksista koko verkon alueella.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
LUT School of Energy Systems
Degree Program in Energy Technology

Janika Hakkarainen

Controlling supply and return temperatures in district heating network with ring structures

Master's thesis

2019

96 pages, 47 figures, 4 tables and 13 equations

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

D.Sc. (Tech) Jussi Saari

Instructor: M.Sc (Tech) Lotta Lyytikäinen

Keywords: district heating, heat pump, heat losses, district heating network efficiency

The aim of this master's thesis was to examine the potential and profitability of using heat pumps to lower supply and return temperatures in district heating network. The problem is that during low heat consumption the supply temperature drops several degrees on its way to the last customers. In order to maintain high enough temperature levels at end of the network the supply temperature needs to be higher also at the beginning of the network which increases heat losses. This thesis studies the possibility to raise the supply temperature at the end of the network by using heat pumps and simultaneously lowering the return temperature. This would make lowering temperature levels possible.

Challenging areas, where the supply temperature drops below 60 °C, were identified in order to evaluate the benefits of heat pumps. Simulations in different consumption conditions were made for three identified areas. These simulations were utilized to determine the heat pump's impact on the supply and return temperatures at the feed point.

Based on the simulation results it's possible to lower the supply temperature by using heat pumps at the ends of the network. Probably the impact on return temperature is small because the flow volumes at these last branches are relatively low compared to the whole network. The profitability of the project is highly impacted by the amount of needed heat pumps, district heating production cost and electricity price.

Based on the results of this thesis the project is technically feasible. However, more studies on the effects of lowering the supply temperature on the whole network need to be made be.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö tehtiin Turku Energialle kaukolämpöverkon lämpöhäviöiden pienentämiseen liittyen. Haluankin kiittää Turku Energiaa mielenkiintoisen diplomityöaiheen tarjoamisesta. Erityisesti haluan kiittää Lotta Lyytikäistä työni ohjaamisesta. Lisäksi haluan kiittää Urpo Holmaa hyvistä neuvoista ja ajatuksista työn etenemiseen liittyen sekä mielenkiintoisista tarinoista. Kiitokset kuuluvat myös koko Turku Energian Lämmön työyhteisölle kannustavasta ja mukavasta ilmapiiristä.

Yliopiston puolella kiitokset menevät työni tarkastajille professori Esa Vakkilaiselle ja tekniikan tohtori Jussi Saarelle. Opiskeluvuodet Lappeenrannassa vierähtivät ohi hetkessä. Opiskeluvuosiin mahtui sekä kurssien parissa puurtamista että opiskelukavereiden kanssa vietettyjä ikimuistoisia hetkiä. Suuret kiitokset ystäväilleni ja opiskelukavereilleni, joiden kanssa olen saanut taivaltaa tämän matkan.

Turussa 27.3.2019

Janika Hakkarainen

SISÄLLYSLUETTELO

1	JOHDANTO	9
1.1	Työn tausta.....	9
1.2	Työn tavoitteet ja rajaus	10
1.3	Työn rakenne	11
2	KAUKOLÄMMITYS	12
2.1	Lämmön tarve	13
2.2	Kaukolämmön tuotanto	15
2.3	Kaukolämmön jakelu	18
2.3.1	Kaukolämpöjohdot	19
2.3.2	Pumppaus.....	21
2.3.3	Asiakas.....	24
2.4	Lämmön varastointi.....	26
2.5	Tulevaisuus	27
3	PAINE- JA LÄMPÖHÄVIÖT KAUKOLÄMPÖVERKOSSA	29
3.1	Painehäviöiden syyt ja niiden pienentäminen.....	30
3.2	Lämpöhäviöiden syyt ja niiden pienentäminen	31
3.3	Lämpöhäviöiden laskenta	34
4	LÄMPÖPUMPPU	38
4.1	Lämpöpumpun mitoitus.....	38
4.1.1	Prosessi	39
4.1.2	Lämpöpumpun pääkomponentit.....	40
4.1.3	Lämpökerroin.....	43
4.2	Kylmäaineet	44
4.3	Lämpöpumput osana kaukolämpöä.....	46
4.3.1	Suuret lämpöpumput	47
4.3.2	Kiinteistöjen lämpöpumput.....	48
4.3.3	Lämpöpumput kaukolämpöverkossa.....	49

5	TURKU ENERGIA	51
5.1	Kaukolämmön tuotanto	52
5.2	Kaukolämmön jakelu	54
5.3	Kaukojäähdytys ja höyry	55
6	PILOTTIPROJEKTI	56
6.1	Pilottikohde	56
6.2	Lämpöpumppu	59
6.3	Laskentamalli	60
6.4	Tulokset	64
6.4.1	Vaikutus lämpötilatasoihin	65
6.4.2	Lämpöhäviöt	68
7	MONISTETTAVUUS	70
7.1	Kohde 1	70
7.2	Kohde 2	73
7.3	Turku Energian kaukolämmön jakeluverkko	77
8	KANNATTAVUUS	81
9	JOHTOPÄÄTÖKSET	87
10	YHTEENVETO	91
	LÄHTEET	93

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset aakkoset

c_p	ominaislämpökapasiteetti	[kJ/kgK]
D	halkaisija	[m]
E	etäisyys	[m]
g	putoamiskiihtyvyys	[m/s ²]
H	korkeus	[m]
h	entalpia	[kJ/kg]
K	lämmönläpäisyluku	
\dot{m}	massavirta	[kg/s]
P	teho	[W]
p	paine	[Pa]
Q	lämmitysenergia	[kWh]
R	lämpövastus	[mK/W]
T	lämpötila	[K]
\dot{V}	tilavuusvirta	[m ³ /s]
W	energiankulutus	[kWh]

Kreikkalaiset aakkoset

α	lämmönsiirtokerroin	[W/m ² K]
Δ	ero	
η	hyötysuhde	
λ	lämmönjohtavuus	[W/mK]
ρ	tiheys	[kg/m ³]
Φ	lämpöteho	[W]
Φ'	lämpövirta	[W/m]

Alaindeksit

1-4	lämpöpumppuprosessin tilapisteet
apu	apulaitteet
c	kuori

g	maaperä
gs	maanpinta
L	lauhdutin
H	höyrystin
i	eriste
kesk	keskinäinen vaikutus
komp	kompressori
m	meno
p	paluu
pump	pumppu
tot	kokonais

Lyhenteet

2Mpuk	yksiputkinen kiinnivaahdotettu kaukolämpöjohto
Apu	kiinnivaahdotettu asbestisementtisuojaputkinen kaukolämpöjohto
CFC	täysin halogenoitu hiilivety, joka sisältää klooria, fluoria ja hiiltä
CHP	sähkön ja lämmön yhteistuotanto (combined heat and power)
COP	lämpökerroin (coefficient of performance)
DN	nimelliskoko
GWP	kylmäaineen kasvihuonehaitallisuus (global warming potential)
HCFC	osittain halogenoitu hiilivety, joka sisältää klooria, fluoria, vetyä ja hiiltä
LVI	lämmitys-, vesijohto- ja ilmanvaihtotekniikka
Mpuk	kaksiputkinen kiinnivaahdotettu kaukolämpöjohto
Mpul	muovisuojakuorijohto liikkuvin teräspuutkin
ODP	kylmäaineen otsonihaitallisuus (ozone depletion potential)
SPF	kausisuorituskykykerroin (seasonal performance factor)
TAP	tuntimittaustiedon avoin palvelualusta
TEWI	kylmälaitoksen elinaikanaan tuottama kasvihuonehaitallisuus (total equivalent warming impact)
TSE	Turun Seudun Energiantuotanto Oy
TSK	Turun Seudun Kaukolämpö Oy

1 JOHDANTO

Tämä diplomityö on tehty Turku Energialle kaukolämmön jakeluverkon siirtohäviöiden pienentämiseen liittyen. Turku Energia on yksi Suomen suurimpia kaupunkienergiayhtiöitä, jonka kaukolämpöverkko kattaa Turun seudun eli Turun, Kaarinan, Raision ja Naantalalin. Tässä työssä tutkitaan mahdollisuutta alentaa kaukolämpöverkoston lämpötilatasoja Turun alueella hyödyntämällä lämpöpumpputekniikkaa.

1.1 Työn tausta

Kaukolämmitystä on käytetty kiinteistöjen lämmitykseen jo 1900-luvun puolestavälistä asti ja nykyisin sen osuus asuin- ja palvelurakennusten lämmityksestä on 46 % (Energiateollisuus ry 2018a). Lisääntynyt kilpailu lämmitysmarkkinoilla etenkin erilaisten lämpöpumppuratkaisujen yleistymisen myötä on kuitenkin haastanut kaukolämpöyritykset kehittämään liiketoimintaansa pysyäkseen kilpailukykyisenä. Esimerkiksi tuotannon puolella siirrytään ympäristöystävällisempiin polttoaineisiin ja pyritään hyödyntämään verkon alueella kannattavasti hyödynnettävissä olevia hukkalämpöjä. Tuotannon lisäksi merkittävä osa kaukolämpötoimintaa on lämmön jakelu asiakkaille kaukolämmön siirtoverkon välityksellä. Korkeista lämpötiloista johtuen siirron aikana syntyy lämpöhäviöitä, jotka siten lisäävät tuotannon tarvetta suhteessa kulutukseen. Yleisenä suuntauksena onkin pyrkimys laskea jakeluverkon lämpötilatasoja lämpöhäviöiden minimoimiseksi ja etenkin matalalämpötilaverkot ovat kiinnostuksen kohteena.

Perinteisesti menolämpötilan säätö on Suomessa pohjautunut Lämpölaitosyhdistyksen vuonna 1978 tekemään suositukseen. Paremmin eristettyjen kaukolämpöjohtojen ja alemmille lämpötilatasoille mitoitettujen asiakaslaitteiden myötä tätä suositusta tulisi kuitenkin tarkastaa. Menolämpötila tulee optimoida kuhunkin kaukolämpöverkkoon sopivaksi niin, että siirron energiatehokkuus maksimoidaan kuitenkin samalla pitäen huolta asiakkaiden lämmön saannista. Lämmön tarpeen vaihtelu aiheuttaa kuitenkin haasteita menolämpötilan optimointiin. Lämmityskauden ulkopuolella kaukolämmön kulutus koostuu lähes yksinomaan lämpimän käyttöveden valmistuksesta, jolloin veden virtausnopeus verkossa hidastuu ja kaukolämpöveden jäähtymä kasvaa. Tämä johtaa siihen, että ver-

kossa joudutaan pitämään yllä korkeita lämpötilatasoja verkon häntäpäiden lämmön saannin takaamiseksi.

Turku Energialla on tehty monia toimenpiteitä kaukolämmön jakeluverkon lämpöhäviöiden pienentämiseksi. Merkittävimpänä näistä menolämpötilaa on alennettu paremmin vastaamaan todellista tarvetta. Näin yllälämmöstä johtuvia lämpöhäviöitä on saatu pienennettyä. Kesällä verkostohäviö on kuitenkin edelleen yli 20 % johtuen matalasta kulutuksesta. Turun alueen kaukolämpöverkossa on pitkiä verkon päätyviä haaroja, joissa kulutus on vähäistä ja tämän johdosta kaukolämpövesi jäähtyy useita asteita. Nämä alueet rajoittavat koko verkon menolämpötilan laskua. Turku Energialla pilotoidaan ratkaisua, jossa Hirvensalossa sijaitsevan kaukolämpöverkon päätyvän haaran menolämpötilaa nostetaan kaukolämpöverkkoon kytketyllä lämpöpumpulla hyödyntäen paluupuolen lämpöä.

1.2 Työn tavoitteet ja rajaus

Diplomityön tavoitteena on tutkia kaukolämpöverkkoon kytkettyjen lämpöpumppujen potentiaalia koko verkon lämpötilatasojen alentamisessa sekä selvittää hankkeen kannattavuutta. Tarkoituksena on paikantaa Turku Energian kaukolämpöverkosta asiakkaiden menolämpötilojen kannalta haasteellisia alueita ja tutkia voitaisiinko näiden alueiden menolämpötilaa nostaa paikallisesti lämpöpumpun avulla. Tavoitteena on selvittää lämpöpumpun mahdollistama menolämpötilan alenema alueen syöttöpisteessä ja siten määrittää paljonko menolämpötilaa voitaisiin laskea koko verkon alueella verrattuna nykytilanteeseen. Lisäksi tutkitaan, paljonko lämpöpumpuilla voitaisiin alentaa paluupuolen lämpötilaa.

Hankkeen kannattavuuden arvioimiseksi työssä selvitetään lämpöpumppujen käytön tuomia lisäkustannuksia ja lämpötilatasojen alentamisesta syntyviä säästöjä. Kustannustarkastelujen pohjalta on tarkoitus pohtia, voidaanko lämpöpumpuilla vaikuttaa tarpeeksi Turku Energian kaukolämpöverkon lämpötilatasoihin ja onko lämpöpumppujen käyttö kannattavaa. Työssä selvitetään kannattavuuteen eniten vaikuttavat tekijät ja pohditaan niiden kehittymistä tulevaisuudessa.

1.3 Työn rakenne

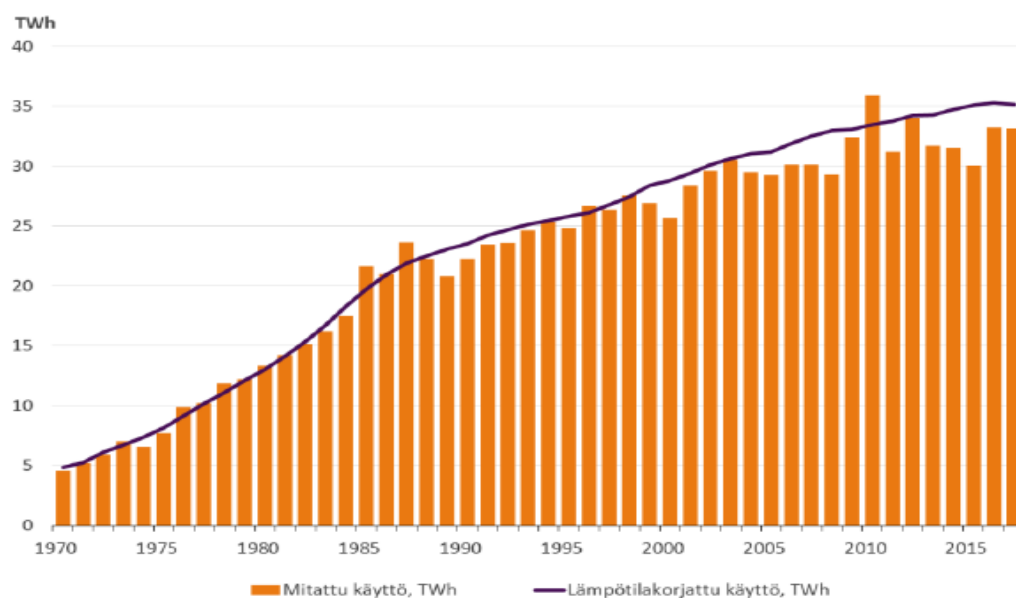
Työ koostuu kirjallisuus- ja tutkimusosista. Kirjallisuusosassa käydään ensin läpi kaukolämpöä yleisesti luvussa kaksi. Luvussa käsitellään lämmön tarpeen vaihtelua vuoden-aikojen ja päivärytmien mukaan sekä esitellään kaukolämmön tuotantoa ja jakelua. Lopuksi käydään läpi kaukolämmön kehityssuuntausta kohti matalalämpötilaverkkoja ja verkkojen avaamista. Kolmannessa luvussa käsitellään tarkemmin kaukolämmön jakelun paine- ja lämpöhäviöitä keskittyen häviöiden syihin ja niiden pienentämiseen. Lisäksi luvussa esitellään lämpöhäviöiden laskentapa. Seuraavassa luvussa käydään läpi lämpöpumpun toimintaperiaatetta ja esitellään tapoja liittää lämpöpumput osaksi kaukolämpöverkkoa.

Tutkimusosa aloitetaan esittelemällä työn toimeksiantajan Turku Energian kaukolämmön tuotantoa ja jakeluverkon rakennetta. Kuudennessa luvussa kuvataan pilottiprojektin taustoja ja tavoitteita sekä esitellään käytetty lämpöpumppukytkentä. Lisäksi esitetään työssä käytetyn laskentamallin rakentaminen ja sillä saadut tulokset vaadittavista menopuolen lämpötiloista ja eri lämpötilatasojen lämpöhäviöistä. Seitsemännessä luvussa käsitellään lämpöpumppukytkennän monistettavuutta muuallakin Turku Energian kaukolämpöverkossa kahden kohteen perusteella ja lasketaan eri lämpötilatasojen vaikutukset koko kaukolämpöverkon lämpöhäviöihin. Kahdeksannessa luvussa käsitellään hankkeen kannattavuutta tarkastelemalla lämpöpumpuista syntyviä kustannuksia ja vertaamalla niitä lämpötilatasojen alentamisesta saataviin säästöihin. Lopuksi luvussa 9 arvioidaan lämpöpumppujen käytön tuomia mahdollisuuksia ja esitetään ehdotukset jatkotoimenpiteiksi.

2 KAUKOLÄMMITYS

Kaukolämmitys on keskitetty laajojen alueiden lämmön jakelujärjestelmä erityisesti kaupungeissa. Lämpöenergia tuotetaan keskitetysti verkon koosta riippuen yhdessä tai useammassa tuotantolaitoksessa ja jaetaan asiakkaille kaukolämpöverkoston välityksellä. Lämpöenergia voidaan välittää höyryn tai kuuman veden avulla. Eurooppalaisissa jakelujärjestelmissä lämpö siirretään asiakkaalle kuumana vetenä kaksiputkijärjestelmällä. Kaukolämmityksen asiakkaita ovat asuinkiinteistöt, liikerakennukset, julkiset rakennukset ja teollisuus. Vuonna 2017 kaukolämmityksen asiakkaita oli Suomessa 151 500, joista asuintalojen osuus oli 81 %. (Energiateollisuus ry 2018a.)

Suomen ensimmäinen kaukolämmitysjärjestelmä rakennettiin vuonna 1940 Helsingin Olympiakylään ja ensimmäiset kaupungit liitettiin kaukolämpöverkkoon 1950-luvulla. Kaukolämmitys yleistyi ja verkostot laajenivat 1980-luvulla, jolloin myös Turussa aloitettiin kaukolämmön tuotanto. (Koskelainen et al. 2006, 34-35.) Kaukolämmitys on nykyisin Suomessa suurin yksittäinen lämmitysjärjestelmä ja sen osuus asuin- ja palvelurakennusten lämmityksestä on 46,1 %. Kuvasta 1 huomataan, että kaukolämpöverkosto on laajentunut tasaisesti vuosien saatossa, vaikkakin kasvu on viime vuosina hidastunut ja käyttö jopa hieman laskenut. Vuonna 2017 rakennettua kaukolämpöverkosta oli Suomessa yhteensä 14 920 km ja kaukolämpöä käytettiin 33,1 TWh. (Energiateollisuus ry 2018a.)



Kuva 1 Kaukolämmön mitattu ja lämpötilakorjattu käyttö (Energiateollisuus ry 2018a)

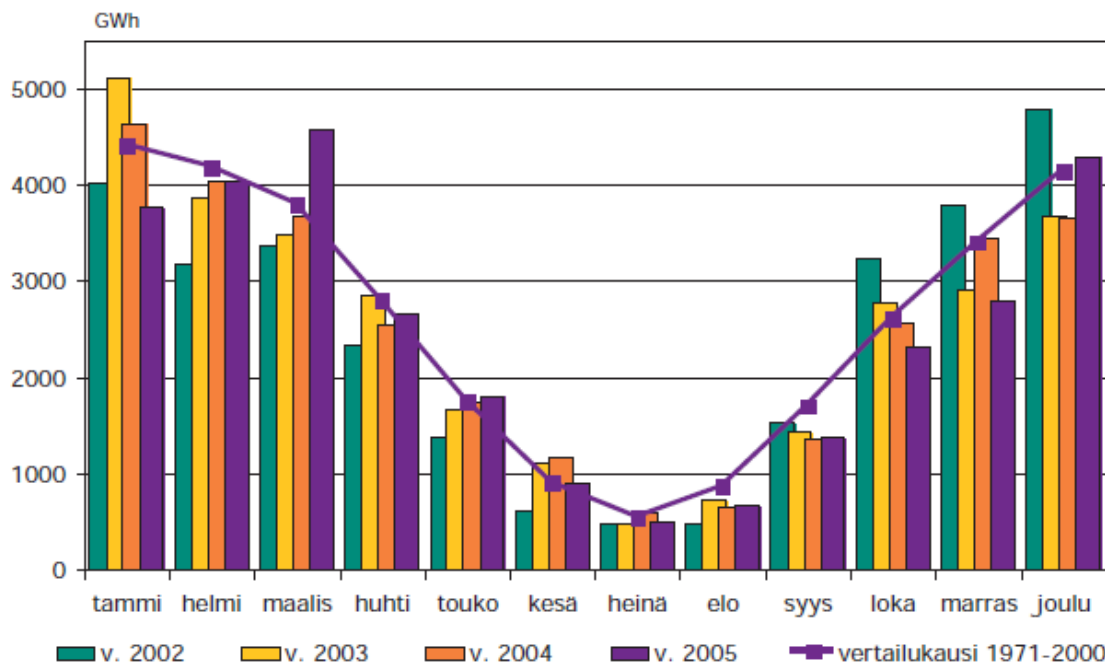
Kaukolämmityksen suosion taustalla on sen energiatehokkuus, taloudellisuus, ympäristöystävällisyys ja toimintavarmuus. Suomessa kaukolämmityksen käytön taustalla on yleensä ollut yhdistetty lämmön ja sähkön tuotanto (CHP). Yhteistuotanto on energiatehokkaampaa ja ympäristöystävällisempää kuin erillistuotanto, sillä samalla polttoainemäärällä saadaan tuotettua enemmän hyötyenergiaa. Kilpailu lämmöntuotantotapojen välillä on kiristynyt ja kaukolämmön kilpailukyvyyn kannalta on olennaista sen energiatehokkuus, ympäristöystävällisyys, luotettavuus ja tuotannon kustannustehokkuus. Suurimmat kustannukset kaukolämmityksessä syntyvät kaukolämpöverkon rakentamisesta ja uusista laitosinvestoinneista. (Mäkelä & Tuunanen 2015, 12-16.)

2.1 Lämmön tarve

Kaukolämmitystä käytetään asiakkaan käyttöveden ja huoneilman lämmittämiseen. Vanhemmissa rakennuksissa lämmityksen osuus lämmönkulutuksesta on noin 75 % ja lämpimän käyttöveden 25 %, kun uudemmissa rakennuksissa lämmityksen osuus on enää noin 50 % (Koskelainen et al. 2006, 51). Kaukolämmitykselle haasteita asettaa lämmön tarpeen runsas vaihtelu vuosi-, kuukausi-, päivä- ja tuntitasolla. Ulkoilman lämpötila on suurin lämmöntarpeen vaihteluun vaikuttava tekijä. Päivittäistä lämmön tarpeen vaihtelua taas aiheuttaa lähinnä asiakkaiden kulutustottumukset. Kausittainen lämmön tarpeen vaihtelu johtuu ulkolämpötilan vaihtelusta ja tarpeesta pitää sisälämpötilat ennallaan, jolloin lämmitystarve muuttuu ulkolämpötilan mukaan. Ilmiö on hyvin tunnettu ja siihen osataan varautua tuotannon lisäämisellä. Kuvasta 2 käy ilmi kuukausitason kulutusvaihtelut Suomessa. Kesällä kaukolämmitystä käytetään lähes yksinomaan lämpimän käyttöveden valmistamiseen, jolloin tehontarve on noin 10 % tammikuun huipputehosta. Suuret tehontarpeen erot talven ja kesän välillä asettavat omat vaatimuksensa kaukolämpöjärjestelmän tuotantorakenteelle. (Mäkelä & Tuunanen 2015, 28-30.)

Vuorokausitason lämmön tarpeen vaihtelu on huomattavasti haastavampaa ennustaa kuin kausivaihtelun. Päivittäiseen vaihteluun vaikuttavat yksilöiden valinnat ja kollektiivinen sosiaalinen käyttäytyminen kuten toimistoajat. Tunnettuja piikkejä lämmön tarpeessa esiintyy aamuisin ja iltopäivisin ihmisten herätessä, saapuessa töihin ja palatessa kotiin. Vuorokausitason lämmön tarpeen vaihtelu aiheuttaa tarpeen ylimääräiselle lämmön tuotannolle, jotta kulutuksen noustessa kaikille verkon asiakkaille voidaan taata tarvittava

lämmitys. Vaihtelun ennustaminen ja siihen varautuminen esimerkiksi lämpöakuilla alentaa tuotantokustannuksia. (Gadd & Werner 2013, 47-51.)



Kuva 2 Kaukolämmön kulutuksen vaihtelu kuukausitasolla Suomessa (Koskelainen et al. 2006, 41)

Kaukolämmityksen piiriin kuuluvan alueen tehotarpeen määrittämisessä on olennaista ottaa huomioon eri asuntojen ja asiakastyypin lämmön tarpeiden osuminen eri ajankohdiiin. Kulutushuippujen eriaikaisuus johtuu pääasiassa erilaisista käyttövesitarpeista, sillä asuntojen lämmitystarve ei merkittävästi vaihtelee samantyyppisissä asunnoissa. Kulutushuippujen eriaikaisuus aiheuttaa sen, että koko verkon huippukulutus on pienempi kuin asiakkaiden kulutushuippujen summa. Tätä kuvataan risteilykertoimella, joka on verkkoon liitettyjen kohteiden huipputehojen summan ja koko verkon toteutuneen huipputehon suhde. Mitä useampi kohde verkkoon liitetään sitä pienempi risteilykerroin on. (Koskelainen et al. 2006, 62-63.)

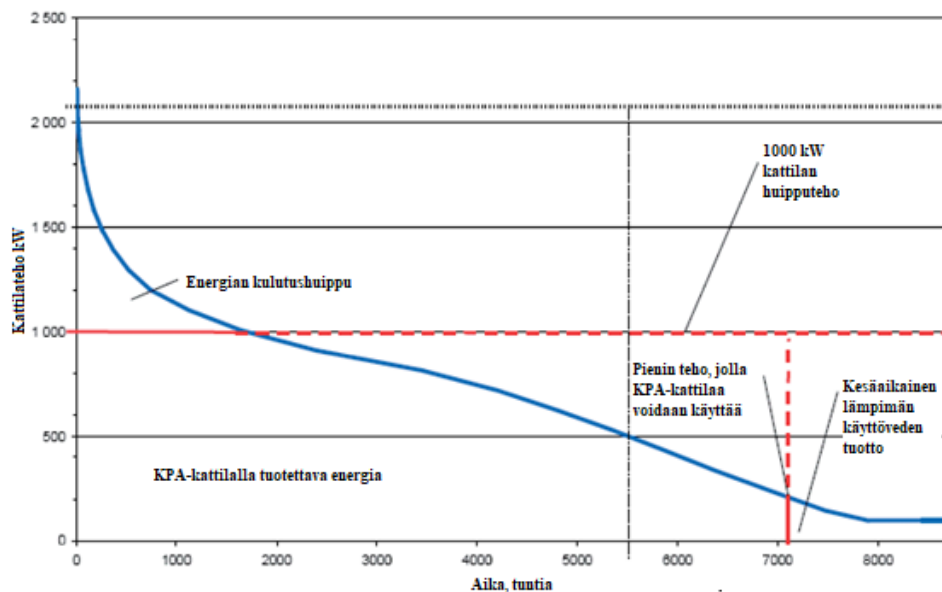
Yksittäisen rakennuksen lämmitystehon tarpeeseen vaikuttaa merkittävästi sen energiatehokkuus. Uudet rakennusten energiatehokkuusdirektiivit asettavat tiukempia vaatimuksia rakennuksille ja uudisrakennusten on oltava vuodesta 2021 alkaen lähes nollaenergiarakennuksia. Rakennuskannan muuttuminen entistä energiatehokkaammaksi vähentää lämmitystarvetta, jolloin myös kaukolämmön kulutuksen kasvu hidastuu. Ennusteiden

mukaan rakentaminen kuitenkin keskittyy tulevaisuudessa entistä enemmän kaupunkeihin, joissa kaukolämmöllä on merkittävä rooli lämmitysenergian tarjoajana. (Vainio et al. 2015, 10, 16, 37.)

2.2 Kaukolämmön tuotanto

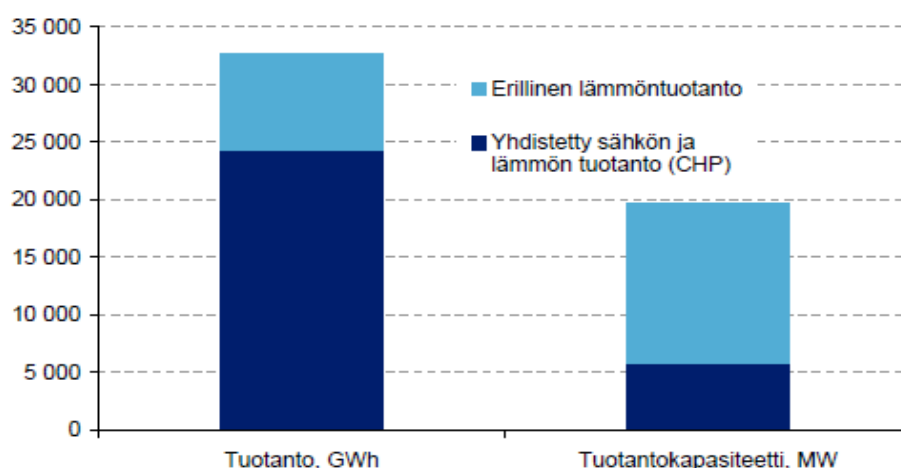
Yksi merkittävä tekijä kaukolämmön kilpailukyvyssä on mahdollisuus tuottaa lämpöä monipuolisesti erilaisilla polttoaineilla ja tekniikoilla. Isoissa kaupungeissa pääasiallinen tapa tuottaa lämpöä kaukolämpöverkossa on CHP. Lisäksi käytetään erillisiä lämmöntuotantolaitoksia ja otetaan talteen hukkalämpöä. Polttoaineina voidaan käyttää sekä uusiutuvia että fossiilisia polttoaineita. Laajoissa kaukolämpöverkoissa on useita erityyppisiä ja tehoisia voimalaitoksia ja lämpökeskuksia, joiden käyttöä optimoidaan kulloisenkin tilanteen mukaan tuotantokustannukset ja tehon tarve huomioiden. (Mäkelä & Tuunanen 2015, 22.)

Kaukolämmön tuotantorakenteeseen vaikuttaa lämmön tarpeen voimakas vaihtelu eri vuodenaikojen välillä. Vuotuinen lämmitysenergia tuotetaan peruskuorma-, huippu- ja varalaitoksilla. Peruskuormalaitoksilla tuotetaan suurin osa vuoden tuotannosta ja nämä laitokset ovat tyypillisesti kiinteän polttoaineen kattilalaitoksia. Laajoissa kaukolämpöverkoissa peruskuormalaitoksena on tyypillisesti CHP-laitos. Peruskuormalaitosta ei mitoiteta kattamaan koko verkon tarvitsemaa tehoa, sillä isoa laitosta ei ole kannattavaa ajaa jatkuvasti osakuormalla. Peruskuormavoimalaitos mitoitetaan yleensä kattamaan noin 40-60 % verkon huipputehosta. Tällöin sillä voidaan tuottaa noin 80-90 % verkon tarvitsemasta energiasta vuositasolla. Pysyvyyskäyrällä kuvataan, kuinka kauan tehon tarve on yli vertailuarvon vuoden aikana. Kaukolämmön tehontarpeen pysyvyyskäyrä on esitetty kuvassa 3. Sinisen käyrän alapuolelle jäävä pinta-ala on kaukolämpöverkon tarvitsema vuosenergia. Peruskuormalla tuotetaan sinisen käyrän ja punaisten vaaka- ja pystyviivojen rajaama alue. Punainen pystyviiva kuvaa peruskuormalaitoksen käytön alarajaa. Huippuvoimalaitoksia käytetään tuottamaan lämpöenergiaa korkean kulutuksen aikaan eli pääasiassa talvella ja silloin, kun peruskuormalaitosta ei ole kannattavaa ajaa. (Koskelainen et al. 2006, 322-323.)



Kuva 3 Kaukolämmön tuotantotehon pysyvyyskäyrä (Koskelainen et al. 2006, 322.)

Vuonna 2017 Suomen kaukolämmön hankinta oli yhteensä 36,6 TWh, josta 68 % tuotettiin yhteistuotannolla, 9 % hukkalämmön talteenotolla ja lämpöpumpuilla ja loput erillistuotannolla. Yhteistuotantosähköä tuotettiin 10,9 TWh. (Energiateollisuus ry 2018a.) Yhteistuotannolla tuotetaan suurin osa kaukolämpöverkkojen energiasta, mutta erillistuotannon kapasiteettia on huomattavasti enemmän johtuen lämmöntuotannon kausivaihtelusta. Tätä havainnollistetaan kuvassa 4.



Kuva 4 Kaukolämmön tuotannon ja tuotantokapasiteetin jakautuminen yhteis- ja erillistuotannon välillä vuonna 2008 (Pöyry 2011, 5)

Kaukolämmössä lämpöä voidaan tuottaa pelkästään lämpöä tuottavilla lämpökeskuksilla

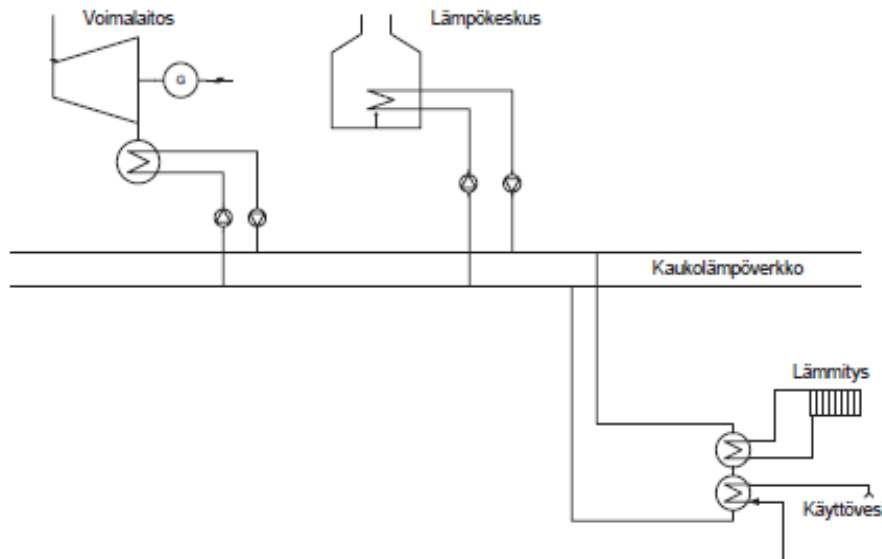
sen hillitsemiseksi asetetuista päästörajoista ja tuotannon polttoainekustannuksien kehityksestä. Fossiilisia polttoaineita verotetaan yhä enemmän ja Euroopan päästökauppajärjestelmän päästöoikeuksien hinnat ovat nousseet järjestelmään tehtyjen uudistusten myötä. Fossiilisia polttoaineita käyttävien tuotantolaitosten merkittävä polttoainekustannusten nousu alentaa niiden kannattavuutta ja aiheuttaa kaukolämpöön hinnankorotuspaineita heikentäen kaukolämmön kilpailukykyä. Esimerkiksi öljyä käytetään enää nykyään vain harvoin käytettävissä huippu- ja varateholaitoksissa sekä tukipolttoaineena, vaikka ennen se oli merkittävin polttoaine kaukolämmössä. Kaukolämmön kannattavuuden kannalta onkin siis järkevää mahdollisuuksien mukaan siirtyä uusiutuviin polttoaineisiin ja hyödyntää enenevässä määrin hukkalämpöjä. Haasteita tähän aiheuttaa kaukolämmön investointien pitkäaikaisuus, jolloin tuotantorakenteeseen ei voida tehdä lyhyellä aikavälillä muutoksia ilman huomattavia taloudellisia menetyksiä. (Pöyry 2011, 12-14.)

2.3 Kaukolämmön jakelu

Kaukolämpöverkosto koostuu kolmesta pääosasta: kaukolämmön tuotanto, jakeluverkosto ja asiakas. Kuvassa 6 esitetään Suomessa käytössä olevan kaksiputkijärjestelmän toimintaperiaate. Verkostossa on meno- ja paluuputki, jotka ovat samankokoisia ja kulkevat yhdensuuntaisina. Kuuma vesi siirtyy tuotantolaitokselta menoputkea pitkin asiakkaalle, jossa vesi jäähtyy luovuttaen lämpöä asiakkaan kiinteistöön. Jäähtymisen jälkeen vesi palaa paluuputkea pitkin tuotantolaitokselle uudelleen lämmitettäväksi. Menopuolen lämpötila on yleensä 65-120 °C ja paluupuolen 40-60 °C. Veden kiertämisen takaamiseksi verkon painetta nostetaan tuotantolaitosten pumppujen lisäksi välipumppaamoilla. Suomessa käytössä olevassa epäsuorassa kytkennässä kaukolämpöverkossa kiertää sama vesi ja asiakkaan kiinteistössä on oma vesikiertonsa. Suorassa kytkennässä kaukolämpöverkon vesi kiertää asiakkaan lämmönkulutuslaitteissa. (Koskelainen et al. 2006, 43)

Kaukolämmitys on kannattavinta tiheästi rakennetuilla alueilla. Kannattavuuden rajana voidaan pitää 0,5 GWh/johto-km/vuosi. Luku kuvaa myytyä energiaa vuodessa johtokilometriä kohden. Kunnissa kaukolämpöverkosta on rakennettu lähinnä ydinkeskustan alueella, mutta kaupungeissa verkosto ulottuu laajemmalle. (Vainio et al. 2015, 36.) Kaukolämpöverkosta kannattaa rakentaa korkean energiatiheiden alueille, sillä silloin tuotetusta lämmöstä saadaan välitettyä asiakkaille suurempi osa. Osa lämmöstä menetetään

aina lämpöhäviöiden myötä ja pitkät välimatkat asiakkaiden välillä lisäävät lämpöhäviöiden osuutta tuotetusta lämmöstä. (Koskelainen et al. 2006, 203.)



Kuva 6 Yksinkertainen kuvaus kaksiputkijärjestelmästä (Koskelainen et al. 2006, 43)

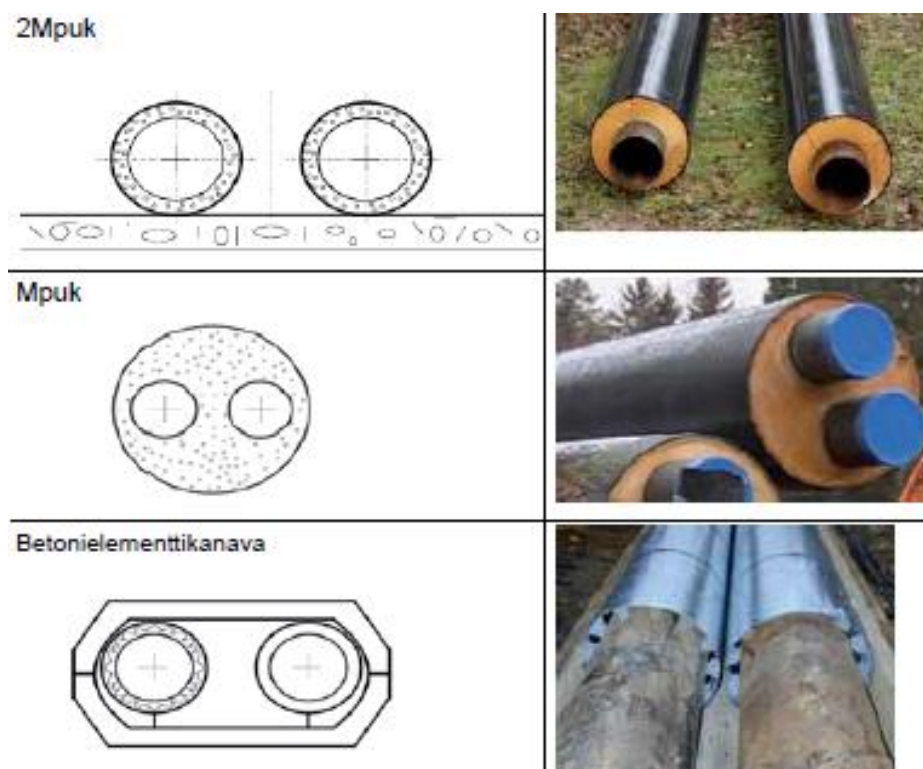
Kaukolämpöverkot kehittyvät yleensä yksinkertaisista puurakenteista kohti silmukoituja ja monimutkaisia verkkoja. Alussa verkot ovat pieniä ja tuotantolaitokselta on vain yksi linja asiakkaille. Pikkuhiljaa erilliset verkot yhdistyvät ja lopulta verkkoon syntyy silmukoita. Kehittyneessä verkossa aiemmin irrallisten verkkojen lämmöntuotantolaitokset jäävät käyttöön huipputeholaitoksiksi ja yhdellä tai useammalla peruskuormalaitoksella tuotetaan koko verkon lämmön tarve. Silmukoidussa verkossa häiriöt eivät aiheuta niin suurta haittaa kuin pienissä verkoissa, sillä asiakkaalle voidaan toimittaa lämpöä useampaa reittiä pitkin. Verkon häntäpäiden asiakkaat ovat kriittisiä asiakkaita eli verkon lämpötilat ja paineet tulee mitoittaa heidän mukaansa. Häntäpäät aiheuttavat ongelmia matkailun kulutuksen aikoina, sillä ilman kulutusta vesi seisoo putkessa ja jäähtyy. Ongelmia voidaan vähentää erilaisilla kiertoratkaisuilla. (Koskelainen et al. 2006, 326, 340.)

2.3.1 Kaukolämpöjohdot

Kaukolämpöverkosto muodostuu maan alle asennettavista meno- ja paluuputkista. Erikoistapauksissa johdot voidaan asentaa myös maan päälle siltoihin tai upottaa veden alle. Johdot jaetaan siirto-, runko-, jakelu- ja talojohdoin. Lämmöntuotantolaitosten välillä

on siirtojohtoja ja runko- ja jakelujohdoilla jaetaan kaukolämpövesi siirtojohdoista talojohdoille. Kaukolämpöverkoston kuuluu myös erilaisia kaivoja, joissa johtoihin asennetaan muun muassa sulkuventtiilejä, tyhjennyksiä ja ilmanpoistoja. Kaukolämpöverkon kestävyys on tärkeä tekijä kaukolämmön kannattavuudelle, sillä verkko on kaukolämpöjärjestelmän kallein osa suuren putkimäärän ja rakennuskustannusten vuoksi. Rakentamisen lisäksi myös verkon korjaaminen on kallista, sillä suurin osa verkosta sijaitsee kaupungeissa. Suurin osa Suomessa käytettävistä johdoista on valmistettu teräksestä. Kaukolämpöjohtojen tulee kestää jatkuvaa 120 °C lämpötilaa ja 16 bar painetta ainakin 30 vuotta. Jos putkimateriaalina käytetään muovia, täytyy verkon maksimilämpötila rajoittaa 80 °C lämpötilaan. (Mäkelä & Tuunanen 2015, 50-51, 56.)

Kaukolämpöjohdot voidaan jakaa myös kanavarakenteen mukaan. Johdot rakentuvat yleensä teräksisestä virtausputkesta, eristemateriaalista ja suojakuoresta. Lähes kaikki Suomessa 1980-luvun puolivälin jälkeen rakennetut kaukolämpöjohdot ovat kiinnivaahdotettuja johtoja. Ne valmistetaan tehtaalla ja niissä on teräksinen virtausputki, polyuretaanieriste ja polyeteenimuovinen suojakuori. Niiden rakenne on standardisoitu, joten eri valmistajien elementit sopivat yhteen. Elementtien käsittely on helppoa, niiden laatu on helppo pitää tasaisena eikä maan painuminen vaikuta johdon toimintaan. Lisäksi suojakuoren rikkoontumisesta johtuva korroosio rajoittuu vain rikkoontumiskohtaan. Johdot asennetaan kitkakiinnitteisesti, jolloin putkissa esiintyy lämpötilamuutosten takia jännityksiä käyttöolosuhteissa, mikä täytyy suunnitteluvaiheessa huomioida. Yksiputkijohdossa (2Mpuk) meno- ja paluuputki ovat omien suojakuoriensa sisällä, kun taas kaksiputkijohdossa (Mpuk) virtausputket ovat saman suojakuoren sisällä. Kaksiputkijohdossa lämpöhäviöt ja materiaalarve ovat pienemmät kuin yksiputkijohdossa, mutta niitä valmistetaan vain nimelliskokoon DN 2x200 asti. Johtotyypit on esitetty kuvassa 7. Johtoihin voidaan myös asentaa elektroninen kosteudenvälöntäjäjärjestelmä. (Koskelainen et al. 2006, 137-139, 142.)



Kuva 7 Kiinnivaahdotettujen yksi- ja kaksijohtoputkien ja betonielementtikanavan tyypipiirustukset vasemmalla ja kuvat oikealla (Mäkelä & Tuunanen 2015, 57, mukaillen)

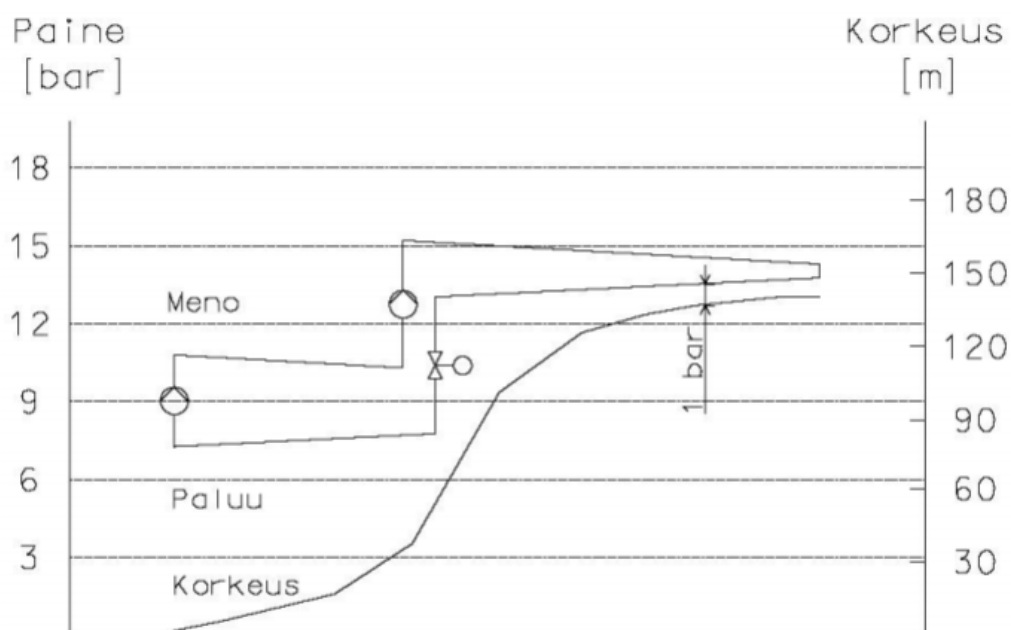
Ennen kiinnivaahdotettuja putkia käytettiin yleisesti betonielementtikanavia, joita on vielä runsaasti maassa. Kuvassa 7 alimpana on havainnekuva betonielementtikanavasta. Kanavat rakennetaan erillisistä betonisista ala- ja yläelementeistä, kannakkeiden varaan asennettavista teräksisistä virtausputkista ja eristeestä. Yleisimmät eristeet ovat mineraalivilla ja polyuretaanikouru. Eristeen ja betonikanavan väliin jäävä tila mahdollistaa tuuletuksen ja rakenteisiin päässeen veden valumisen kaukolämpökaivoon. Lämpölaajenemisesta johtuva liike ohjataan ohjausosilla kanavan suuntaiseksi ja lämpölaajeneminen kompensoidaan palkeilla. Betonikanavissa on kuitenkin suuret lämpöhäviöt, rakentamisen haasteellisuus ja korroosion leviäminen laajalle vuototapauksissa. (Mäkelä & Tuunanen 2015, 59-60.)

2.3.2 Pumppaus

Kaukolämmityksessä pumppauksella vastataan asiakkaiden kulutuksen määrittämään tehotarpeeseen. Verkon meno- ja paluupuolen paine-erolla pidetään yllä tarvittavaa vesikiertoa. Jokaiselle asiakkaalle on taattava vähimmäispaine-ero 0,6 bar. Liian korkea

paine-ero aiheuttaa ongelmia ja kovaa ääntä asiakaslaitteissa, joten asiakkaan paine-ero ei saa olla yli 4 bar. Paine-eron suhteen kriittiset asiakkaat sijaitsevat yleensä verkon hantäkohdissa kaukana tuotantolaitoksista. Ongelmia saattaa esiintyä myös ahtaiden kaukolämpöjohtojen päissä. Verkon paine-ero tuleekin säätää näiden asiakkaiden mukaan. Joissain tapauksissa asiakaslaitteiston yli saattaa olla myös liian suuri paine-ero, jos asiakas sijaitsee esimerkiksi lähellä tuotantolaitosta. Tällöin painetta tulee rajoittaa paineenalennusventtiilillä ennen asiakasta. Muut kaukolämpöverkon pumppauksen suunnittelussa huomioon otettavat painerajoitukset ovat putkiston maksimipaine 16 bar ja tapauskohtainen minimipaine. Minipaineen tunteminen on tärkeää pumppujen kavitoinnin ja veden höyrystymisen estämiseksi. Veden höyrystyminen aiheuttaa paineiskuja putkistoon ja saattaa rikkoa laitteita. Siksi veden paine ei saa laskea alipaineen puolelle. (Energiateollisuus ry 2011, 1-2.)

Pumppauksen suunnittelussa tulee huomioida kaukolämpöverkon alueen maaston muodot ja verkon tehon vaihtelu. Putkessa vallitseva todellinen paine on painekuvaajan ja maastoprofiilin välinen ero. Putkiston maksimipaine voi muodostua rajoittavaksi tekijäksi, jos kaukolämpöverkon alueella on suuria korkeusvaihteluita, veden tulisi kiertää pitkissä kaukolämpöjohdoissa tai verkossa on ahtaita johto-osuuksia. Tällöin viimeisten asiakkaiden tarvitsemaa paine-eroa ei voida tuottaa pelkästään tuotantolaitoksen pumppuilla ja on rakennettava välipumppaamoja sopiviin kohtiin. Kuvassa 8 on esitetty tapaus, jossa asiakas sijaitsee mäen päällä ja verkon maksimipaine ylittyisi, jos asiakkaan tarvitsema paine-ero yritettäisiin tuottaa vain tuotantolaitoksella. Kuvaan on merkitty mäen päällä vallitseva putken todellinen paine. Tilanteessa mäkeen rakennetaan välipumppaamo ja menopuolelle asennetaan pumppu ja paluupuolelle kuristusventtiili. (Energiateollisuus ry 2011, 2-4.)



Kuva 8 Kaukolämpöverkon painetasokuvaaja tapauksessa, jossa asiakas sijaitsee mäen päällä
(Energiateollisuus ry 2011, 9)

Välipumppaamojen avulla voidaan myös säästää pumppauskustannuksissa. Kaukolämmössä käytetään yleensä keskipakopumppuja. Pumpun tehontarpeen määrittää hyötysuhde, virtaama ja tuotettava paine-ero. (Koskelainen et al. 2006, 170.)

$$P_{\text{pump}} = \frac{\dot{m}gH}{\eta_{\text{pump}}} = \frac{\rho\dot{V}gH}{\eta_{\text{pump}}} = \frac{\dot{V}\Delta p}{\eta_{\text{pump}}} \quad (1)$$

missä

P_{pump}	pumpun teho	[W]
\dot{m}	massavirta	[kg/s]
g	putoamiskiihtyvyys	[m/s ²]
H	nostokorkeus	[m]
η_{pump}	pumpun hyötysuhde	
ρ	tiheys	[kg/m ³]
\dot{V}	tilavuusvirta	[m ³ /s]
Δp	paine-ero	[Pa]

Yhtälöstä 1 nähdään, että tuotantolaitoksella, jossa veden virtaama on suurin, ei kannatta tuottaa koko verkon tarvitsemaa paine-eroa. Välipumppaamojen avulla paine-eron tuotto

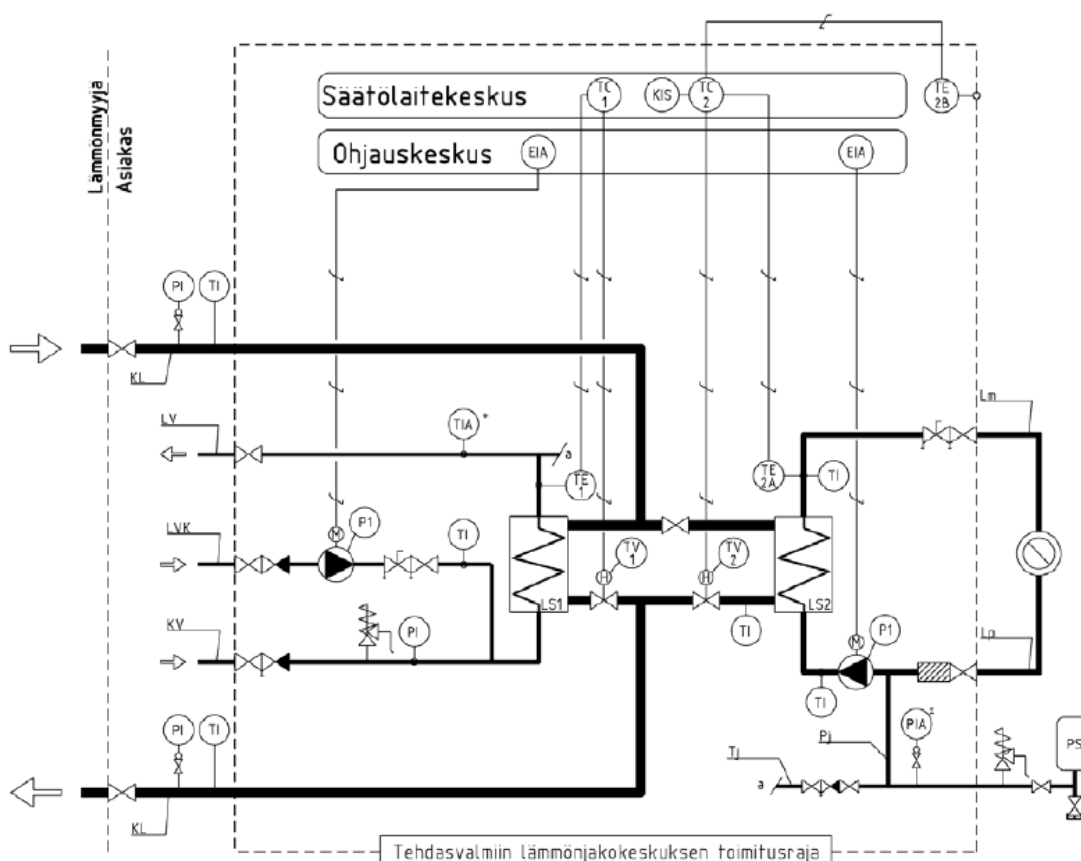
voidaan jakaa useampaan kohtaan. Ne kannattaa sijoittaa mäkien alle ja kriittisiin haaroihin. Tällöin pumppaamon kohdalla virtaama on pienempi kuin päälinjassa ja pumppujen tehontarve on pienempi. Näin pumppauskustannukset pienenevät verrattuna siihen, että koko massavirta pumpataan kriittisen haaran tarvitsemaan paineeseen. Välipumppaamoilla voidaan myös hallita verkon painetasoa. Kustannuksien kannalta verkon painetaso kannattaa pitää mahdollisimman alhaisena, mutta kuitenkin höyrystymispaineen yläpuolella. Pumppausta suunniteltaessa on syytä varautua myös tulevaisuudessa mahdollisesti lisääntyvään tehontarpeeseen huomioiden kuitenkin säätöalueen hyötysuhde. Pumppauksen säätömahdollisuuksia voidaan lisätä kytkemällä pumppuja rinnan tai sarjaan. Sarjaankytkennällä saadaan lisää säätömahdollisuuksia nostokorkeudelle ja rinnankytkennällä vesimäärälle. (Energiateollisuus ry 2011, 4-6, 8.)

2.3.3 Asiakas

Asiakas on kaukolämpöketjun viimeinen osa. Kaukolämmön tuottaja luovuttaa asiakkaan tarvitseman lämmön lämmönjakokeskuksessa, jossa toisiopuolen vettä lämmitetään lämmönsiirtimissä. Lämpimälle käyttövedelle ja huonetilojen lämmitykselle on omat lämmönsiirtimensä, sillä halutut lämpötilat ja kulutus eroavat toisistaan. Lämmönjakokeskukseen kuuluvat lämmönsiirtimet, säätökeskus, pumput, mittalaitteisto ja muut laitteet. Tuotantolaitoksilla säädetään menoveden lämpötilaa ulkolämpötilan perusteella ja verkon painetta, mutta lämmönjakokeskuksen säädöillä ja asiakkaiden kulutuksella säädetään virtaamaa. Kaukolämmityksessä on tärkeää, että lämmönjakokeskuksen laitteet mitoitetaan jokaiseen kohteeseen yksilöllisesti, sillä laitteiden toiminta vaikuttaa erittäin paljon kaukolämpöveden jäähtymään. Parempi jäähtymä alentaa pumppauskustannuksia ja lämpöhäviöitä sekä yhteistuotannossa lisää yhteistuotantosähkön tuotantoa. (Mäkelä & Tuunanen 2015, 64-65.)

Kuvassa 9 esitetty lämmönjakokeskuksen peruskytkentä rakennuksille, joiden lämmitystehotarve on yli 30 kW tai käyttövesiteho yli 120 kW. Se on kaikkiin uusiin rakennuksiin valittava kytkentätapa lukuun ottamatta pientaloja. Kuvassa TI tarkoittaa lämpötilan mittausta, PI paineen mittausta, A hälytystä ja C säätöä. Lämmitysverkoston menoveden lämpötilaa säädetään säätökeskuksella TC2. Se liikuttaa säätöventtiiliä TV2 menoveden

lämpötila-anturin TE2A ja ulkoilman lämpötila-anturin TE2B perusteella siten, että lämmitysverkoston menoveden lämpötila pysyy haluttuna. Lämmitysverkostoon tulee asentaa paisuntasäiliö kompensoimaan lämpötilan muutosten aiheuttamaa tilavuuden muutosta. Lämpimän käyttöveden säätö toimii vastaavasti. (Energiateollisuus ry 2014a, 29, 32)



Kuva 9 Lämmönjakokeskuksen peruskytkentä lämpimälle käyttövedelle ja lämmitykselle (Energiateollisuus ry 2014a, 32)

Lämmönjakokeskuksen mitoittamiseen vaikuttavat tarvittava lämpöteho, vesivirta ja sallittu korkein kokonaispainehäviö asiakaslaitteistossa. Energiateollisuus ry:n julkaisussa K1 (2014a, 8, 12) on määritetty uudisrakennusten lämmönsiirtimien mitoituslämpötilat. Radiaattoreiden menopuolen lämpötila ei saa ylittää 45 °C muutoin kuin perustelluissa poikkeustapauksissa. Ilmanvaihdossa maksimimitoituslämpötila on 60 °C ja lattialämmityksessä 35 °C. Käyttöveden lämmönsiirrin mitoitetaan siten, että tuotettu käyttövesi on mitoitusvirtaamalla 58 °C ja aina välillä 55-65 °C. Tällä varmistetaan bakteerien kuole-

minen käyttövedestä, mutta ei anneta sen lämmetä käyttäjälle vaarallisen kuumaksi. Toi-siopuolen vaatimukset määrittävät ensiöpuolen lämpötilan, joka vaikuttaa koko kauko-lämpöverkkoon ja sen säätämiseen.

2.4 Lämmön varastointi

Lämmön varastoinnilla voidaan saavuttaa useita hyötyjä kuten lisätä energiatehokkaiden ja ympäristöystävällisten CHP-laitosten käyttöä, vähentää lämmön tarpeen vaihtelusta johtuvaa huipputehon käynnistämistä ja alentaa energiantuotantokustannuksia. Lämmön varastoinnilla voidaan siirtää lämmön tuotantoa kulutushuippujen kalliista tuotannosta edullisempaan yöaikaan. Peruskuormalla ladataan yöllä varastoja ja puretaan niitä päi-vällä kulutushuippujen aikaan, jolloin voidaan vähentää fossiilisilla polttoaineilla käyvien huipputeholaitosten käynnistyksiä. Varastojen lataaminen mahdollistaa myös yhteistuo-tantosähkön tuotannon lisäämisen. Lämmön varaaminen vähentää siis kaukolämmön kus-tannuksia ja primäärienergian käyttöä. (Verda & Colella 2011, 4278-4279.)

Lyhytaikaisesti lämpöä voidaan varastoida erillisiin kuumalla vedellä täytettyihin säiliöi-hin eli lämpöakkuihin, kaukolämpöverkkoon ja rakennuksiin. Lämpöakut voivat olla esi-merkiksi terässäiliötä, kallioluolia tai kaivantovarastoja. Säiliö ladataan varaamalla läm-pöä veteen. Vesi kerrostuu lämpötilatasojen mukaan siten, että lämpimin vesi on säiliön yläosassa. Paineistamattoman säiliön maksimilämpötila on 100 °C veden kiehumisen es-tämiseksi ja paineistetun säiliön lämpötila voidaan nostaa jopa yli verkon maksimiläm-pötilan. Lämpöakkujen ongelmana on kaukolämpöjärjestelmän lämpöhäviöiden lisäänty-minen. (Koskelainen et al. 2006, 386-389.) Kaukolämpöverkon varaamisessa hyödynne-tään veden virtausnopeuden hitautta. Kuuma kaukolämpövesi saapuu asiakkaalle vii-veellä lämpötilan nostosta tuotantolaitoksella, jolloin veden lämpötilaa voidaan nostaa ennalta kulutuspiikin kattamiseksi. Kaukolämpöverkon varaaminen voi kuitenkin aiheut-taa putkien enneaikaista väsymistä. Rakennuksia voidaan käyttää lämpövarastoina läm-mittämällä niitä jaksottain liikaa tai liian vähän aiheuttaen pieniä huomaamattomia muu-toksia rakennuksen sisälämpötilassa. Rakennuksien varaaminen toimii parhaiten raskas-rakenteisissa rakennuksissa. (Kensby et al. 2014, 774, 781.)

2.5 Tulevaisuus

Kaukolämpöä on käytetty kiinteistöjen lämmitykseen jo 1900-luvun puolesta välistä asti. Niistä ajoista kaukolämpö on kehittynyt kohti energiatehokkaampaa suuntaa ja jakelulämpötilat ovat alentuneet. Siirtyminen nykyisestä kaukolämmön kolmannesta sukupolvesta kohti neljättä sukupolvea ja entistä matalampia lämpötiloja ja uusia palveluja on käynnissä. Uudet säädökset rakennusten energiatehokkuudelle vähentävät lämmityksen tarvetta samalla, kun asiakkaat ovat entistä kiinnostuneempia hyödyntämään uusiutuvia energianlähteitä lämmön hankinnassaan. Tämä aiheuttaa kaukolämmölle haasteita ja tarpeen kehittää uusia toimintamalleja sekä painottaa nykyisen järjestelmän helppoutta ja toimintavarmuutta. Kaukolämpöverkon joustavuutta ja älykkyyttä tulee lisätä. Reaaliaikaisemmalla mittauksella tuotantoa ja kulutusta voidaan optimoida ja ohjata paremmin. Lisäksi se mahdollistaa uusien hinnoittelumallien kehittämisen. (Pesola et al. 2011, 4.)

Neljännän kaukolämpösukupolven myötä verkon jakelulämpötilat tulevat alenemaan, kun tavoitellaan entistä pienempiä lämpöhäviöitä. Todennäköisesti kaukolämpöverkon hajautetun tuotannon määrä tulee kasvamaan, kun verkkoon integroidaan hybridijärjestelmiä. Matalalämpötilaiset kaukolämpöverkot helpottavat hajautettujen tuotantomuotojen, kuten aurinkoenergian ja geotermisen energian integroimista kaukolämpöverkkoon. Potentiaalisesti aurinkolämmöllä ja siihen yhdistetyllä lämmön varastoinnilla voitaisiin tuottaa osa talven huippukulutuksien energiasta tai kattaa koko kesäajan lämpimän käyttöveden tarve, jos systeemi mitoitetaan oikein. Hybridijärjestelmien lisäämisestä aiheutuu mahdollisuuksien lisäksi myös haasteita. Verkon hyvän ja taloudellisen toiminnan kannalta eri teknologioiden rinnakkaiskäytön optimointiin ja eri lämpötilatasojen yhdistämiseen tulee kiinnittää erityistä huomiota. (Pesola et al. 2011, 34-35; Paiho & Reda 2016, 919-921.)

Matalammat lämpötilatasot verkossa mahdollistavat useampien ylijäämälämpöjen hyödyntämisen. Kaukolämmössä hyödynnetään jo nyt teollisuuden ja datakeskusten hukkalämpöjä, mutta jatkossa myös esimerkiksi taloyhtiöiden ylimääräistä lämpöä ja kolmansien osapuolien tuotantoa voitaisiin ostaa. Tätä kutsutaan kaksisuuntaiseksi kaukolämpökaupaksi tai verkon avaamiseksi. Kaksisuuntaisen kaukolämmön edellytyksenä on, että

kaupan kaikki osapuolet hyötyvät siitä eikä järjestelmään liity kohtuuttoman paljon sääntelyä. Verkkojen avaaminen voisi parhaimmillaan lisätä verkon energiatehokkuutta ja lisätä kaukolämmön kiinnostavuutta asiakkaiden silmissä. Verkon avaaminen edellyttää uusien toiminta- ja hinnoittelumallien kehittämistä, tarkempia mittausjärjestelmiä ja tuotannon uudenlaista optimointia, joten ainakin alkuvaiheessa avaamisesta syntyy lisäkustannuksia. Kaukolämmön tuotanto on nykyisellään energiatehokasta ja kilpailukykyistä, joten verkkojen avaaminen vaatii pienimuotoisen tuotannon kustannustehokkuuden parantamista. (Pöyry 2016, 41-44.)

3 PAINE- JA LÄMPÖHÄVIÖT KAUKOLÄMPÖVERKOSSA

Kaukolämmön jakelussa syntyy lämpö-, paine- ja vuotohäviöitä. Kaukolämpöveden vuotaminen putkistosta aiheuttaa vesihävikkiä ja lisäksi vuotavan veden mukana verkosta poistuu myös lämpöä. (Koskelainen et al. 2006, 209-210.) Lämpö- ja painehäviöiden syitä käsitellään tarkemmin seuraavissa alaluvuissa.

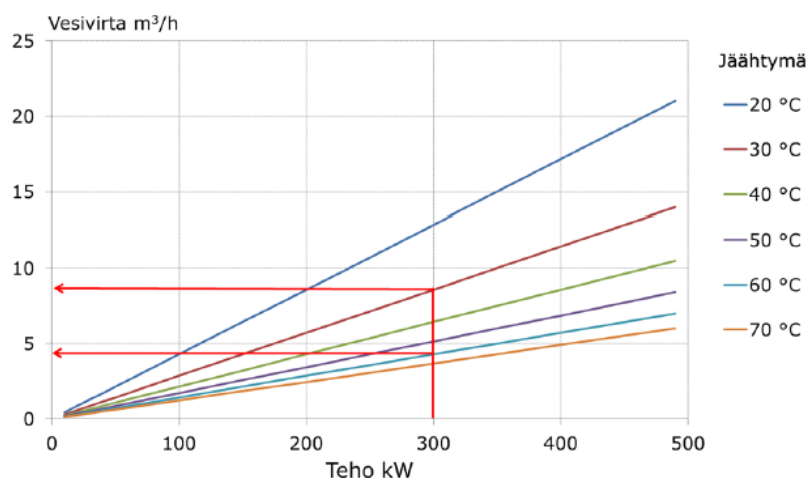
Kaukolämpöverkon päämitoituspäätteenä on erilaisissa käyttötilanteissa siirrettävä kaukolämpöteho. Kaukolämpötehoon vaikuttaa asiakaslaitteiden jäähdityskyky ja verkossa kiertävä vesimäärä.

$$\Phi = c_p \dot{m} \Delta T = c_p \rho \dot{V} \Delta T \quad (2)$$

missä

Φ	lämpöteho	[kW]
c_p	ominaislämpökapasiteetti	[kJ/kgK]
T	lämpötila	[K]

Kaukolämpöteho voidaan laskea yhtälöllä 2, josta nähdään, että tehonsiirtokykyä rajoittaa veden tilavuusvirta ja siten putkikoko, menolämpötilan yläraja ja asiakaslaitteiden tuotama jäähtymä. Tuotantolaitoksilla voidaan säätää vain verkon menolämpötilaa, jonka ylärajana on verkon rakennelämpötila 120 °C. Kaukolämpöteho määräytyy siis pitkälti asiakaslaitteiden jäähtymän ja niiden tarvitseman vesimäärän mukaan. (Koskelainen et al. 2006, 198-199.) Kuvassa 10 on esitetty jäähtymän, vesivirran ja kaukolämpötehon riippuvuus toisistaan.



Kuva 10 Vesivirta kaukolämpötehon ja eri jäähtymien funktiona (Energiateollisuus ry 2014b, 22)

Kuvasta 10 nähdään, että paremmalla jäähtymällä verkossa kiertävä vesimäärä on merkittävästi pienempi. Kuvan esimerkissä jäähtymän noustessa 30 asteesta 60 asteeseen saman kaukolämpötehon toimittamiseen tarvittava vesivirta pienenee jopa puoleen. Lämpötilojen ja verkon virtauksen riippuvuus toisistaan vaikuttaa kaukolämpöverkon optimointiin, sillä molempien kasvu lisää osaltaan häviöitä. Siksi monimutkaisten verkkojen suunnittelussa käytetään apuna tietokoneohjelmia. (Energiateollisuus ry 2014b, 22)

3.1 Painehäviöiden syyt ja niiden pienentäminen

Painehäviöt johtuvat veden virtauksen kohtaamasta vastuksesta. Putken pinnan karheus aiheuttaa kitkapainehäviöitä, joihin vaikuttaa eniten veden virtausnopeus. Jos kaukolämpöverkko mitoitetaan liian pienille putkikoille, kasvavat virtausnopeus ja kitkapainehäviöt. Samalla kasvaa myös verkon tarvitsema pumppaustyö ja pumppauskustannukset. Suuremmilla putkikoilla kitkapainehäviöt ovat siis pienempiä virtausnopeuden pysyessä maltillisempana. Verkkoon ei kuitenkaan tule valita liian isoja putkia, jolloin vaarana on verkon ylimitoittaminen ja virtauksen hidastuminen tarpeettoman paljon. Ylimitoittaminen aiheuttaa etenkin kesällä ongelmia tehontarpeen ollessa alhainen. Putkissa seisova vesi lisää myös verkon lämpöhäviöitä. Suuremmat putket lisäävät myös verkon rakennuskustannuksia. Verkon laajentuessa ja virtauksen kasvaessa saattaa verkkoon syntyä pullonkauloja aiemmin tarpeeksi suurien putkien käydessä ahtaiksi. Ne aiheuttavat huomattavia painehäviöitä. Verkon laajentumisen aiheuttamaa vesivirran kasvua voidaan

kompensoida parantamalla asiakaslaitteiden jäähtymää. Suurempi lämpötilaero meno- ja paluupuolen välillä pienentää tarvittavaa vesivirtaa ja vähentää näin painehäviöitä. (Koskelainen et al. 2006, 198-201.)

Kaukolämpöverkon painehäviöt koostuvat kitka- ja kertavastushäviöistä. Kertavastushäviöitä syntyy, kun erilaiset venttiilit, lämmönsiirtimet ja putkimutkat vastustavat veden virtausta. Kertavastukset kuristavat virtausta ja näiden kuristushäviöiden osuus kokonaispainehäviöistä on kannattavaa pitää mahdollisimman pienenä. Kuristushäviöt voidaan minimoida pitämällä verkon painetaso ja veden virtausnopeus mahdollisimman alhaisena. (Koskelainen et al. 2006, 202.)

Painehäviöt yhdessä verkon korkeuserojen kanssa määrittävät verkon pumppaustyön tarpeen ja pumppaamojen sijoittelun verkkoon. Painehäviöillä on siis merkittävä rooli kaukolämpöverkon suunnittelussa. Kaukolämpöverkon mitoituksessa käytetäänkin yleisesti menetelmää, jossa johdot mitoitetaan mitoituspainehäviön mukaan. Eri kokoluokkien johdoille on määritetty sallitut maksimipainehäviöt: talojohdot 1-2 bar/km, runko- ja jakelujohdot 1 bar/km ja siirtojohdot 0,5-1 bar/km. Putkistojen lisäksi lämmönsiirtimille, venttiileille ja muille kaukolämpöverkon laitteille on määritetty suurimmat sallitut painehäviöt. (Koskelainen et al. 2006, 155-156.)

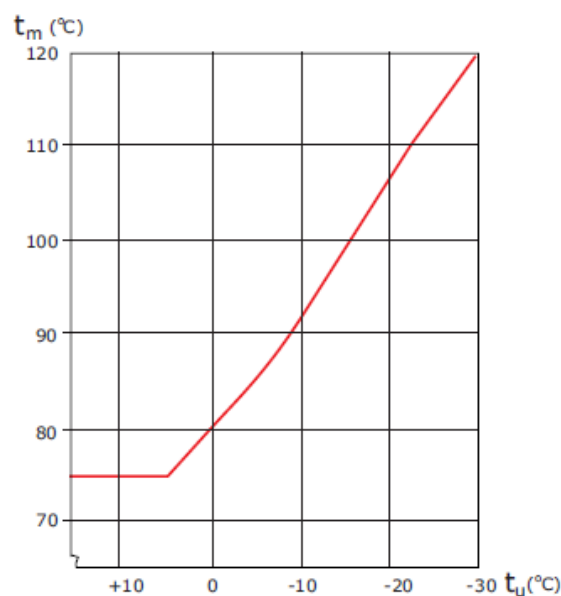
3.2 Lämpöhäviöiden syyt ja niiden pienentäminen

Lämpöhäviöitä syntyy verkon ja ympäristön suuresta lämpötilaerosta johtuen ja häviöiden suuruuteen voidaan merkittävästi vaikuttaa lämpötilasäädöllä ja eristyksellä. Pienten verkkojen lämpöhäviöt ovat noin 10-20 % ja suurten verkkojen 4-10 % keskimääräisillä putkikoilla DN 50 ja DN 150. Ero häviöiden suuruusluokissa johtuu putkikoista. Isommissa verkoissa putkikoot ovat keskimäärin suurempia, jolloin lämmönsiirtopinta-ala on pienempi suhteessa verkon siirtokykyyn. (Koskelainen et al. 2006, 203.)

Kaukolämpöverkossa lämpöhäviöiden suuruus riippuu putkikoista, eristepaksuuksista, eristemateriaalista, verkon lämpötilaerosta ympäristöön ja kaukolämpöputkea ympäröivän maan ominaisuuksista. Kaukolämpöjohdoista siirtyy lämpöä konvektiolla maaperään. Lisäksi menojohtodesta siirtyy lämpöä paluujohtoon. Verkoston lämpöhäviöt voidaan

karkeasti arvioida vähentämällä tuotetusta lämmöstä myyty lämpö. Lämmön myynnin suhde lämmön hankintaan on verkostohyötysuhde ja se kuvaa kaukolämpöverkon hyötysuhdetta, verkon kuntoa, eristystasoa ja käytön tehokkuutta. Tarkempaa lämpöhäviöiden määrittämistä varten tulee tuntea verkon johtojen ominaisuudet ja niitä ympäröivät olosuhteet. Lämpöhäviöiden kustannukset ovat lämmön jakelukustannuksista suurin käyttökustannuserä ja siksi niiden minimoimiseksi tehdään jatkuvaa työtä. (Koskelainen et al. 2006, 203, 209.)

Kaukolämpöverkon menolämpötilaa säädetään tuotantolaitoksilla ulkolämpötilan mukaan. Menolämpötila pyritään pitämään mahdollisimman alhaisena kuitenkin niin, että asiakkaiden lämmöntarve saadaan täytettyä. Lämpöhäviöihin vaikuttavat kaukolämpöveden ja putkea ympäröivän maan välinen lämpövastus sekä lämpötilaero maan ja kaukolämpöveden välillä. Lämpöhäviöt ovat lähes suoraan verrannolliset lämpötilaeroon maan ja kaukolämpöveden välillä, sillä veden ja ympäröivän maan välinen lämpövastus muuttuu vain vähän lämpötilaeron muuttuessa. Siksi suurin vaikutus lämpöhäviöihin on kaukolämpöveden lämpötilalla. Kuvan 11 mukaisesti kaukolämmön menolämpötilaa nostetaan ulkolämpötilan laskiessa, jotta kasvanut lämpötehon tarve saataisiin siirrettyä samalla vesivirralla kuin aiemmin. Kuvan käyrä on vuonna 1978 Lämpölaitosyhdistyksen tekemä suositus. (Pöyry 2018, 13-14.)



Kuva 11 Kaukolämmön menoveden lämpötilan ajokäyrä ulkolämpötilan mukaan (Koskelainen et al. 2006, 336)

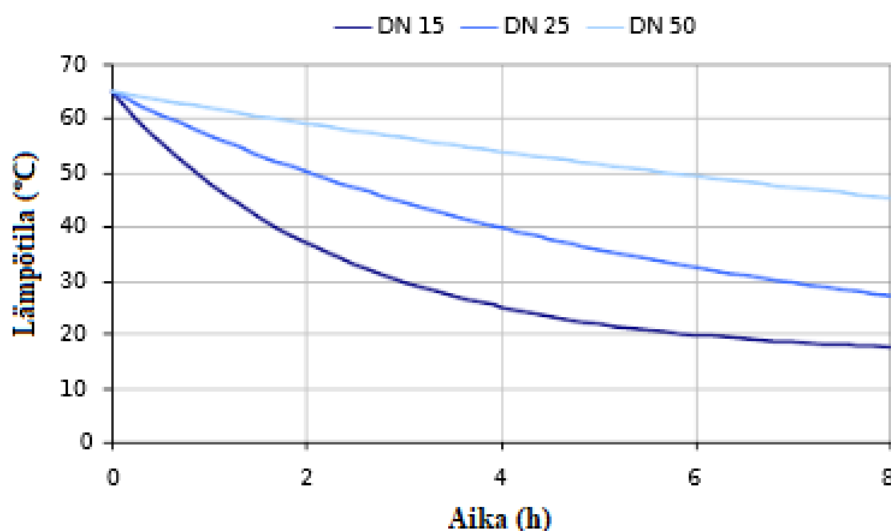
Nykyisissä verkoissa lämpötilan alentamisen esteenä on vesivirtauksen kasvun aiheuttama painehäviöiden kasvu. Painehäviöiden kasvaessa liikaa, ei pumpuilla pystytä tuottamaan enää tarpeeksi suurta painetta. Kesällä kaukolämpöveden alarajana on lämpimän käyttöveden tuottamiseen tarvittava lämpötila, joka on vähintään 65 °C. Paluulämpötila määräytyy menolämpötilan ja asiakaslaitteiden jäähtymän perusteella. (Pöyry 2018, 13-14.)

Kaukolämpöjohtojen eristystyön laatu on kaukolämpöveden lämpötilan jälkeen toiseksi tärkein tekijä lämpöhäviöiden suuruudessa. Eristeen eristävyys vaikuttaa sen materiaali, kosteus, ikä ja lämpötila. Ennen kaukolämpöjohtojen eristeenä käytettiin yleisesti mineraalivillaa, mutta nykyisin lähes kaikissa uusissa johdoissa on polyuretaanieriste sen pienemmän lämmönjohtavuuden takia. Uuden polyuretaanieristeen lämmönjohtavuus on parhaimmillaan 0,023 W/mK. Eristeen lämmönjohtavuus kasvaa sen ikääntyessä, kun soluissa oleva kaasu vaihtuu diffuusion vaikutuksesta ilmaan, jonka lämmönjohtavuus on suurempi kuin alkuperäisen kaasun. Ikääntymisen johdosta eristeen lämmönjohtavuus saattaa 30 vuoden keskimääräisen käyttöiän aikana nousta 10-40 %. Diffuusio on voimakkaampaa pienillä putkikoilla. Eristyspaksuutta ei kuitenkaan kannata lisätä kohtuuttomasti, sillä saavutettava hyöty pienenee suhteessa kustannusten kasvuun. (Schmitt et al. 2007, 11-13, 31)

Muita lämpöhäviöiden suuruuteen vaikuttavia tekijöitä ovat putkien sijoittelu toisiinsa nähden, ympäröivän maan ominaisuudet ja putkien peitesyvyys. Tyypillisesti putket pyritään kaivamaan vähintään 0,5 metrin syvyyteen. Alempi peitesyvyys lisää lämpöhäviöitä, mutta peitesyvyyden merkitys kokonaislämpöhäviöiden kannalta on kuitenkin melko pieni. Putkea ympäröivä maan toimii myös eristeenä ja sen lämmönjohtavuudella voidaan selittää noin 5-35 % lämmönsiirron vastuksesta ja varsinaisen eristeen paksuudella ja ominaisuuksilla loput. Merkittävä vaikutus lämpöhäviöihin varsinkin pienten putkien kohdalla on putkirakenteella. Kaksiputkijohtorakenteella voidaan vähentää kaukolämpöjohdon kokonaislämpöhäviöitä jopa 30-40 %. (Schmitt et al. 2007, 5, 9, 16)

Kaukolämmön jakelussa tärkeää on taata tarvittava lämpö myös verkon kriittisille asiakkaille eli yleensä verkon perällä viimeisissä haaroissa oleville rakennuksille. Menolämpötila tulee säätää heidän mukaansa, mikä saattaa pitkällä etäisyyksillä tarkoittaa turhan

korkeaa menolämpötilaa verkon alkupäässä ja runsaita lämpöhäviöitä. Siksi kaukolämpöverkossa tulisikin pohtia vaihtoehtoisia tapoja tuottaa ainakin osa verkon häntäpäiden lämmön tarpeesta. Verkon loppupään haaroissa ongelmia syntyy erityisesti matalan kulutuksen aikaan esimerkiksi kesällä, kun lämpimän käyttöveden valmistus on ainoa lämmön kulutuksen kohde. Tällöin vesi saattaa seistä putkissa ja lämpöhäviöiden vaikutuksesta jäähtyä tarpeettoman paljon. (Koskelainen et al. 2006, 209, 335-337.) Kuvassa 12 on esitetty, miten seisovan veden lämpötila tippuu erikokoisissa putkissa lämpöhäviöiden johdosta.



Kuva 12 Seisovan veden lämpötilan tippuminen erikokoisissa putkissa (Rämä & Sipilä, 2010)

Jäähtymisen vuoksi verkkojen päihin on rakennettu kiertorakenteita, joilla turvataan käyttöveden tarve. Ne kuitenkin lisäävät lämpöhäviöitä ja nostavat paluueden lämpötilaa. (Koskelainen et al. 2006, 337.) Paluueden lämpötilan nouseminen nostaa pumppauskustannuksia ja paluupuolen lämpöhäviöitä sekä vähentää vastapainesähkön tuotantoa ja savukaasupesurista saatavaa tehoa (Pöyry 2010, 5-10).

3.3 Lämpöhäviöiden laskenta

Lämpöhäviöiden laskentaa tarvitaan kaukolämpöverkon suunnitteluun ja lämpö- ja painetasojen valintaan. Laajat ja silmukoituneet verkot ovat niin monimutkaisia, että niiden mallintamiseen tarvitaan tarkoitukseen erikseen suunniteltuja tietokoneohjelmia. Käsien voidaan laskea yksinkertaisten putkiosuukien häviöitä, jos tunnetaan painetasot osuukien alku- ja loppupäissä. Esiteltävä lämpöhäviöiden laskenta perustuu Kaukolämmön

käsikirjaan. (Koskelainen et al. 2006, 198-207, 211.)

2Mpuk-johtotyypin kokonaislämpöhäviön laskennassa tulee huomioida lämmönsiirto menoputkesta maaperään ja paluuputkeen. Laskentaan vaikuttaa myös putkien sijoitus toisiinsa nähden. Kun putket ovat samalla syvyydellä symmetrisesti, saadaan kokonaislämpöhäviö laskettua lämmönläpäisykertoimien ja lämpötilojen avulla.

$$\Phi'_{\text{tot}} = \Phi'_{\text{m}} + \Phi'_{\text{p}} = 2(K_1 - K_2) \left[\frac{T_{\text{m}} + T_{\text{p}}}{2} - T_{\text{g}} \right] \quad (3)$$

missä

Φ'_{tot}	kokonaislämpöhäviö/pituus	[W/m]
Φ'_{m}	menoputken lämpöhäviö/pituus	[W/m]
Φ'_{p}	paluuputken lämpöhäviö/pituus	[W/m]
K	lämmönläpäisykerroin	
T_{m}	menoputken lämpötila	[K]
T_{p}	paluuputken lämpötila	[K]
T_{g}	häiriöttömän maaperän lämpötila	[K]

Symmetrisessä tapauksessa riittää tuntea lämmönläpäisykertoimien erotus. Lämmönläpäisykerroin riippuvat maaperän, eristeen ja putkien keskinäisen vaikutuksen lämpövastuksista.

$$K_1 - K_2 = \frac{1}{R_{\text{g}} + R_{\text{i}} + R_{\text{kesk}}} \quad (4)$$

missä

R_{g}	maaperän lämpövastus	[mK/W]
R_{i}	eristeen lämpövastus	[mK/W]
R_{kesk}	putkien keskinäinen lämpövastus	[mK/W]

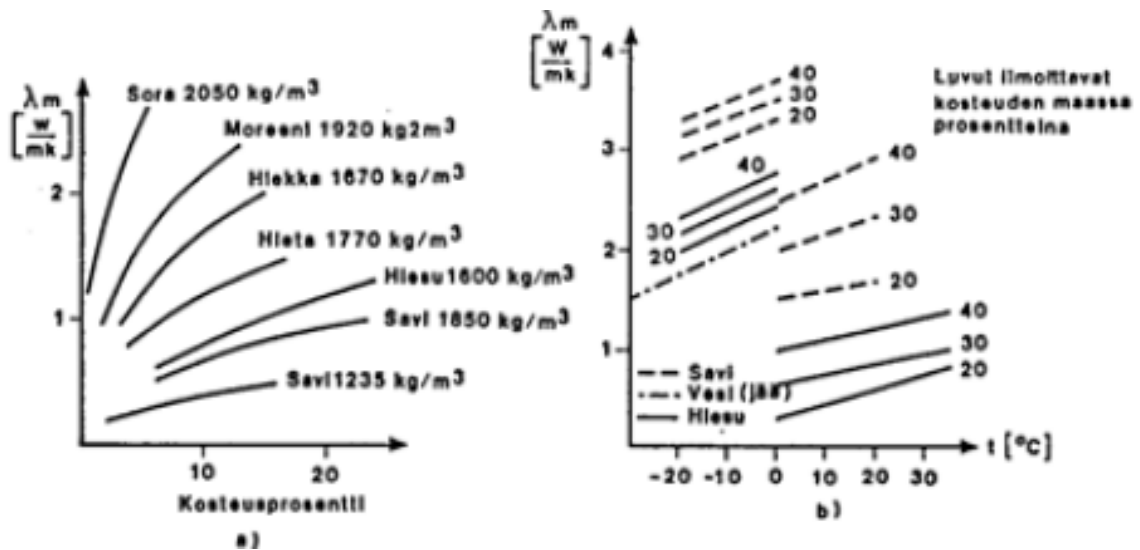
Yhtälössä 4 tarvittava maaperän lämpövastus saadaan, kun tunnetaan maaperän lämmönjohtavuus, putkien upotussyvyys ja putken kuoren ulkohalkaisija. Maaperän lämpövastus lasketaan eristetyille ja eristämättömille putkille eri tavalla, mutta tässä esitetään vain eristetyn putken tapaus, sillä lähes kaikki kaukolämpöputket ovat eristettyjä.

$$R_g = \frac{1}{2\pi\lambda_g} \ln\left(\frac{4H}{D_c}\right) \quad (5)$$

missä

λ_g	maaperän lämmönjohtavuus	[W/mK]
H	putken korjattu sijaintisyvyys	[m]
D_c	putken kuoren halkaisija	[m]

Kaukolämmön lämpöhäviöiden kannalta maaperän huono lämmönjohtavuus on hyväksi. Maaperän lämmönjohtavuuteen vaikuttaa maatyyppeille ja sen kosteus ja lämpötila. Kuvasta 13 voidaan lukea maaperän lämmönjohtavuus eri maatyypeille kosteuden ja lämpötilan funktiona.



Kuva 13 Maaperän lämmönjohtavuuden muuttuminen maaperän laadun, lämpötilan ja kosteuden mukaan (Koskelainen et al. 2006, 203)

Maanpinnan lämpövastus muutetaan ekvivalentiksi maakerrokseksi ja lisätään putken todelliseen sijaintisyvyyteen, jolloin saadaan putken korjattu sijaintisyvyys. Maanpinnan lämmönsiirtokerroin on tyypillisesti 12-15 W/m²K.

$$H = H' + \frac{\lambda_g}{\alpha_{gs}} \quad (6)$$

missä

H'	putken todellinen sijaintisyvyys	[m]
------	----------------------------------	-----

α_{gs} maanpinnan lämmönsiirtokerroin [W/m²K]

Eristettyjen putkien eristeen ja vaipan lämpövastuksen laskennassa tulee huomioida eristeen ja kuoren lämmönjohtavuudet ja putkien dimensiot. Betonikanavan laskennassa tulee lisäksi huomioida eristeen pinnan lämpövastus, jos kanavassa on ilmatila.

$$R_i = \frac{1}{2\pi\lambda_i} \ln \frac{D_i}{D_p} + \frac{1}{2\pi\lambda_c} \ln \frac{D_c}{D_i} + R_{hi} \quad (7)$$

missä

λ_i eristeen lämmönjohtavuus [W/mK]

D_i eristeen ulkohalkaisija [m]

D_p putken ulkohalkaisija [m]

λ_c kuoren lämmönjohtavuus [W/mK]

R_{hi} lämpövastus eristeen pinnalla [mK/W]

betonikanavassa, jossa on ilmatila

Kiinnivaahdotettujen yksiputkijohtojen tapauksessa yhtälö 7 supistuu seuraavaan muotoon, sillä kiinnivaahdotetuille putkille putken kuoren ulkohalkaisija D_c on yhtä suuri kuin eristeen ulkohalkaisija D_i .

$$R_i = \frac{1}{2\pi\lambda_i} \ln \frac{D_i}{D_p} \quad (8)$$

Viimeisenä osana kaukolämpöjohtojen lämpöhäviöiden laskennassa tulee huomioida putkien keskinäinen vaikutus eli lämmönsiirtyminen menoputkesta paluuputkeen.

$$R_{kesk} = \frac{1}{4\pi\lambda_g} \ln \left(1 + \left(\frac{2H}{E} \right)^2 \right) \quad (9)$$

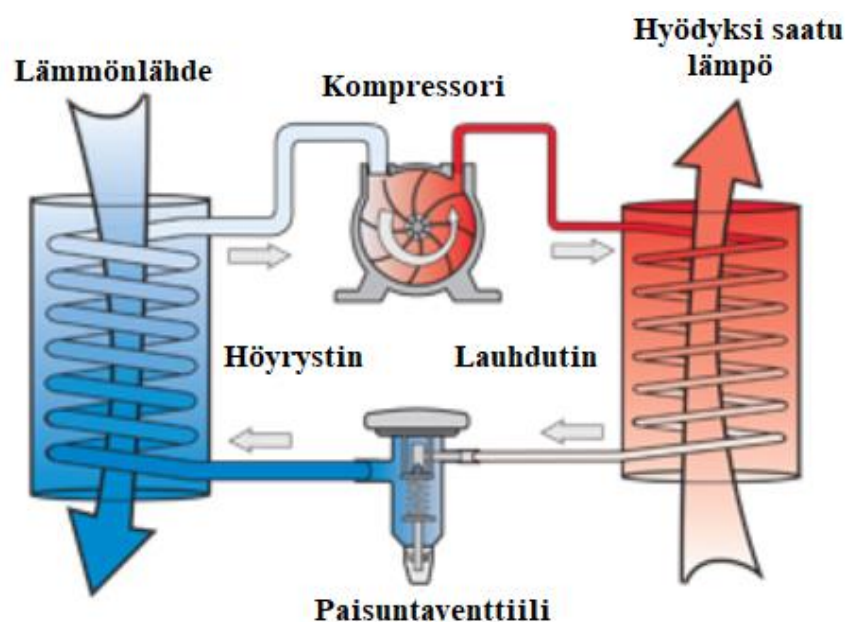
missä

E etäisyys putkien keskipisteiden välillä [m]

Paluujohtoon siirtynyt lämpö ei mene hukkaan vaan palaa tuotantolaitokselle, mutta se lisää kuitenkin tietyn lämpötehon ylläpitämiseksi tarvittavaa tilavuusvirtaa.

4 LÄMPÖPUMPPU

Lämmön luonnollinen siirtymissuunta on aina lämpimämmästä kylmempään. Lämpöpumppu on kone, jolla voidaan siirtää lämpöä työtä tekemällä kylmemmästä lähteestä lämpimämpään. Lämpöpumpuilla voidaan siirtää lämpöä maasta, ilmasta tai vedestä haluttuun kohteeseen. Tyypillisin lämpöpumppu koostuu kuvan 14 mukaisesti höyrystimestä, lauhduttimesta, kompressorista ja paisuntaventtiilistä. Laitteet on yhdistetty putkistolla, jossa kiertää vuoroin lauhtuva ja höyrystyvä kylmäaine. (Hakala & Kaappola 2013, 10.)



Kuva 14 Lämpöpumpun toimintaperiaate (IEA HPT 2018, mukaillen)

Höyrystimessä kylmäaine sitoo itseensä lämpöä lämmönlähteestä ja höyrystyy. Höyrystynyt kylmäaine imetään kompressorin, jossa sen paine nostetaan ja samalla kylmäaineen lämpötila kasvaa. Korkeapaineinen ja –lämpötilainen höyrystynyt kylmäaine lauhtuu lauhduttimessa luovuttaen samalla lämpöä lauhduttimessa kiertävään väliaineeseen. Lopuksi nesteeksi lauhtunut kylmäaine kulkee paisuntaventtiilin läpi takaisin höyrystimeen. Paisuntaventtiilissä kylmäaineen paine ja lämpötila laskevat ja osa kylmäaineesta höyrystyy samalla. (Hakala & Kaappola 2013, 230.)

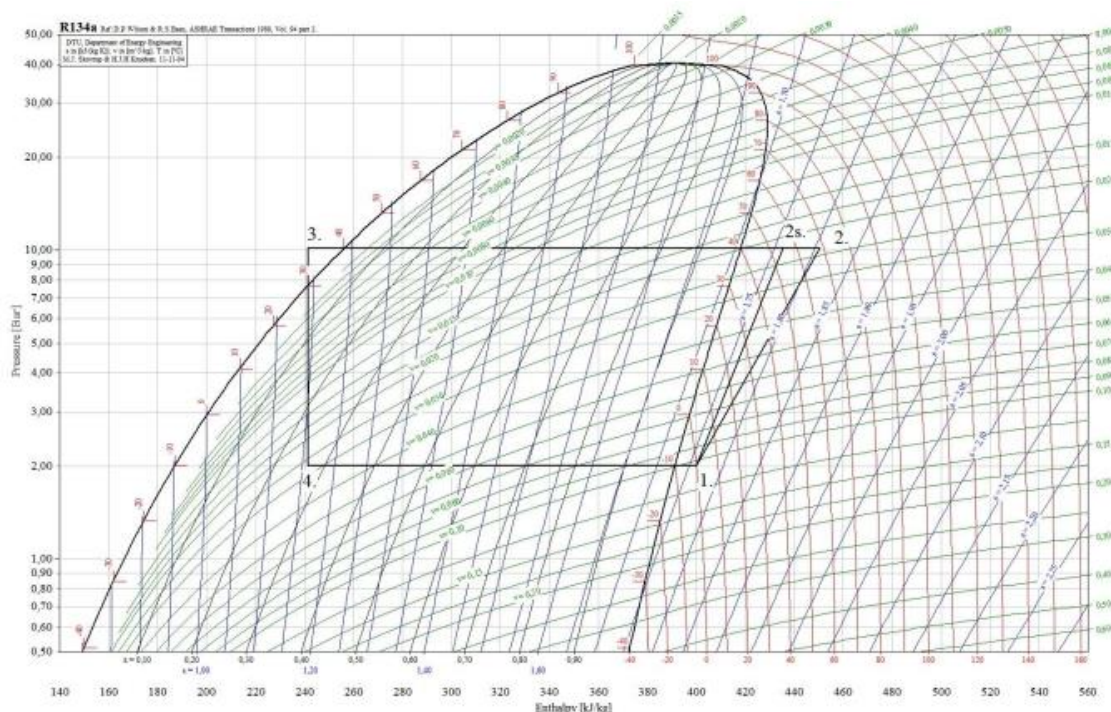
4.1 Lämpöpumpun mitoitus

Lämpöpumppua hankittaessa on yleensä tiedossa keruupiirin ja luovutuspiirin lämpötilat

ja haluttu lämpötilataso. Näiden perusteella valitaan kylmäaine, jonka ominaisuuksilla päästään sopiviin lauhumis- ja höyrystymislämpötiloihin sekä painetasoihin. Lämpöpumpun suunnittelu on optimointia lämpötilatasojen, kylmäaineen ominaisuuksien, kompressorin mitoituksen ja järjestelmän häviöiden suhteen.

4.1.1 Prosessi

Lämpöpumppprosessi perustuu teoreettiseen höyrystysprosessiin eli kiertoaineen isentrooppiseen puristukseen kompressorissa (1-2s), vakiopaineiseen tulistuksen poistoon, lauhdutukseen ja alijäähtytykseen lauhduttimessa (2-3), isentalpiseen paisuntaan paisuntaventtiilissä (3-4) ja vakiopaineiseen höyrystymiseen höyrystimessä (4-1). Prosessi on esitetty kuvan 15 kylmäaineen R134a:n log p,h-tilapiirroksessa tilapisteineen. Kuvassa tumman rajakäyrän vasemmalla puolella kylmäaine on alijäähtynyttä nestettä ja oikealla puolella tulistunutta höyryä. Käyrän sisäpuolella kylmäaine on nesteen ja höyryn seosta. (Hakala & Kaappola 2013, 11-12.)



Kuva 15 Lämpöpumppprosessi piirrettynä kylmäaineen log p,h –kuvaajaan

Todellisessa lämpöpumppprosessissa tapahtuu kuitenkin häviöitä, jolloin prosessikäyrän muoto muuttuu. Puristus ei todellisuudessa ole häviötön vaan siinä tapahtuu paine- ja lämpöhäviöitä, jolloin puristus seuraa käyrää 1-2. Häviöt lisäävät puristustyötä. Lisäksi

kompressorin venttiileissä tapahtuu painehäviöitä. Höyrystimeltä tuleva höyry lämpenee imukanavassa ja imuventtiileissä painehäviöiden ja ulkopuolelta siirtyvän lämmön takia. Kompressorin jälkeen kuumakaasu jäähtyy paineventtiileissä ja painekavissa lämpö- ja painehäviöiden vaikutuksesta. Lauhduttimessa, höyrystimessä ja putkistossa tapahtuu painehäviöitä, jolloin lauhtuminen ja höyrystyminen eivät todellisuudessa tapahdu vakio-paineessa. Häviöt huonontavat lämpöpumpun lämpökerrointa. (Aittomäki 2012, 67.)

4.1.2 Lämpöpumpun pääkomponentit

Lämpöpumpun pääkomponentit ovat höyrystimen ja lauhduttimen lämmönsiirtimet, kompressorin, paisuntaventtiili ja putkisto. Lisäksi järjestelmään voi kuulua muitakin laitteita kuten erilaisia venttiileitä, mittauksia, ohjausjärjestelmiä, öljynerottimia ja kiertopumppuja. Kompressorin voitelu hoidetaan kylmäaineen seassa olevalla öljyllä, joka pitää erottaa virrasta ja palauttaa kompressorille, jottei se kerry piiriin ja haittaa lämmönsiirtoa. (Hakala & Kaappola 2013, 71-74, 231.)

Kompressorin

Lämpöpumppujen kompressorit voivat olla mäntä-, scroll-, ruuvi-, rotaatio- tai turbo-kompressoreita. Yleensä alle 100 kW kompressorit ovat hermeettisiä scroll- ja mäntä-kompressoreita. Kompressorin valintaan vaikuttaa muun muassa sen kestävyys, äänitaso, tilantarve ja hinta. (Hakala & Kaappola 2013, 231.) Massavirta vaikuttaa kompressorin tehoon yhdessä kompressorin höyrystymis- ja lauhtumislämpötilojen entalpioiden kanssa. Höyrystymislämpötilan lasku nostaa kompressorin painesuhdetta ja siten puristustyötä ja puristuksen loppulämpötilaa. Kompressorin painesuhdetta rajoittaa kompressorin kestävyys ja kylmäaineen ominaisuudet. Puristus voidaan toteuttaa useammassa portaassa höyrystymislämpötilan ollessa alhainen, jotta puristustyötä ja puristuksen loppulämpötilaa saadaan alennettua. Tällöin kylmäainetta pitää jäähdyttää puristusvaiheiden välissä. (Aittomäki 2012, 77.)

$$P_{\text{komp}} = \dot{m}(h_2 - h_1) \quad (10)$$

missä

P_{komp} kompressorin teho [W]

h entalpia [kJ/kg]

Yhtälöllä 10 saadaan kompressorin tekemä puristustyö. Puristustyötä voidaan pienentää alentamalla höyryn lämpötilaa. Höyrystimessä kylmäainetta tulistetaan, jotta kompressorille saapuvan kylmäainehöyryn seassa ei olisi pisaroita. Tätä tulistusta kutsutaan hyödylliseksi tulistukseksi. Haitallista tulistusta aiheuttaa imukanavan painehäviö ja imukanavaan ulkopuolelta siirtyvä lämpö. Höyryn ominaistilavuus kasvaa lämpötilan kasvaessa, jolloin myös kompressorin koko kasvaa. Siksi kylmäainehöyryn liiallista tulistusta tulisi välttää. (Aittomäki 2012, 134.)

Kompressorin moottorin tehon saamiseksi täytyy huomioida myös kompressorin mekaaniset häviöt ja moottorin häviöt. Kompressorin tarvitsema sähköenergia muodostaa suurimman osan lämpöpumpun energiankulutuksesta ja siten suurimman osan käyttökustannuksista, joten kompressorin oikeaan mitoittamiseen ja tehonsäätöön tulee kiinnittää huomiota. Kompressorin tehoa voidaan säätää kolmella päämenetelmällä: invertterisäätö, vakiotehosäätö ja useamman kompressorin systeemit. Invertterisäätö eli kompressorin pyörimisnopeuden säätö taajuusmuuttajilla on taloudellisen vaihtoehto, sillä tällöin kompressorin teho saadaan parhaiten vastaamaan todellista kuormitusta. Vakiotehosäädöllä kompressorin käyntiä jaksotetaan käynnistämällä ja pysäyttämällä kompressorin kuormituksen mukaan. Tällöin kompressorin toimii aina lasketuissa optimiolosuhteissa, mutta jatkuva käynnistäminen kuluttaa energiaa ja kompressorin. Useilla kompressoreilla tehontarve voidaan jakaa esimerkiksi kahden kompressorin systeemissä 50 % ja 100 % tehoportaisiin. Taajuusmuuttajien lisääminen mahdollistaa vielä laajemman säätöalueen. (Hakala & Kaappola 2013, 250-251.)

Lämmönsiirtimet

Lämpöpumpuissa lämmönsiirtimiä on lauhduttimessa, höyrystimessä ja lisäksi lämpöpumpuun voidaan asentaa alijäähdytin ja tulistuksenpoistovaihdin. Yleensä lämmönsiirtimet ovat levylämmönsiirtimiä niiden tehokkuuden, hinta-laatusuhteen ja pienen tilantarpeen vuoksi. (Hakala & Kaappola 2013, 231.) Alijäähdyttimellä voidaan hyödyntää lauhtuneen kylmäaineen sisältämää lämpöä esimerkiksi lauhdutinpiirin esilämmittämiseen ja näin parantaa lämpöpumpun lämpökerrointa. Tulistuksenpoistovaihdin sijoitetaan

ennen lauhdutinta ja sillä hyödynnetään kompressorin jälkeisen kuuman tulistuneen kylmäaineen lämpö lauhdutinpiiristä erilliseen kuumempaan virtaan. Näin saadaan tuotettua korkeampi lämpötilataso esimerkiksi kuumaan käyttöveteen kuin mitä pelkällä lauhduttimella saataisiin. (Oilon 2017, 98.)

$$\Phi_L = \dot{m}(h_1 - h_4) \quad (11)$$

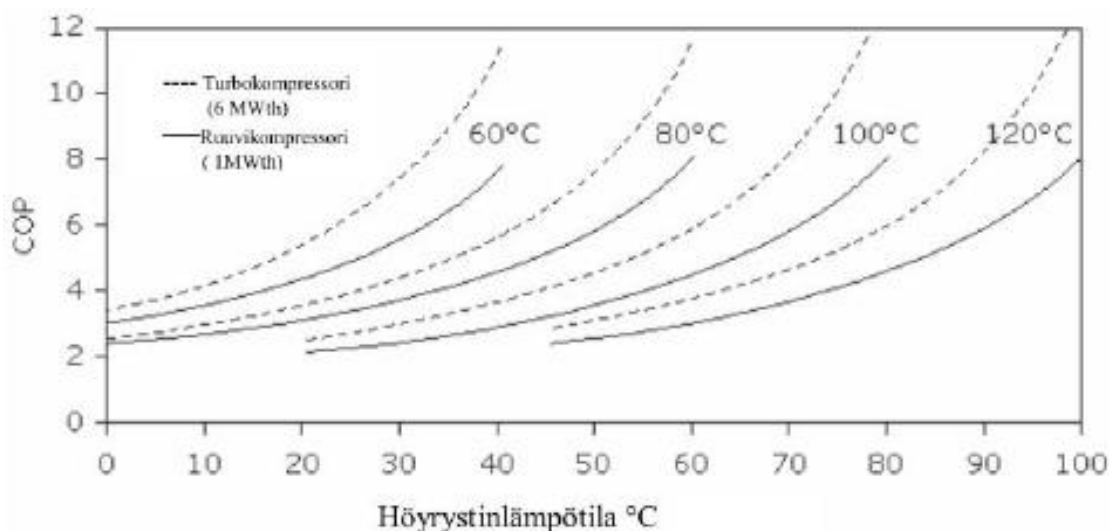
missä

Φ_L lauhdutinteho [W]

Yhtälöllä 11 voidaan laskea lauhduttimen lämpöteho. Höyrystimen kylmäteho lasketaan samoin, mutta käytetään kuvan 15 tilapisteiden 2 ja 3 entalpioita. (Hakala & Kaappola 2013, 93.)

Paisuntaventtiili

Paisuntaventtiilillä alennetaan lauhtuneen kylmäaineen painetta ennen höyrystintä ja säädetään höyrystimelle pääsevän kylmäaineen virtausta. Virtausta säädetään muuttamalla paisuntaventtiilissä olevan aukon kokoa asetusarvojen mukaisesti. Virtausta säätämällä pidetään kylmäaineen tulistus ennen kompressoria sopivana. Kylmäainetta on kannattavaa tulistaa 3-7 °C, jotta kompressor ei vahingoitu märästä höyrystä tai joudu tekemään liikaa työtä saavuttaakseen saman puristuksen loppupaineen. Tulistusta mitataan höyrystimen yläosasta lähtevästä putkesta ja paisuntaventtiilin aukon kokoa säädetään tulistuksen mukaan. Jos tulistusta on liikaa, säädetään aukkoa ja kylmäainevirtaa suuremmaksi, jotta höyrystimessä voidaan höyrystää enemmän kylmäainetta. Pienemmälle aukkoa ja virtausta säädetään, jos höyry on liian kosteaa kompressorille mentäessä. (Oilon 2017, 98.) Paisuntaventtiileitä on mekaanisia ja elektronisia. Mekaanisen termostaattisen paisuntaventtiilin etu on sen alhainen hinta. Elektroniset paisuntaventtiilit ovat yleistyneet suuremman kokoluokan lämpöpumpuissa, koska niillä voidaan saavuttaa pieni ja vakaa tulistus myös vaihtelevissa olosuhteissa. (Hakala & Kaappola 2013, 231-232.)



Kuva 16 COP-arvon muuttuminen höyrystimen ja lauhduttimen lämpötilaeron muuttuessa kahdella eri kompressoriteholla (Pöyry 2010, 34)

Lämpöpumpun tehokkuutta kuvaakin paremmin sen SPF-arvo eli kausisuorituskykykerroin. SPF-arvo kuvaa lämpöpumpulla vuodessa tuotetun lämmitysenergian suhdetta kompressorin ja apulaitteiden kuluttamaan ostosähköön. SPF-arvolla voidaan huomioida lämpötilan muuttuminen lämmityskauden aikana. (Eskola et al. 2012, 12.)

$$SPF = \frac{Q_L}{W_{\text{komp}} + W_{\text{apu}}} \quad (13)$$

missä

Q_H	lämpöpumpun vuodessa tuottama lämmitysenergia	[kWh]
W_{komp}	kompressorin vuotuinen sähkönkulutus	[kWh]
W_{apu}	apulaitteiden vuotuinen sähkönkulutus	[kWh]

SPF-arvo huomioi lämpöpumpun apulaitteiden kuten pumppujen, puhaltimien ja säätölaitteiden kuluttaman sähkönkulutuksen. Se ottaa huomioon myös mahdollisiin sulatusjaksoihin kuluvan energian. (Eskola et al. 2012, 12.).

4.2 Kylmäaineet

Kylmäaineet ovat nesteytettyjä kaasuja ja niitä käytetään höyrystymisprosessiin perustuvissa lämpöpumpuissa kiertoaineena. Kylmäaineita on monia erilaisia ja kuhunkin läm-

pöppumppuprosessiin tulee kylmäaine valita huolellisesti sen termodynaamisten, kemiallisten ja turvallisuusominaisuuksien perusteella. Nykyisin yhä tärkeämmässä roolissa kylmäainetta valittaessa on myös sen ympäristövaikutukset. (Aittomäki 2012, 102-105.)

Kylmäaineet voidaan luokitella puhtaisiin hiilivetyihin, epäorgaanisiin aineisiin ja hiilivedyistä johdettuihin yhdisteisiin. Viimeksi mainituissa vetyatomeja on korvattu halogeeniatomeilla kuten kloori, fluori ja bromi ja niitä kutsutaan halogeenihiilivedyiksi. Kylmäaineiden ilmastovaikutuksia mitataan otsonihaitallisuudella (ODP-arvo), kasvihuonevaikutuksella (GWP) ja kylmälaitoksen vaikutuksella ilmakehän lämpenemiseen (TEWI). Kansainvälisillä sopimuksilla on rajoitettu otsonikatoa ja ilmaston lämpenemistä aiheuttavien kylmäaineiden käyttöä. Säädöksillä poistettiin käytöstä ensin otsonikerrokselle haitalliset aineet eli bromia ja klooria sisältävät CFC- ja HCFC-yhdisteet. Ilmaston lämpenemistä aiheuttaville kylmäaineille eli yhdisteille, joilla on korkea GWP-arvo, asetetaan uusia rajoituksia ilmastotavoitteiden kiristyessä. Uusiin kylmäaineisiin siirtyminen on kallista ja vaatii runsaasti tutkimustyötä, jotta niiden ominaisuudet ja niiden kanssa yhteensopivat materiaalit tunnetaan. (Aittomäki 2012, 104-111.)

Ilmastovaikutukset ovat aiheuttaneet tarpeen uusille kylmäaineille, mutta prosessin kannalta kylmäaineen tärkeimmät ominaisuudet liittyvät sen termodynaamisiin ominaisuuksiin. Kylmäaineella tulisi olla suuri höyrystymislämpö, jotta massavirta pysyy pienenä ja siten kompressorin ja putkistojen koko maltillisena. Kompressorin kokoon pienentävästi vaikuttaa myös suuri tilavuustuotto. Pieni painesuhde taas pienentää puristustyötä ja tullituksen osuutta puristuksessa. Kylmäaineella tulisi olla myös pieni viskositeetti, jotta painehäviöt kompressorin venttiileissä ja putkissa saadaan minimoitua. Lämmönsiirtimien koko on pienempi kylmäaineen hyvällä lämmönjohtavuudella, sillä hyvä lämmönjohtokyky antaa tehokkaan lämmönsiirron ja näin lämmönsiirtopinnat ovat pienemmät. Kylmäaineen ominaislämpö vaikuttaa kylmäainehöyryn tulistumiseen puristuksessa yhdessä lauhtumis- ja höyrystymislämpöjen eron kanssa. Pienellä lämpötilaerolla ja suurella ominaislämmöllä höyry ei tulistu liikaa. (Aittomäki 2012, 103-104.)

Kylmäaineen käytön kannalta on oleellista sen käyttäytyminen öljyn ja veden kanssa. Öljyn ja kylmäaineen olisi toivottavaa joko olla keskenään kokonaan liukenemattomia tai liu-

koisia, jolloin öljyn erotus on helpompaa. Kylmäaineet aiheuttavat veden kanssa korroosiota ja öljysakan muodostumista, joten toivottavaa olisi kylmäaineen liukenemattomuus veteen. Kylmäaineen, öljyn ja veden yhdistelmän tulisi olla mahdollisimman stabiili kiertoprosessissa käytettävien materiaalien kanssa aina 150-200 °C lämpötiloihin saakka. Kylmäaineen valinta vaikuttaa lämpöpumpussa käytettävien materiaalien valintaan. Ihmisten ja yleisen turvallisuuden kannalta tärkeää olisi myös kylmäaineen myrkyttömyys ja palamattomuus. Monien uusien kylmäaineiden ongelmana on, että ne ovat joko palavia tai myrkyllisiä, mikä aiheuttaa lisävaatimuksia lämpöpumpun sijoitustilaan. (Aittomäki 2012, 104-106.)

4.3 Lämpöpumput osana kaukolämpöä

Lämpöpumpputekniikan kehittymisen myötä on kilpailu lämmitysmarkkinoilla kiristynyt. Kaukolämpöyritysten tulee kehittää uusia ratkaisuja pysyäkseen kilpailukykyisenä. Lämpöpumput nähdään monesti vain kaukolämmön kanssa kilpailevana lämmitysmuotona, mutta monissa tapauksissa lämpöpumppuja voidaan käyttää kaukolämmössä täydentävä lämmitysratkaisuna joko kaukolämmön tuotannossa tai asiakaslaitteiden ohella toisena lämmitysmuotona. (Pöyry 2010, 3.) Esimerkiksi Turussa, Espoossa ja Helsingissä on jo pitkän aikaa tuotettu osa kaukolämmöstä lämpöpumppulaitoksilla. Lämpöpumppuja voidaan käyttää myös matalalämpötilaisen kaukolämpöveden priimamiseen eli lämpötilan nostoon. (Valor 2016, 3.)

Pohjoismaisilla sähkömarkkinoilla sähkön hinta on pysynyt alhaisena jo useamman vuoden ajan. Alhainen markkinasähkön hinta alentaa yhteistuotannon kannattavuutta, mutta lisää sähkön perustuvan lämmöntuotannon kannattavuutta. Uusiutuvan sähköntuotannon nopea lisääntyminen tulee lisäämään sähkön markkinahinnan vaihtelevuutta. Kaukolämpötuottajat, joiden tuotantovalikoimaan kuuluu sekä yhteistuotantoa että lämpöpumppuja, voisivat tällöin hyötyä sekä korkeista että matalista sähkön hinnoista. (Helin et al. 2018, 455-456.) IEA:n Pohjoismaiden hiilineutraalissa skenaariossa sähköllä voitaisiin tuottaa jopa puolet kaukolämmöstä vuoteen 2050 mennessä. Tämä tarkoittaa lämpöpumppujen ja sähkökattiloiden laajamittaista lisäämistä kaukolämpöverkkoon. Molemmat tuotantotavat tuovat myös tarvittavaa säätövaraa uusiutuvalle sähköntuotannolle ja mahdollisuuden ylimääräisen sähkön varastoinnille lämmön muodossa. (IEA 2016, 19.) Sähköön

perustuvan lämmöntuotannon lisäämisessä tulee kuitenkin huomioida kannattavuuden riippuvuus sähkön hinnasta. Sähkön tarpeen lisääntyminen nostaa myös sähkön hintaa, mikä tulee huomioida investointipäätöksiä tehdessä. Tuotantovarmasta yhteistuotantosähköstä tulee myös pitää kiinni epävarman uusiutuvan sähköntuotannon lisääntyessä. (Helin et al. 2018, 456.)

4.3.1 Suuret lämpöpumput

Suurilla lämpöpumpuilla tarkoitetaan yli 1 MW teholuokan lämpöpumppuja, joilla syötetään lämpöä suoraan kaukolämpöverkkoon. Lämpöpumppulaitoksen kannattavuuden edellytyksenä on lämmönlähteen sijainti lähellä kulutusta ja lämmönlähteen tarpeeksi korkea lämpötila ja tasainen saatavuus. Lämpöpumpuilla voidaan hyödyntää esimerkiksi teollisuuden ylijäämlämpöä, hukkalämpöä ja vesistöjen lämpöä. Teollisuuden hukkalämpöjen hyödyntämistä tarkasteltaessa on tärkeää arvioida teollisuuden alan kehitys ja todennäköisyys yrityksen toiminnan jatkuvuudelle. Suomessa suuria lämpöpumppulaitoksia on rakennettu muun muassa Turkuun ja Helsinkiin, joissa kaukolämpöä tuotetaan lämpöpumpuilla puhdistetusta jätevedestä. Lämpöpumppulaitokset ovat tärkeitä myös kaukojäähdytyksen tuotannossa. Lisäksi Mäntsälässä otetaan lämpöpumpulla talteen lämpöä datakeskuksen ulos puhallettavasta lämpimästä ilmasta. Suomessa vesistöjä ei ole vielä suuremmin hyödynnetty kaukolämmön tuotannossa, mutta esimerkiksi Ruotsissa Tukholmassa ja Norjassa Drammenissa on suuret lämpöpumppulaitokset, joilla tuotetaan kaukolämpöä merivedestä. Suomessa suuria lämpöpumppuja voitaisiin potentiaalisesti hyödyntää 3-4 TWh verran kaukolämmöntuotannossa. Vuonna 2015 lämpöpumpuilla tuotettiin tästä vasta 0,6 TWh. (Valor 2016, 3, 12-16.)

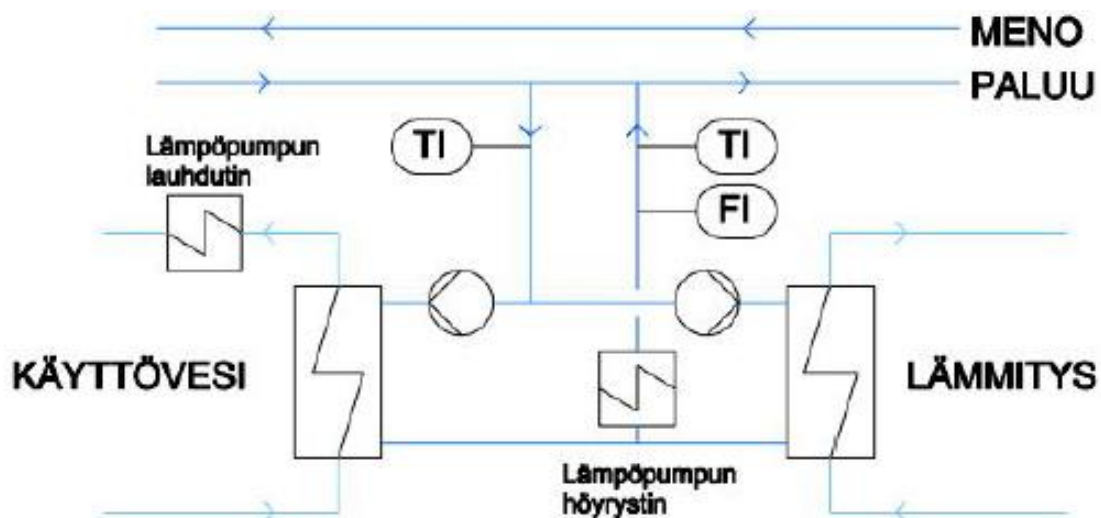
Suurilla lämpöpumpuilla voidaan lisätä kaukolämpöjärjestelmän joustavuutta, sillä lämpöpumput on nopea käynnistää ja sammuttaa sekä niillä voidaan optimoida muuta tuotantoa. Lämpöpumpuilla voidaan myös hyödyntää hukkalämpöä ja teollisuuden ylijäämlämpöä ja näin vähentää fossiilisten polttoaineiden käyttöä. Laajamittaisemman lämpöpumppujen hyödyntämisen mahdollistaa siirtyminen kaukolämmön neljänteen sukupolveen ja matalampiin jakelulämpötiloihin. Jos yhä suurempi osa lämmöntuotannosta tuotetaan lämpöpumpuilla, aiheuttaa se kuitenkin sähkötehon tarpeen lisääntymisen.

Kaukolämpöä tuotetaan usein yhteistuotantolaitoksissa. Jos tuotantoa korvataan lämpöpumpuilla, johtaa se tuotetun sähköenergian vähenemiseen. (Valor 2016, 23-25.)

4.3.2 Kiinteistöjen lämpöpumput

Kiinteistökohtaisesti lämpöpumppuja voidaan käyttää esimerkiksi kaukolämmön matalalämpötilaverkoissa lämpimän käyttöveden valmistamiseen. Østergaard & Andersen (2016, 1378-1381) tutkivat erään lämpöpumppuihin perustuvan kaukolämpökytkennän kannattavuutta matalalämpötilaverkossa. Kytkennässä kaukolämmön menopuolesta erotetaan kaksi linjaa, joista toinen linja johdetaan lämpöpumpun höyrystimen kautta kaukolämmön paluulinjaan ja toinen lämpöpumpun lauhduttimen kautta lämpimän käyttöveden valmistuksen lämmönsiirtimeen. Kytkennän avulla kaukolämpöverkon lämpötilatasoja voidaan tiputtaa jopa 30 °C ja vähentää verkon lämpöhäviöitä.

Hieman vastaava järjestelmä on hyödyntää lämpöpumppujen avulla kaukolämmön paluuvettä kiinteistöissä, joissa on esimerkiksi lattialämmitys. Kuvassa 17 on esitetty lämmönjakokeskuksen kytkentä, jossa kiinteistön lämmitykseen ja käyttöveden valmistamiseen tarvittava lämpö otetaan kaukolämpöverkon paluulinjasta ja palautetaan paluulinjaan. Paluuveden lämpötila on keskimäärin 50 °C ja lattialämmityksen toisiopuolen mitoitusmenolämpötila 35 °C. Tällöin paluuveden lämpö riittää kiinteistön lämmitykseen, mutta lämmin käyttövesi vaatii lisälämmitystä. Käyttövesi voidaan lämmitellä sähkövastuksilla tai kytkemällä lämpöpumpun höyrystin lämmönjakokeskuksen paluupuolelle ja lauhdutin käyttöveden menopuolelle. Ratkaisulla voidaan alentaa paluuveden lämpötilaa, jolloin saadaan paremman jäähtymän hyödyt. Suunnitteluvaiheessa on tarkistettava riittävä virtaama paluuvesilinjassa etenkin kesän matalan kulutuksen aikoina, jotta tarvittava lämpö voidaan toimittaa asiakkaalle. Ongelmaksi saattaa muodostua myös se, että kaikille asiakkaille ei voida myydä paluulämpöä. Jos paluulämpöä haluttaisiin myydä, tulisi sen kriteerit määrittää tarkasti, jotta asiakkaan ja kaukolämpöyhtiön välille ei synny epäselvyyksiä. (Pöyry 2010, 17-18, 49.)



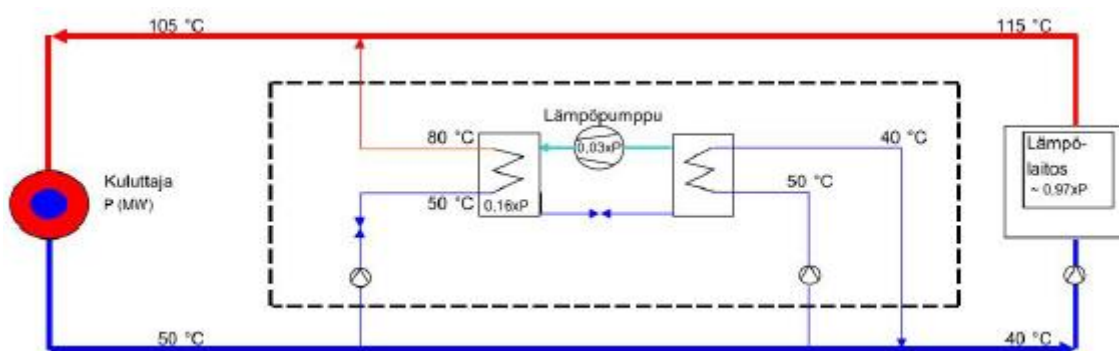
Kuva 17 Lämmönjakokeskuksen kytkentä tapauksessa, jossa lämmitys otetaan kaukolämmön paluuedestä ja lämmin käyttövesi priimataan lämpöpumpulla (Pöyry 2010, 18)

Kiinteistöjen lämmitykseen saadaan joustoa ja mahdollisesti säästetään vuosikustannuksissa asentamalla kaukolämmön rinnalle esimerkiksi poistoilmalämpöpumppu. Hybridiratkaisussa järjestelmä saattaa kuitenkin muodostua monimutkaiseksi ja sitä kautta järjestelmän kustannukset ja takaisinmaksuaika ovat korkeat. Kaukolämmön ja lämpöpumpun hybridiratkaisu saattaa myös asettaa toisen lämmitysmuodon epäedulliseen asemaan esimerkiksi alentaen lämpöpumpun lämpökerrointa tai kaukolämmön jäähtymää. Siksi hybridijärjestelmän huolellinen mitoittaminen on tärkeää. (Boss 2012, 21.) Hybridiratkaisujen yleistymisen muuttaa myös kaukolämmön tuotantorakennetta, sillä yleensä lämpöpumpuilla tuotetaan suurin osa kiinteistön vuoden lämpöenergiatarpeesta, mutta huipputeho tuotettaisiin kaukolämmöllä. Tällöin energiatehokkaan perustuotannon osuus vähenee ja huippukapasiteetin tarve korostuu. (Rinne & Syri 2013, 25.)

4.3.3 Lämpöpumput kaukolämpöverkossa

Lämpöpumppuja voidaan hyödyntää erilaisissa kaukolämpöverkon lämmön talteenottoon perustuvissa ratkaisuissa. Kuvassa 18 on esitetty kytkentä, jossa lämpöpumpulla alennetaan paluueden lämpötilaa ja lämmitetään menopuolelle syötettävää paluuedettä. Paluuedettä lämmitetään vain 80 °C lämpötilaan, jotta lämpöpumpun lämpökerroin pysyy hyvänä. Tällaisessa kytkennässä lämpölaitoksen menoveden lämpötilaa on pitänyt nos-

taa, jotta asiakkaalle voidaan taata tarvittava lämpötila. Kuvan 18 mukaisesti lämpöpumppu voitaisiin kytkeä esimerkiksi verkon kannalta ongelmalliseen haaraan. Näin lämpöpumpulla voitaisiin alentaa haaran kaukolämpöveden virtausta ja pumppaustehontarvetta. (Pöyry 2010, 33.) Tässä diplomityössä tarkasteltava lämpöpumpun kytkentä kaukolämpöverkkoon on edellä esitellyn ratkaisun kaltainen, sillä erolla, että paluueden lämmöllä lämmitetään menupuolta. Kytkentää käsitellään tarkemmin kappaleessa 6.



Kuva 18 Lämpöpumpulla lämmitetään kaukolämpöverkon paluuvettä paluueden lämmöllä ja syötetään lämmitetty paluuvesi menupuolelle (Pöyry 2010, 34)

Koivula (2015, 12-14, 116) tutki diplomityössään ratkaisua, jossa normaaliin kaukolämmön kaksiputkijohtoon asennetaan lisäksi ulkokehälle sijoitettu alumiinivaippa ja alumiinivaippaan kosketuksissa oleva talteenottoputki. Alumiini johtaa hyvin lämpöä, joten kaukolämmön meno- ja paluuputkien lämpöhäviöt johtuvat alumiinivaipasta maaperää matalammassa lämpötilassa olevaan talteenottopiiriin paluuputkeen. Ratkaisun tarkoituksena on ottaa johdon lämpöhäviöt talteen ja lämpölaitoksella siirtää lämpöpumpulla kaukolämmön paluuveteen lämpöä ja näin esilämmittää paluuvettä ennen kaukolämmönvaihdinta. Ratkaisun kannattavuus todettiin erittäin riippuvaiseksi sähkön ja lämmön tuotantokustannuksista.

5 TURKU ENERGIA

Turku Energian toiminnan voidaan katsoa alkaneen jo vuonna 1898, kun Aktiebolaget Electron aloitti sähkölaitostoiminnan. Kaukolämpötoiminta alkoi 1976 siirrettävillä lämpökeskuksilla ja toiminta laajeni 1979, kun Turun Seudun Kaukolämpö (TSK) perustettiin. Turku Energia –konsernin emoyhtiö on vuoden 1995 yhtiöittämisen jälkeen ollut Oy Turku Energia – Åbo Energi Ab, jonka omistaa Turun kaupunki. Nykyisin Turku Energia on yksi Suomen suurimpia kaupunkienergiayhtiöitä. Turku Energian toiminta on jaettu palvelutuotantoihin ja energialiiketoimintoihin, joihin kuuluvat sähkön, höyryn, kaukolämmön ja jäähdytyksen myynti, jakelu, hankinta ja tuotanto. Turku Energian tytäryhtiöitä ovat TSK Oy ja Turku Energia Sähköverkot Oy. Lisäksi Turku Energialla on osakkuusyrityksiä kuvan 19 mukaisesti. (Turku Energia 2018a.)



Kuva 19 Turku Energia –konserni

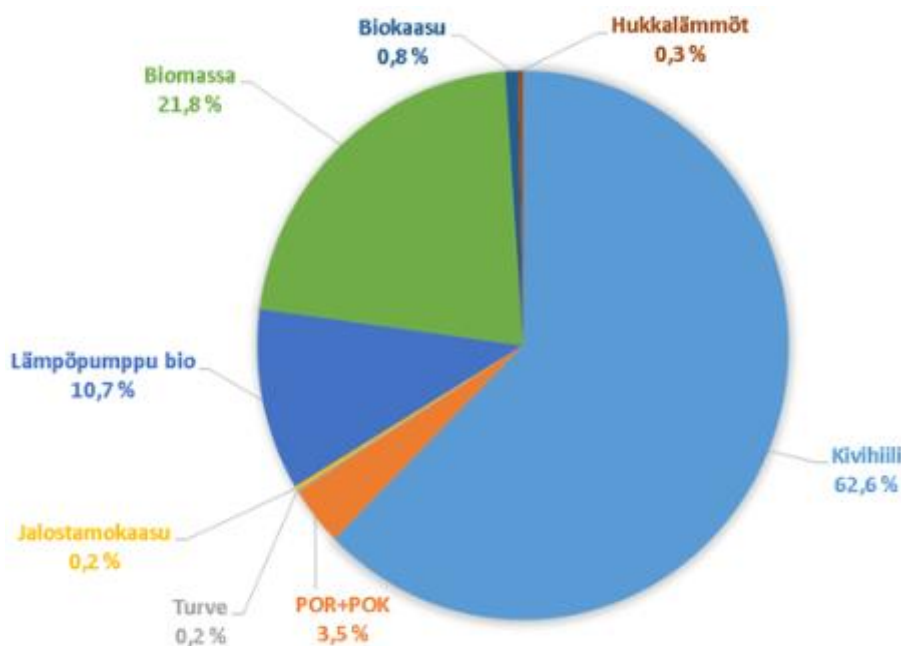
Turku Energian strategian painopistealueisiin kuuluvat asiakastyytyvyyden kehittäminen, uudistuminen, liiketoiminnan kasvattaminen, tehokkuuden parantaminen ja ympäristötavoitteiden toteuttaminen. Turun kaupungilla on hiilineutraali Turku 2040 –visio, jonka saavuttamista Turku Energia tukee omilla toimillaan. Ympäristötavoitteisiin pääsemiseksi Turku Energia on laatinut uuden ympäristöohjelman vuosille 2018- 2020, jossa se on listannut tavoitteiksi uusiutuvan energian osuuden lisäämisen yli 50 %: iin, ilmaan päästettyjen päästöjen vähentämisen, energiatehokkuuden lisäämisen, oman toimintansa ympäristövaikutusten vähentämisen ja ympäristöviestinnän lisäämisen. (Turku Energia

2018b.) Ympäristötavoitteiden saavuttamisessa tärkeässä osassa ovat Naantalın uusi monipolttoainevoimalaitos ja sen biopolttoaineiden osuuden lisääminen, Artukaisten uusi metsähaketta käyttävä höyryntuotantolaitos sekä Skanssin alueen kaksisuuntaisen älykkään kaukolämpöverkon pilotointi. Lisäksi Turku Energia opastaa asiakkaitaan energiatehokkaaseen energiankäyttöön, kasvattaa aurinkovoimakapasiteettiaan, lisää sähköautojen latauspisteitä ja myy aurinkopaneelipaketteja asiakkaille. (Turku Energia 2018a.)

5.1 Kaukolämmön tuotanto

Turku Energian kaukolämmön lämmittämässä asunnoissa asuu yli 200 000 asukasta. Vuonna 2018 kaukolämpöä myytiin 1958 GWh. Kaukolämmön jakeluverkkoon on rakennettu tehontarvetta tasaamaan kaksi lämpöakku. Toinen on rakennettu vanhan kaasukellon sisälle ja sen tilavuus on 6 000 m³, teho 60 MW ja lämmönvarauskapasiteetti 240 MWh. Naantalın voimalaitoksen yhteyteen on myös rakennettu lämpöakku, jonka tilavuus on 15 000 m³, teho 80 MW ja varauskapasiteetti 700 MWh. (Turku Energia 2018a.)

Turku Energia hankkii suurimman osan tarvitsemastaan kaukolämmöstä Turun Seudun Energiantuotannolta (TSE). Peruskuorma tuotetaan Naantalın voimalaitoksessa, Orikedon biolämpökeskuksessa ja puhdistetun jäteveden lämpöä hyödyntävässä Kakolan lämpöpumppulaitoksessa. Häiriötilanteita ja talven huippukulutustilanteita varten Turussa on myös pelletti- ja öljykäyttöisiä vara- ja huippulämpökeskuksia. Muita käytössä olevia polttoaineita ovat biokaasu ja teollisuuden hukkalämmöt. Kuvassa 20 on esitetty Turku Energian kaukolämmön alkuperä. Uusiutuvalla energialla tuotettiin 50 % hankitusta lämmöstä vuonna 2018. Tämän mahdollisti pitkälti Naantalın uuden monipolttoainevoimalaitoksen valmistuminen vuoden 2017 lopussa. (Turku Energia 2018a.)



Kuva 20 Kaukolämmön tuotannossa käytettyjen polttoaineiden osuudet vuonna 2017

Suurin osa kaukolämmöstä on aiemmin tuotettu Naantalissa kolmessa vuosina 1960, 1964 ja 1972 valmistuneissa kivihiihikattiloissa, joista jokaisen polttoaineteho on 315 MW. TSE:n rakentama Naantalissa monipolttoainevoimalaitos valmistui joulukuussa 2017. Laitos korvaa osittain vanhojen Naantalissa hiilivoimalaitosten käyttöä ja vähentää kaukolämmön hiilidioksidipäästöjä 210 000 tonnia vuodessa. Monipolttoainevoimalaitoksessa tuotetaan 1400 GWh lämpöä, 800 GWh sähköä ja 200 GWh höyryä. Voimalaitoksella pystytään hyödyntämään joustavasti eri polttoaineita biopolttoaineista kivihiiheen. Laitoksella hyödynnetään myös Naantalissa jalostamon jalostamokaasuja. Niiden osuus polttoaineista on noin 2 %. Aluksi noin 45 % energiasta tuotetaan biopolttoaineilla, mutta määrää nostetaan 60-70 %:iin. (Turku Energia 2018a.) Vuoden 2018 lokakuussa valmistui uusi kuljetinjärjestelmä, joka mahdollistaa polttoaineen tuomisen meriteitse.

TSE:n omistama Kakolan lämpöpumppulaitos rakennettiin vuonna 2009 Turun jätevedenpuhdistamon yhteyteen ja se tuottaa energiaa puhdistetusta jätevedestä. Ensin lämpöpumpulla otetaan jätevedestä lämpö talteen kaukolämpöverkkoon, minkä jälkeen jäähtynyttä vettä käytetään kaukokylmän tuotantoon. Laitoksessa on kaksi lämpöpumppua, joiden yhteenlaskettu lämpöteho on 42 MW. Laskennallisesti laitos korvaa hiilen polttoa 21 000 tonnia vuodessa. Kaukojäähdytyksen tarpeisiin on rakennettu 17 000 m³ kylmäakku, jolla voidaan tasata kaukojäähdytyksen tehovaihteluita. Kaukojäähdytysteho on

29 MW. (Turku Energia 2018c.)

Orikedon vuonna 2001 valmistunut biolämpökeskus käyttää polttoaineenaan lähialueiden hakkuutähteitä ja metsänhoidossa syntyviä sivutuotteita. Lämpökeskuksessa on kupliva leijukerroskattila, jonka teho on 40 MW. Lisäksi laitoksella tuotetaan kaukolämpöä savukaasupesurin lämmöntalteenotolla, jonka teho on 12 MW. Laitos tuottaa keskimäärin 300 GWh kaukolämpöenergiaa vuodessa. Biolämpökeskus on TSE:n omistama. Uusiuuviin polttoaineisiin perustuvaa kaukolämpöä tuotetaan peruskuormalaitosten lisäksi vuonna 2015 valmistuneessa Luolavuoren pellettilaitoksessa, jossa tuotetaan 20-50 GWh vara- ja huipputehoenergiaa vuodessa. Luolavuoren pellettilaitos on Turku Energian omistama ja laitos hyödyntää pelletin pölypolttoa. (Turku Energia 2018c.)

Turku Energian omistamia kiinteitä huippu- ja varavoimalaitoksina toimivia lämpökeskuksia on Turun alueella useita eri puolilla kaupunkia. Kuntien omistamia pienempiä öljykäyttöisiä lämpökeskuksia on lisäksi Kaarinan, Raision ja Naantalın alueilla. Lämpökeskusten yhteenlaskettu teho on 717 MW. Huippulämpökeskusten käyttö riippuu vuoden huipputehontarpeesta, joka vaihtelee vuosittain runsaasti. Lämpökeskukset käyttävät polttoaineena kevyttä polttoöljyä.

5.2 Kaukolämmön jakelu

TSK Oy on seudullinen kaukolämmön siirtoyhtiö ja se vastaa kaukolämmön siirrosta Naantalista tunnelijohtoa pitkin Turkuun. Turku Energian kaukolämpöverkon välityksellä siirretään lämpöä Turun seudulla eli Turussa, Kaarinassa, Raisiossa ja Naantalissa. Vuonna 2018 kaukolämpöverkon pituus oli noin 600 km ja kaukolämmön toimitusvarmuus 99,99 %. Kaukolämpöverkosto Turun alueella koostuu hyvin eri-ikäisestä ja monen tyyppisestä putkistosta. Suurin osa putkistosta on Mpuk- ja 2Mpuk-johtotyyppisiä, mutta maassa on lisäksi muun muassa vanhempia betonielementtikanavia ja asbestisuojakuoria kaukolämpöjohtoja.

Verkon alueella on useita tuotantolaitoksia, joita käynnistetään kulutuksen noustessa ajojärjestyksen mukaan. Suurin osa tuotannosta tulee kuitenkin Naantalın CHP-laitokselta pitkin tunnelisiirtojohtoa, joka päättyy Luolavuoreen. Tästä siirtolinjasta suuntataan 85-

120 asteista vettä ulkoilman mukaisen ajokäyrän vaatimaan lämpötilaan kahdeksasta sunntauspisteestä.

5.3 Kaukojäähdytys ja höyry

Kaukolämmön lisäksi Turku Energia myy ja tuottaa kaukojäähdytystä ja höyryä. Kaukojäähdytyksen toimittaminen on aloitettu vuonna 2000 Biolaaksoon ja Kupittaaan alueelle. Kaukojäähdytysverkko on laajentunut kattamaan myös Yliopistonmäen, keskustan, Kakolan ja sataman alueen kiinteistöt. Kaukojäähdytyksen myynti oli 45 GWh vuonna 2018 ja myynnin oletetaan jatkavan tasaista kasvuaan. Kaukojäähdytyksen yleistymistä on hidastanut liittyviltä kiinteistöiltä vaadittavat isot investoinnit. Se tarjoaa kuitenkin energiatehokkaan vaihtoehdon kiinteistökohtaisille jäähdytysjärjestelmille. Turun kaukojäähdytysverkon menolämpötila on 7 °C ja paluulämpötila 17 °C. Yli 90 % kaukojäähdytyksestä tuotetaan Kakolan lämpöpumppulaitoksessa.

Turku Energia myy höyryä asiakastarpeiden perusteella. Artukaisten teollisuusalueelle vuonna 2018 valmistunut puupolttoaineita käyttävä höyryntuotantolaitos vähensi merkittävästi raskaan polttoöljyn käyttöä höyryntuotannossa. Aiemmin kaikki höyry tuotettiin öljyllä, joten höyryntuotannon hiilidioksidipäästöt vähenevät 20 000 tonnilla vuodessa. (Turku Energia 2018a.) Höyryä myytiin 49 GWh vuonna 2018.

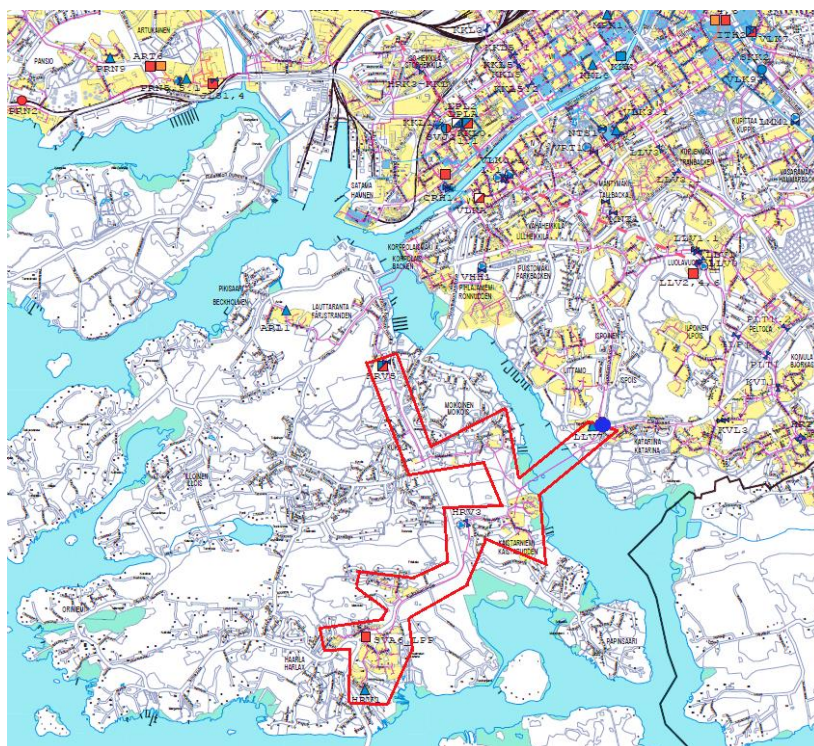
6 PILOTTIPROJEKTI

Pyrkimys kohti energiatehokkaampaa ja ympäristöystävällisempää energiantuotantoa haastaa myös kaukolämpöyritykset vähentämään kaukolämmön jakelun häviöitä ja uudistamaan tuotantorakennetta. Yleisesti ottaen kaukolämpöalalla ollaan siirtymässä kolmannen sukupolven kaukolämmöstä neljännen sukupolven kaukolämpöön. Käytännön tasolla se tarkoittaa verkon lämpötilatasojen laskemista häviöiden pienentämiseksi. Nykyisissä verkoissa haasteensa lämpötilojen alentamiselle aiheuttavat talvisin verkoston siirtokapasiteetti ja kesäisin menoveden jäähtymä. Tällä pilottiprojektilla pyritään löytämään ratkaisu kesäajan ongelmiin.

Kaukolämmön suhteelliset häviöt ovat Turku Energian kaukolämpöverkossa kesällä jopa yli 20 % johtuen vähäisestä kulutuksesta. Kaukolämpöveden jäähtymä matalan kulutuksen aikaan aiheuttaa sen, että verkon alkupään kannalta joudutaan ajamaan yllilämmöllä, mikä lisää lämpöhäviöitä. Nostamalla verkon häntäpäiden lämpötiloja paikallisesti voitaisiin lämpötiloja verkon alkupäässä mahdollisesti tiputtaa. Tässä pilottiprojektissa Hirvensaloon Myötäisten lämpökeskukseen asennettiin lämpöpumppu, jolla lämmitetään kaukolämmön menopuolta paluupuolen lämmöllä samalla jäähdyttäen paluupuolta. Diplomityön tavoitteena oli tutkia, voitaisiinko alueen syöttöpisteen lämpötilaa alentaa lämpöpumpun avulla ja mikä vaikutus tällä olisi verkon häviöihin. Lisäksi työssä tutkittiin mahdollisuutta monistaa ratkaisua muissa vastaavissa kohteissa ja paljonko koko verkon tasolla voitaisiin näin pudottaa lämpötilatasoja.

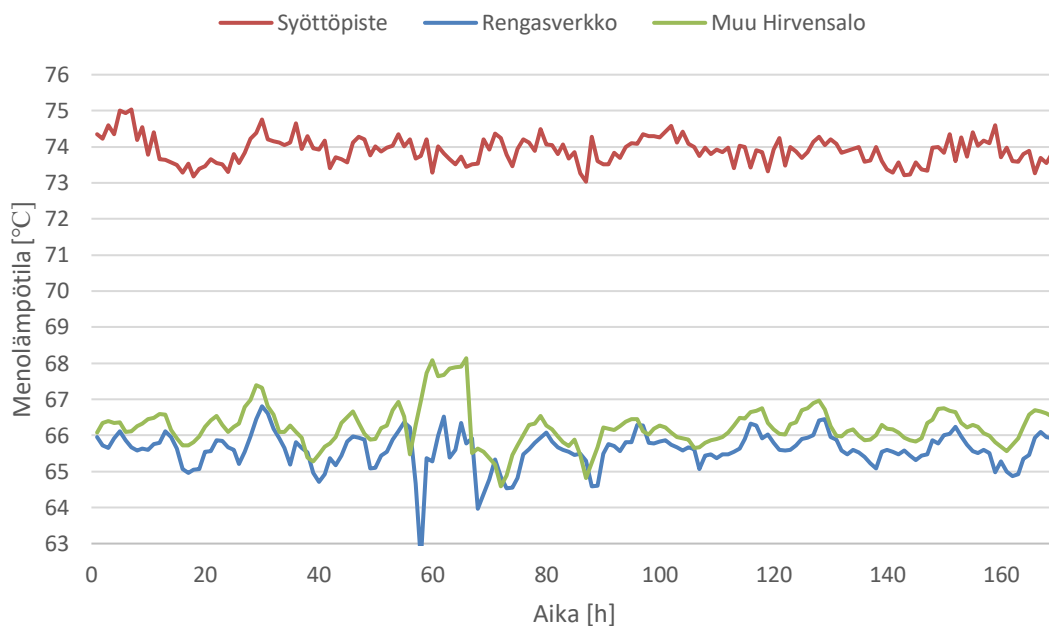
6.1 Pilottikohde

Pilottikohteeksi valittiin Hirvensalo, koska veden jäähtymä alueen verkossa on kesäaikaan suuri pitkien etäisyyksien ja kesällä pieneksi tippuvan kulutuksen takia. Kuvaan 21 on punaisella rajattu tarkasteltavaksi valittu alue. Tällä alueella on yhteensä 47 asiakasta, joiden tilausteho on 9,84 MW. Verkon perällä olevan rengasverkon alueella on 23 asiakasta, joiden tilausteho on yhteensä 5,22 MW.



Kuva 21 Osa Turku Energian kaukolämpöverkosta, johon työssä tarkasteltu alue on rajattu punaisella

Erityisesti ongelmia alueella aiheuttaa sen sijainti saarella. Hirvensalon saaren kaukolämpöverkon yhdistää mantereelle kaksi Pitkäsalmen alittavaa siirtojohtoa, joista eteläinen siirtojohto on kuvan 21 karttaan merkityn punaisen alueen sisällä. Tämän Pitkäsalmen alitusjohdon takia lämpötilatasot Hirvensalossa ovat keskimäärin 5-10 °C matalammat kuin mantereen puolella olevan kuvan 21 sinisellä ympyrällä merkityn syöttöpisteen lämpötila. Kuvassa 22 on esitetty syöttöpisteen, rengasverkon alueen ja muun Hirvensalon asiakkaiden menolämpötilojen keskiarvot tuntitasolla yhden viikon ajalta heinäkuussa 2018. Syöttöpisteen lämpötilaksi on otettu kahden syöttöpistettä lähellä olevan asiakkaan menolämpötilojen keskiarvo, koska verkostosta ei ole ollut saatavilla mittaus-tietoa. Tämän takia oikea syöttöpisteen menolämpötila on arviolta noin 0,5-1 °C korkeampi.



Kuva 22 Menolämpötilat alueen syöttöpisteessä, rengasverkon alueella ja muualla tarkastellulla alueella yhden viikon aikana heinäkuussa 2018

Alitusjohdossa kaukolämmön menoputki kulkee paluuputken sisällä ja näiden välillä on suurimman osan matkasta eristekerros. Ongelmia aiheuttavat molemmin puolin Pitkäsalmella olevat pätkät, joissa menoputken ja paluuputken välillä ei ole eristettä. Näissä kohdissa menopuolen lämpöhäviöt ovat merkittävät ja rakenteesta johtuen myös paluupuolen lämpötila nousee useita asteita.

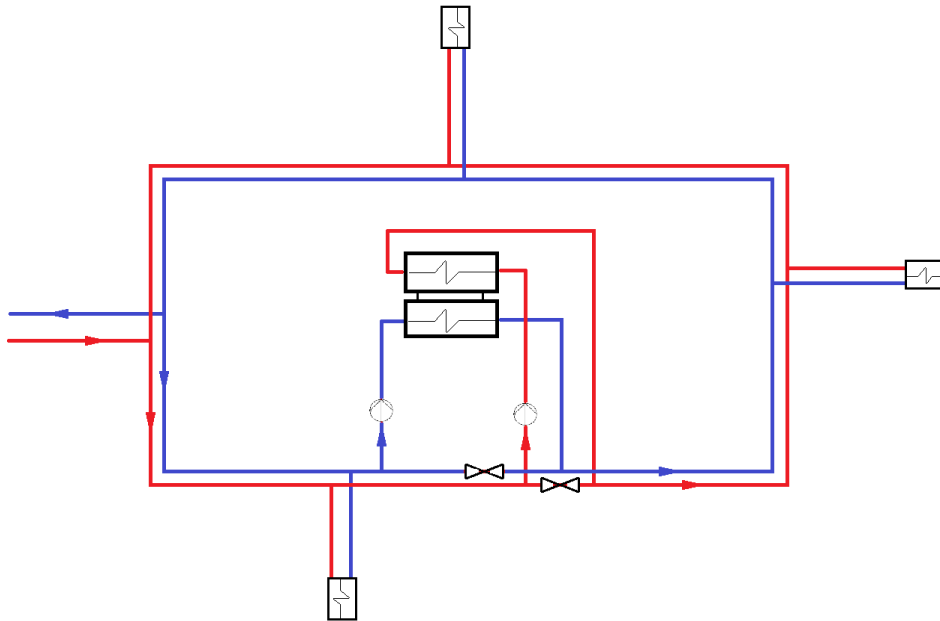
Pitkäsalmen alitusputken aiheuttamasta jäähtymästä huolimatta tarkastellun alueen lämpötilat pysyvät verkon päässä olevia asiakkaita lukuun ottamatta hyvällä tasolla. Etenkin kesällä jäähtymä muualla verkon alueella korostuu. Verkon perällä olevan rengasverkon asiakkaat on esitetty kuvassa 23. Pitkäsalmen rannalta rengasverkolle tulevan putken pituus on 2560 metriä ja sen varrella on vain muutamia asiakkaita. Rengasverkolle tulevaan siirtojohtoon nähden rengasverkon vastakkaisella sivulla olevan haaran päässä on menolämpötilojen kannalta haastavimmat asiakkaat. Näissä sinisellä neliöllä merkityissä kiinteistöissä on kiinteistökohtainen kiertorakenne. Ennen kierrot olivat DN20-kokoista putkea ja ne olivat jatkuvasti auki, jolloin oletettavasti kiertojen läpi on virrannut pahimmillaan useita kuutioita vettä tunnissa. Alkuvuodesta 2019 kiertoihin tehtiin muutoksia. Putket vaihdettiin pienempiin ja niihin asennettiin termostaattiventtiilit ja virtausmittaukset.



Kuva 23 Myötäisten rengasverkko, asiakkaat on merkitty punaisella neliöllä, kierrolliset asiakkaat sinisellä ja lämpökeskus keltaisella

6.2 Lämpöpumppu

Lämpöpumppu sijoitettiin rengasverkon alueella olevaan Myötäisten lämpökeskuksen tiloihin. Sillä on kuvan 24 mukaisesti tarkoitus lämmitellä kaukolämmön menopuolta paluupuolen lämmöllä. Verkon perän lämpötilan nostamisen lisäksi lämpöpumpulla saadaan rengasverkkoon kierto aikaan, jolloin lämpötila rengasverkon alueella pysyy tasaisempana myös matalan kulutuksen aikaan. Lämpöpumppu kierrättää vettä rengasverkossa vastapäivään, jolloin kriittisimpien asiakkaiden haara on virtaussunnassa ensimmäisenä. Lämpöpumpun hyöty onkin tarkoitus saada nimenomaan lämpimillä keleillä, kun virtausnopeus verkossa on matala pienen kulutuksen takia ja vesi jäähtyy matkalla alueen syöttöpisteestä rengasverkolle useita asteita. Työssä tutkittiin, voitaisiinko lämpöpumpulla alentaa alueen syöttöpisteen menolämpötilaa sekä vähentää kiertojen tarvetta.



Kuva 24 Myötäisten rengasverkon lämpöpumpukytkentä

Menopuolella lämpöpumpulle tulevan veden lämpötila on yleensä 60-75 °C ja paluupuolella 35-50 °C välillä. Lämpöpumpulla on tarkoitus syöttää verkkoon 65 °C vettä menopuolelle ulkolämpötilan ollessa yli 5 °C ja jäähdyttää paluupuolta 30-40 °C lämpötilaan. Matalammilla ulkolämpötiloilla kaukolämmön kulutus alueella nousee Koska lämpöpumpun lauhduttimelle ja höyrystimelle tulevien virtausten lämpötilat ovat lähellä toisiaan, on lämpöpumpun COP-arvo korkea. Valmistajan valintaohjelmasta saadaan, että suunnitelluilla lämpötilatasoilla lämpöpumpun lauhduttimen virtaus on 18-20 m³/h ja kahden rinnan kytketyn kompressorin teho noin 38 kW. Näillä käyttöarvoilla lämpöpumpun lämpötehoksi saadaan 215 kW ja COP-arvoksi 5,7. Jos lämpöpumpulla tuotettaisiin menopuolelle 68 °C vettä, olisi kompressoriteho 40 kW ja lämpötehoksi saataisiin 209 kW ja COP-arvoksi 5,2.

6.3 Laskentamalli

Hirvensalon etelähaaran lämpötilatasojen selvittämiseksi alueen kaukolämpöverkosta rakennettiin laskentamalli Microsoft Excel –taulukkolaskentasovelluksella. Laskentamallilla simuloitiin alueen syöttöpisteen menolämpötilan laskemisen vaikutuksia asiakkaiden menolämpötiloihin eri ulkolämpötiloissa. Lisäksi tarkasteltiin menolämpötilan muutosten vaikutuksia virtauksiin ja lämpöhäviöihin. Tilanteita tutkittiin verkon perälle asennetun

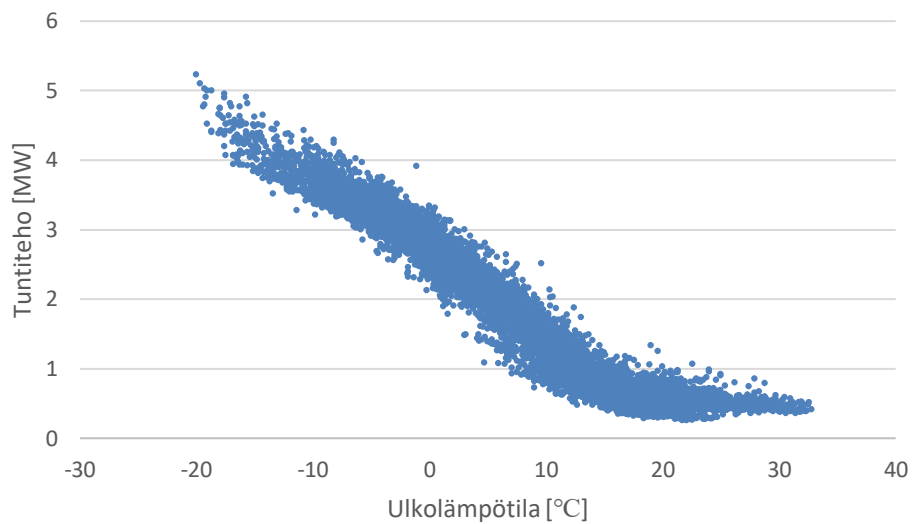
lämpöpumppua ollessa pois päältä ja päällä.

Laskentamallia varten haettiin alueen verkon putkistotiedot Trimble Webmap -ohjelmasta ja luotiin Exceliin malli verkosta. Putkiston tiedot on koottu taulukkoon 1.

Taulukko 1 Tarkastellun alueen putkiston pituudet putken tyyppin ja koon mukaan

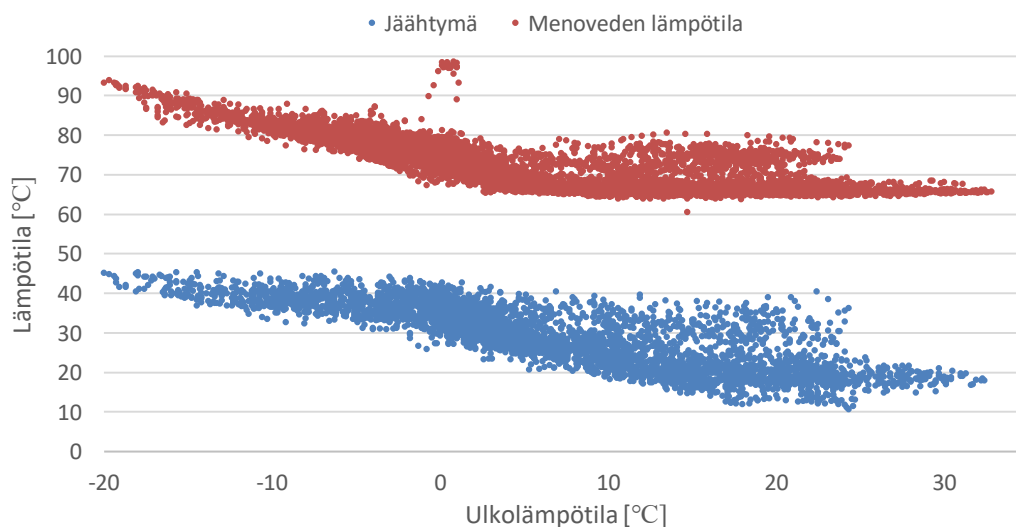
Putkityyppi	DN	Pituus [m]
MPUK	40	1192
	50	529
	65	1341
	80	1192
	100	801
	125	2103
	200	612
2MPUK	25	28
	40	28
	50	17
	65	111
	125	40
	150	2642
Yhteensä		10606

Simuloinnin pohjana käytettiin tuntimittaustiedon avoimesta palvelualustasta (TAP) haettuja kulutustietoja. TAP on Jatiko Oy:n kehittämä Excel-pohjainen alusta, josta voi haakea Turku Energian kaukolämpöverkon kulutus- ja verkostomittauspisteiden tuntitietoja. Saatavilla on mittauspisteestä riippuen tiedot meno- ja paluulämpötiloista, ulkolämpötilasta, virtauksesta ja energiankulutuksesta. Kuvassa 25 on esitetty koko Hirvensalon eteläsiirron alueen tuntiteho ulkolämpötilan suhteen vuonna 2018. Tähän dataan sovitettiin käyrät minimi-, keskiarvo- ja maksikulustilanteille. Sovitteiden perusteella laskentamallissa määritettiin alueen tehontarve ulkolämpötilasta. Simuloinneissa yksittäisen asiakkaan kulutus saatiin laskemalla asiakkaan kulutuksen osuus koko alueen kulutuksesta historiatietojen perusteella. Laskentamallilla simuloitiin staattisia tilanteita, joissa kulutus pysyy samana eikä vaihtelee ajan mukaan.



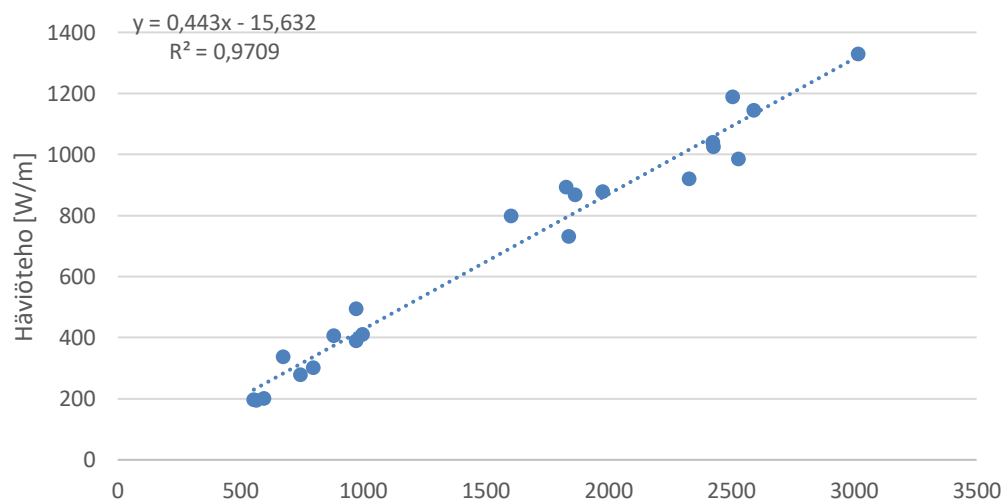
Kuva 25 Hirvensalon eteläsiirron alueen tuntiteho ulkolämpötilan suhteen vuonna 2018

Asiakkaiden virtaukset laskettiin kulutuksen ja jäähtymän avulla yhtälöllä 2. Asiakkaiden jäähtymän suuruuteen vaikuttaa menolämpötilan lisäksi kulutus. Kuvassa 26 on esitetty alueen jäähtymä ja menolämpötila ulkolämpötilan suhteen vuonna 2018. Kuvasta nähdään, että menolämpötilan ollessa noin 64-67 °C vaihtelee jäähtymän arvo keskimäärin välillä 15-30 °C. Ulkolämpötilan kasvaessa pienenee kulutus kuvan 25 mukaisesti, jolloin myös jäähtymä huononee, vaikka menolämpötila pysyisi samana. Laskentamallissa asiakkaiden jäähtymä on laskettu menolämpötilan perusteella ja kulutuksen vaikutus jäähtymään on otettu huomioon ulkolämpötilasta riippuvalla kertoimella.



Kuva 26 Jäähtymä ja menoveden lämpötilan ulkolämpötilan mukaan alueella vuonna 2018

Verkon lämpöhäviöiden laskenta perustuu luvussa 3 esitettyihin kaukolämpöputkien lämpöhäviötehoihin ja laskentamallissa hyödynnettiin Energiateollisuuden ry:n tarjoamia Mpuk- ja 2Mpuk-kaukolämpöputkien eristyspaksuuden optimointityökaluja. Pitkäsalmen alitusputken häviön määrittämistä varten putken häviö laskettiin TAP:sta saatujen lämpötila- ja virtaustietojen avulla yhtälöllä 2, kun lämpötilamuutoksena käytetään menopuolen jäähtymää. Laskettujen häviöiden perusteella määritettiin alitusputken menopuolen häviöteholle korrelaatio meno- ja paluuputken lämpötilaeron ja tilavuusvirran tulon funktiona. Tämä suhde on esitetty kuvassa 27.



Kuva 27 Pitkäsalmen alitusputken häviöteho meno- ja paluuputken lämpötilaeron ja tilavuusvirran tulon funktiona

Laskentamallin toimivuus testattiin antamalla lähtötiedoiksi vuoden 2018 kuukauden keskilämpötiloja ja mitattuja syöttöpisteen menolämpötiloja. Simuloinnilla saatuja asiakkaiden menolämpötiloja verrattiin TAP:sta saatuihin mittaustietoihin. Keskimääräinen suhteellinen virhe keskiarvojen perusteella laskettujen ja mitattujen lämpötilojen välillä oli noin 1 %. Käytännössä se tarkoittaa noin 1 °C negatiivista tai positiivista virhettä. Virhettä laskuihin aiheuttaa se, että kaikille asiakkaille on käytetty samaa jäähdytyskäyrää, vaikka jokainen lämmönsiirrin jäähdyttää hieman eri tavalla. Lisäksi virhettä aiheuttaa saman eristeluokan ja eristeen lämmönjohtavuuden käyttäminen kaikille putkille putken iästä huolimatta. Mpuk-johtojen eristeluokkana on käytetty II-luokkaa ja 2Mpuk-johtojen eristeluokkana III-luokkaa. Muita lämpöhäviöiden laskennassa käytettyjä tietoja on koottu taulukkoon 2.

Taulukko 2 Kaukolämpöjohtojen lämpöhäviöiden laskennassa käytettyjä tietoja

Eristeen lämmönjohtavuus	0,029 W/mK
Kuoren lämmönjohtavuus	0,4 W/mK
Maaperän lämmönjohtavuus	1,5 W/mK
Maan pinnan lämmönsiirtokerroin	12,0 W/m ² K
Peittosyvyys	0,6 m

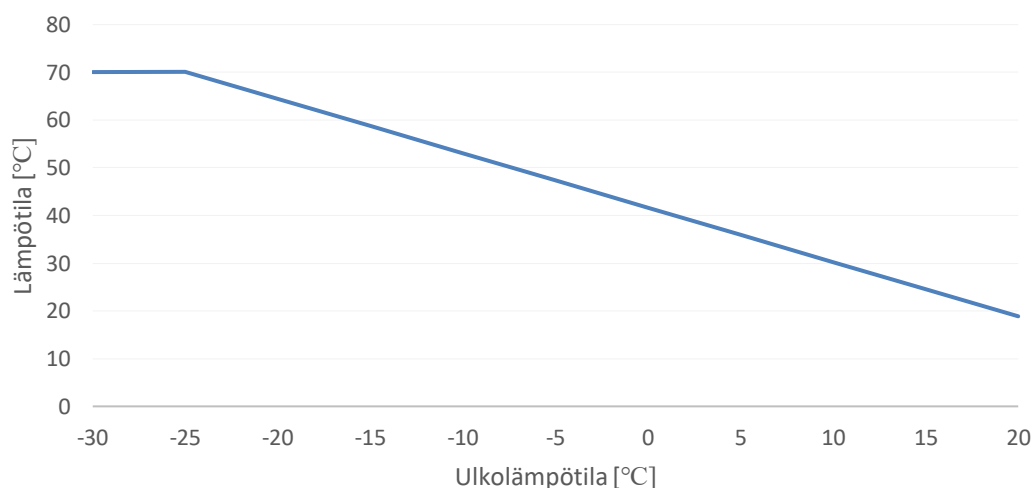
Laskentamallissa on myös oletettu, että kuvaan 21 merkityn alueen asiakkaiden virtaus tulee kokonaisuudessaan Hirvensalon eteläsiirron kautta. Todellisuudessa osa virtauksesta voi tulla myös Hirvensalon pohjoissiirron kautta, mutta laskennan yksinkertaistamiseksi on kaiken virtauksen oletettu tulevan samasta syöttöpisteestä. Tällä on merkitystä Pitkäsalmen alituksen jäähtymään, sillä suuremmalla tilavuusvirralla vesi virtaa putken läpi nopeammin ja jäähtyy vähemmän.

6.4 Tulokset

Lämpötilatasojen määrittämistä varten laskentamalliin syötettiin ulkolämpötila ja alueen syöttöpisteen menolämpötila, joiden perusteella useiden iterointikierrosten avulla laskettiin asiakkaiden kulutukset, virtaukset ja lämpötilat. Näin tutkittiin, kuinka alas alueen syöttöpisteen menolämpötila voitaisiin laskea ilman, että asiakkaiden menolämpötilat laskevat alle sovitun. Ensin tilannetta tutkittiin ilman verkon perälle asennettua lämpöpumpua ja määritettiin alhaisin mahdollinen menolämpötila syöttöpisteelle eri kulutustilanteissa. Sen jälkeen tarkasteltiin mahdollistaako lämpöpumppu alhaisemman syöttöpisteen menolämpötilan. Myös lämpöpumpun vaikutusta syöttöpisteeseen saapuvan paluuvirran lämpötilaan tutkittiin sekä laskettiin alentuneen paluulämpötilan vaikutus Pitkäsalmen alitusputken häviöihin. Saatujen lämpötilatasojen perusteella laskettiin alueen lämpöhäviöt.

Asiakkaiden menolämpötilan raja-arvon määrittämiseksi tarkasteltiin alueen kiinteistöjen lämmönsiirtimien mitoituslämpötiloja. Tarkastellun alueen rakennusten radiaattorilämmitykset on tyypillisesti mitoitettu 70/40 °C meno- ja paluulämpötiloihin. Kuvassa 28 on esitetty tällaisen lämmityksen toisiopuolen menolämpötilan ajokäyrä ulkolämpötilan suhteen. Kuvasta nähdään, että 0 °C ulkolämpötilassa toisiopuolen menolämpötila on enää

noin 40 °C. Tällöin kaukolämmön menopuolen lämpötilan määrää lämpimän käyttöveden valmistuksen vaatima lämpötila. Suurin osa alueen kiinteistöistä on mitoitettu 55/10 °C meno- ja paluulämpötiloihin, mutta joukossa on myös muutama kiinteistö, joissa mitoitus on 58/10 °C. Lämpöpumppua on tarkoitus käyttää ulkolämpötilan ollessa yli 5 °C, joten 58 °C lämpötilaan lämmitettävä lämmin käyttövesi määrää kaukolämpöverkolta vaaditun menolämpötilan. Näin asiakkaiden menolämpötilan raja-arvoksi asetettiin 65 °C. Rengasverkon alueella on tarkoitus kokeilla matalalämpötilaverkon toimivuutta, jolloin lämpöpumpulla ajettaisiin menopuolelle vettä 65 °C lämpötilassa. Tällöin rengasverkon alueella asiakkaiden menolämpötilat pyritäisiin pitämään päälle 60 °C lämpötilan.



Kuva 28 Tyypillinen asiakkaan radiaattorilämmityksen lämmönsiirtimen toisiopuolen menolämpötilan ajokäyrä ulkolämpötilan suhteen

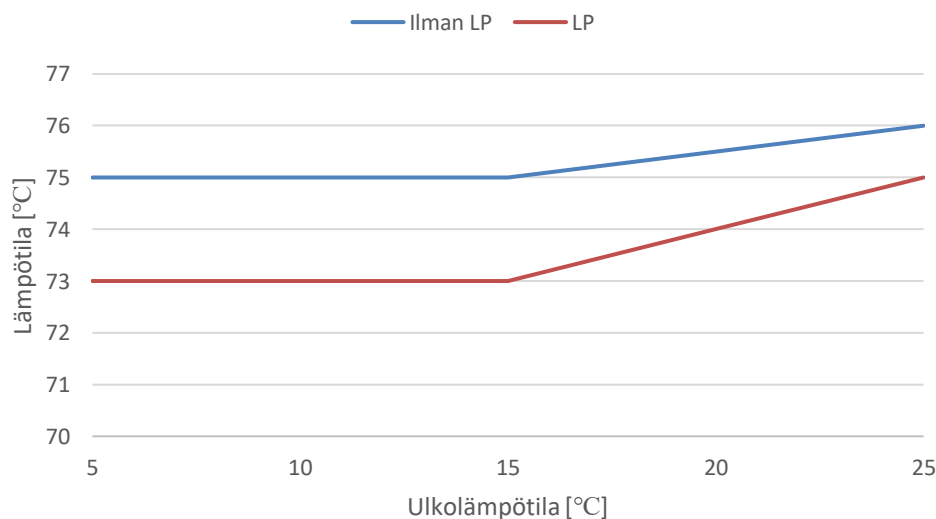
Asiakkaiden tarvitseman menolämpötilan lisäksi kaukolämmön menolämpötilan laskua rajoittaa siirtokapasiteetti. Lämmityskauden ulkopuolella kulutus on kuitenkin niin pientä, että siirtokapasiteetti ei tule vastaan, vaikka menolämpötilaa laskettaisiin useammallakin asteella.

6.4.1 Vaikutus lämpötilatasoihin

Verkostosimuloinneissa havaittiin, että lämpöpumpun käyttö ei kannata, jos rengasverkon alueella on matalampi asiakkaiden menolämpötilan raja-arvo kuin muualla tarkastellulla alueella. Jos rengasverkkoa edeltävien alueiden menolämpötilat pidetään yli 65 °C lämpötilassa, ei menolämpötila tipu alle 60 °C viimeiselläkään asiakkaalla. Tällöin lämpöpumpun käytöstä ei saada hyötyä alueen syöttöpisteen menolämpötilan alentamiseen

ja lämpöpumpun käytöstä aiheutuu vain kustannuksia. Pelkästään paluupuolen jäähdytävän vaikutuksen takia lämpöpumppua ei kannata ajaa, sillä Hirvensalon paluupuolen virtauksen sekoittuessa mantereella muuhun virtaukseen, jää vaikutus lämpötiloihin pieneksi. Jos asiakkaiden menolämpötilojen raja-arvot asetetaan koko tarkasteltavalla alueella joko 60 °C tai 65 °C lämpötilaan, muuttuu tilanne.

Asiakkaiden LVI-suunnitelmien perusteella menolämpötilan alarajaksi saatiin 65 °C ulkolämpötilan ollessa yli 0 °C. Tilannetta simuloitaessa lämpöpumpulla ajettiin verkon perällä menopuolelle vettä 68 °C lämpötilassa. Paluulämpötilan noustessa selkeästi yli 40 °C jäähdytettiin lämpöpumpulla paluupuoli 40 °C ja muutoin 35 °C lämpötilaan. Kuvassa 29 on esitetty lasketut syöttöpisteen alimmat mahdolliset menolämpötilat tapauksissa ilman lämpöpumppua ja lämpöpumpun kanssa eri ulkolämpötiloissa. Verkon perällä olevan kierrollisen asiakkaan menolämpötilaa ei saada järkevillä lämpötilatasoilla pidettyä päälle 65 °C. Lämpötilasäädetty kierto avautuu tarpeen mukaan pitäen asiakkaan lämpötilan sopivana. Kierron paluupuolta lämmittävä vaikutus saadaan minimoitua lämpöpumpulla.



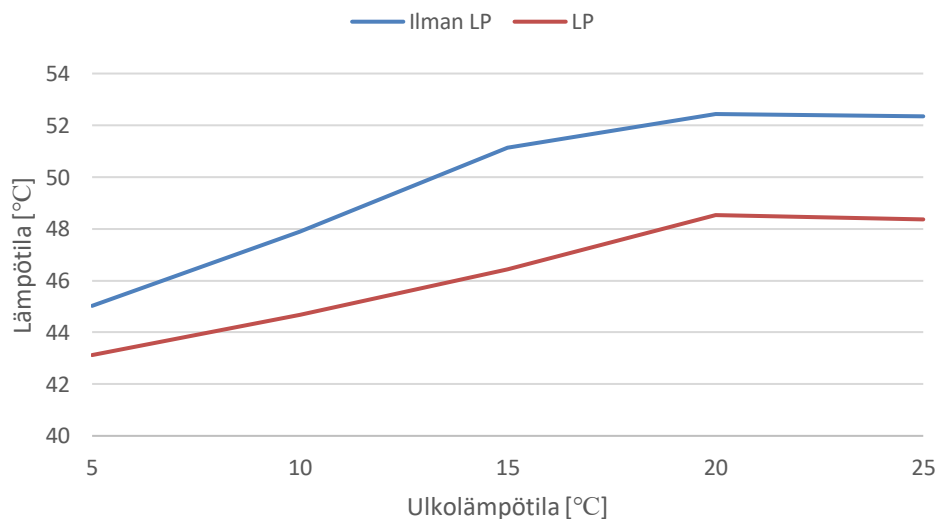
Kuva 29 Syöttöpisteen menolämpötila lämpöpumpun ollessa käytössä ja pois päältä

Kuvasta 29 huomataan, että saaduissa syöttöpisteen menolämpötiloissa ero on keskimäärin 1,7 °C ja parhaimmillaan 2 °C. Ulkolämpötilan tippuessa alle 5 °C lämpötilan ja kulutuksen kasvaessa ei lämpöpumpun tuotto enää riitä koko rengasverkolle. Tällöin ero

kaventuu ja poistuu lopulta kokonaan. Jos syöttöpisteen lämpötilaa laskettaisiin entisestään, alkaisivat rengasverkkoa edeltävien alueiden lämpötilat tippua alle 65 °C lämpötilan.

Mahdollisuuteen alentaa syöttöpisteen menolämpötilaa vaikuttaa myös lämpöpumpun paluupuolta jäähdyttävä vaikutus. Lämpöpumpun ollessa käytössä on alitukselle saapuvan paluuvirtauksen lämpötila keskimäärin 4,1 °C alhaisempi kuin ilman lämpöpumpua. Alituksessa menoputki on paluuputken sisällä, joten matalampi paluupuolen lämpötila lisää putkien lämpötilaeroa ja siten lämmönsiirtoa menopuolelta paluupuolelle. Tällöin menopuolen häviöt ja jäähdytys alituksessa lisääntyvät.

Lämpöpumpun vaikutus paluupuolen lämpötilaan syöttöpisteen kohdalla on esitetty kuvassa 30. Paluupuolen lämpötila nousee ulkolämpötilan noustessa, koska pienentyvä kulutus huonontaa jäähdytystä. Lopullinen ero paluupuolen lämpötiloissa vaihtelee 1,9 °C ja 4,7 °C välillä.



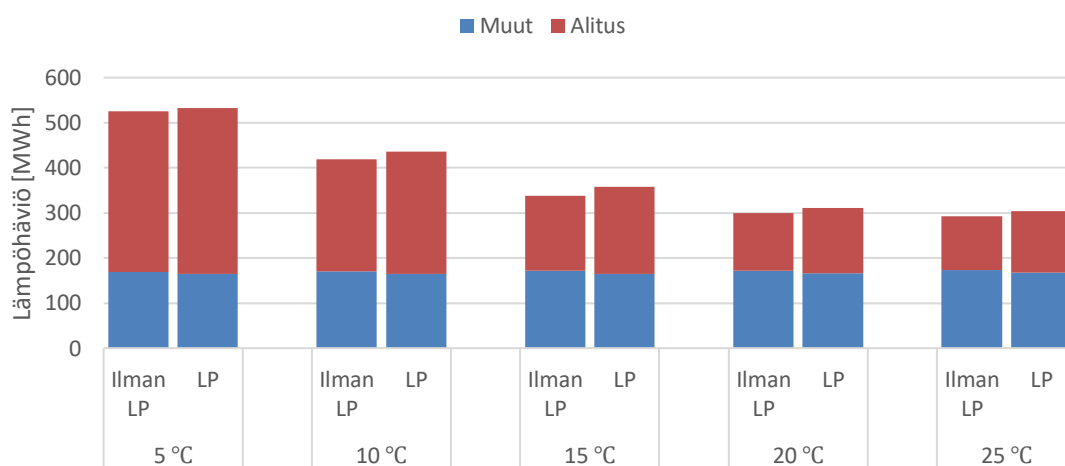
Kuva 30 Paluupuolen lämpötila syöttöpisteessä lämpöpumpun ollessa käytössä ja pois päältä

Verkostomallinnuksen epätarkkuudesta johtuen tulokset ovat vain suuntaa antavia ja ulkolämpötilan noustessa tulisikin tehdä koeajoja. Laskentamallissa käytetyn jäähdytys alarajaksi määritettiin historiatietojen perusteella 15 °C, kun asiakkaan menolämpötila on 65 °C. Todellisuudessa jäähdytys saattaa tapahtua lähemmäs 10 °C, kun kulutus on pientä. Tällä on merkitystä etenkin korkeissa ulkolämpötiloissa saatuihin syöttöpisteen meno-

lämpötilojen raja-arvoihin. Koeajoilla voitaisiin tutkia menolämpötilan laskemisen vaikutusta asiakkaiden jäähtymään tarkemmin sekä tutkia, millä menolämpötilalla asiakkaiden lämmönsiirtimet kykenevät vielä tuottamaan tarpeeksi lämmintä käyttövettä.

6.4.2 Lämpöhäviöt

Hirvensalon alueen lämpöhäviöt eri lämpötilatasoilla saatiin laskentamallista. Kuvassa 31 on esitetty alueen häviöt eri ulkolämpötiloissa eriteltynä alituksen häviöihin ja muihin häviöihin. Häviöt on laskettu kuvassa 29 esitettyjen syöttöpisteen menolämpötilojen pohjalta. Tällöin keskilämpötila Hirvensalon alueella on noin 7 °C alempi kuin syöttöpisteen lämpötila.

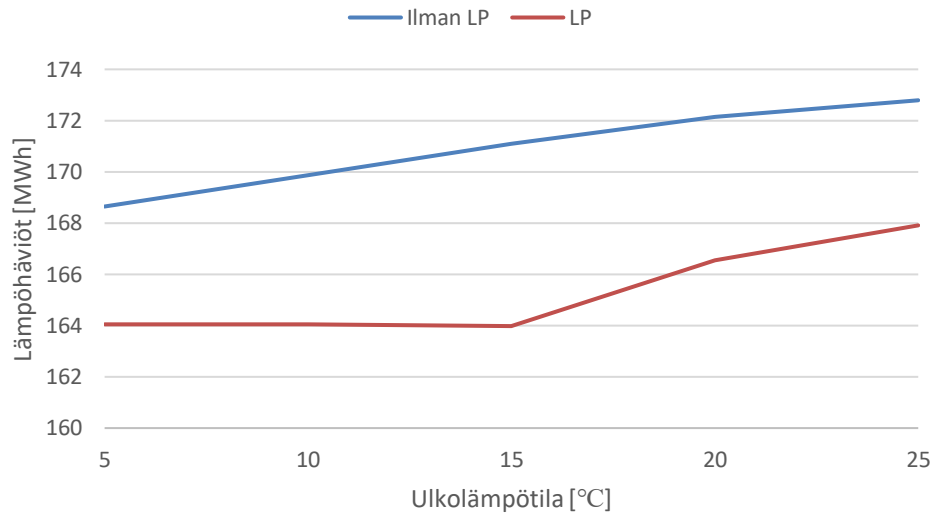


Kuva 31 Lämpöhäviöt lämpöpumpun kanssa ja ilman lämpöpumppua eri ulkolämpötiloissa eriteltynä Pitkäsalmien alituksen häviöihin ja muihin häviöihin

Kuvasta 31 huomataan, että alituksen häviöt kasvavat ulkolämpötilan laskiessa johtuen suuremmasta virtauksesta ja lämpötilaerosta meno- ja paluupuolen välillä. Lisäksi havaitaan, että lämpöpumppua käytettäessä kokonaishäviöt ovat suuremmat. Tämä johtuu matalamman paluulämpötilan aiheuttamasta meno- ja paluupuolen kasvaneesta lämpötilaerosta ja siten suuremmista alituksen häviöistä. Lämpöpumpun mahdollistama menopuolen lämpötilan laskeminen ei ole yhtä suuri kuin paluupuolen lämpötilan alenema, jolloin lämmönsiirto menoputkesta paluuputkeen tehostuu Pitkäsalmien alituksessa.

Pitkäsalmien alitusputki on tälle tarkasteltavalle alueelle ominainen piirre, jota ei esiinny muualla Turku Energian kaukolämpöverkossa. Jotta tuloksista saataisiin jotain viitteitä

ratkaisun toimivuudesta yleisellä tasolla, tarkastellaan tilannetta ilman alituksen häviöitä. Häviöt perustuvat kuvan 29 syöttöpisteen menolämpötilojen pohjalta tehtyihin simuloimisiin. Kuvassa 32 on esitetty alueen kokonaishäviöt ilman alitusta.



Kuva 32 Alueen häviöt ilman alituksen häviöitä lämpöpumpun kanssa ja ilman

Keskimäärin lämpöpumppua käytettäessä kokonaishäviöt ovat 3,4 % pienemmät kuin ilman lämpöpumppua. Tässä tarkasteltiin vain Hirvensalon eteläsiirron alueen lämpöhäviöitä lämpötilatasojen muuttuessa. Todellisuudessa syöttöpisteen menolämpötilan alentaminen vaikuttaa myös sitä edeltävään alueeseen samoin kuin Hirvensalosta saapuvan paaluvirtauksen lämpötilan muuttuminen. Lämpöpumppukytken vaikutusta koko verkon tasolla tarkastellaan tarkemmin luvussa 7.

7 MONISTETTAVUUS

Työssä tarkasteltiin myös mahdollisuutta toteuttaa pilottikohteen kaltaisia ratkaisuja muuallakin Turku Energian kaukolämpöverkossa. Vertailtaviksi tarkastelukohteiksi valittiin Petäsmäki ja Tikanmaa, sillä ne ovat pilottikohteen tapaan pitkän siirtojohton päässä ja lämpötilat laskevat lämpimillä keleillä runsaasti. Näille alueille luotiin vastaavanlainen laskentamalli kuin pilottikohteelle ja tutkittiin mahdollisuutta alentaa alueiden syöttöpisteiden meno- ja paluulämpötiloja. Saatuja simulointituloksia vertailtiin keskenään ja arvioitiin lämpöpumpuista saatavaa hyötyä koko Turku Energian kaukolämpöverkon alueella.

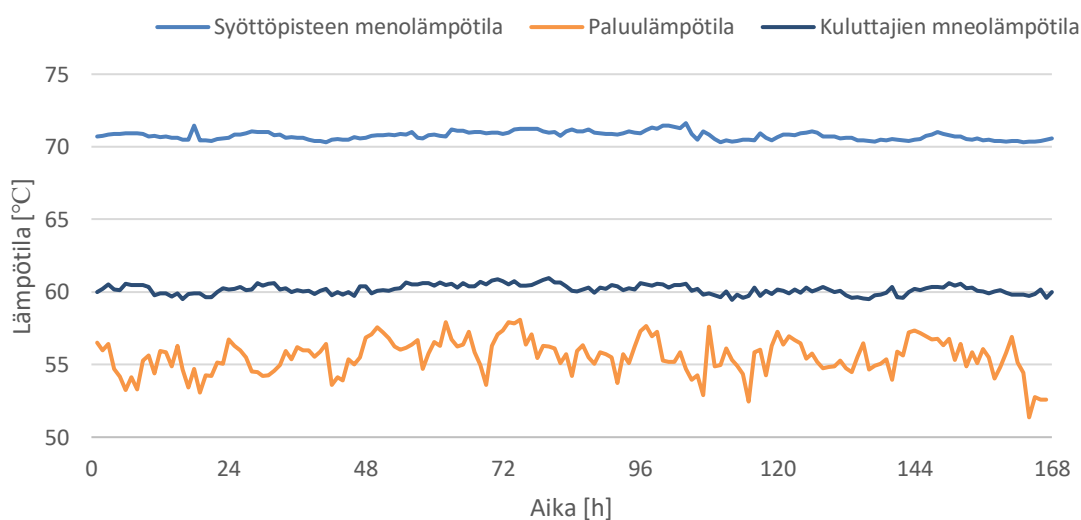
7.1 Kohde 1

Petäsmäki valittiin tarkastelukohteeksi, koska alueen häviöt ovat matalasta kulutuksesta ja Apu-johdoista johtuen suuret. Alueella on myös pilottikohteen tapaan rengasverkko viimeisten asiakkaiden ympärillä kuvan 33 mukaisesti. Suurin osa alueen kaukolämpöön kuuluvista 137:stä kiinteistöstä on omakotitaloja. Alueen tilausteho onkin vain 2,95 MW. Kaukolämpöverkosto on pääasiassa 70- ja 80-luvuilla rakennettua Apu-johtoa, mutta lisäksi alueella on Mpul-, Mpuk- ja 2Mpuk-johtotyyppisiä. Putkiston iästä johtuen voidaan olettaa, että eristeen lämmönjohtavuus on kasvanut ja eristeen kunto vaikuttaa oleellisesti lämpöhäviöiden määrään alueella.



Kuva 33 Petäsmäen kaukolämpöverkko, johon syöttöpiste on merkitty keltaisella

Jäähtymä alueen syöttöpisteestä kriittisimmille asiakkaille on matalasta kulutuksesta ja lämpöhäviöistä johtuen jopa yli 10 °C. Kuvassa 34 on esitetty alueen syöttöpisteen menolämpötila, asiakkaiden menolämpötilojen keskiarvo ja paluulämpötila. Koko alueen keskimääräinen menolämpötila oli noin 60 °C, kun syöttöpisteen lämpötila oli 71 °C. Kuitenkin jopa 48 asiakkaan viikon menolämpötilojen keskiarvo oli tarkastellulla viikolla alle 60 °C. Matalista menolämpötiloista ja huonosta jäähtymästä johtuen alueen paluulämpötila oli keskimäärin 55 °C.



Kuva 34 Petäsmäen syöttöpisteen menolämpötila, asiakkaiden menolämpötilojen keskiarvo ja paluulämpötila

Kriittisimmät asiakkaat ovat pientaloasiakkaita. Nämä asiakkaat on merkitty kuvaan 35. Jos lämpöpumppu sijoitettaisiin rengasverkossa olevan lämpökeskuksen tontille kuvaan 35 keltaisella merkittyyn kohtaan, voitaisiin lämpöpumpulla kierrättää vettä rengasverkossa vastapäivään. Tällöin kuitenkin ongelmallisiksi jäisivät kuvan alalaidassa olevat asiakkaat, sillä haaran perälle vievä linja haarautuu ennen rengasverkkoa. Alempi haara saataisiin lämpöpumpun piiriin, jos se yhdistettäisiin rengasverkkoon uudella johdolla. Tällöin saataisiin lämpöpumpulla lämmitetty vesi kiertämään koko verkon alueella.

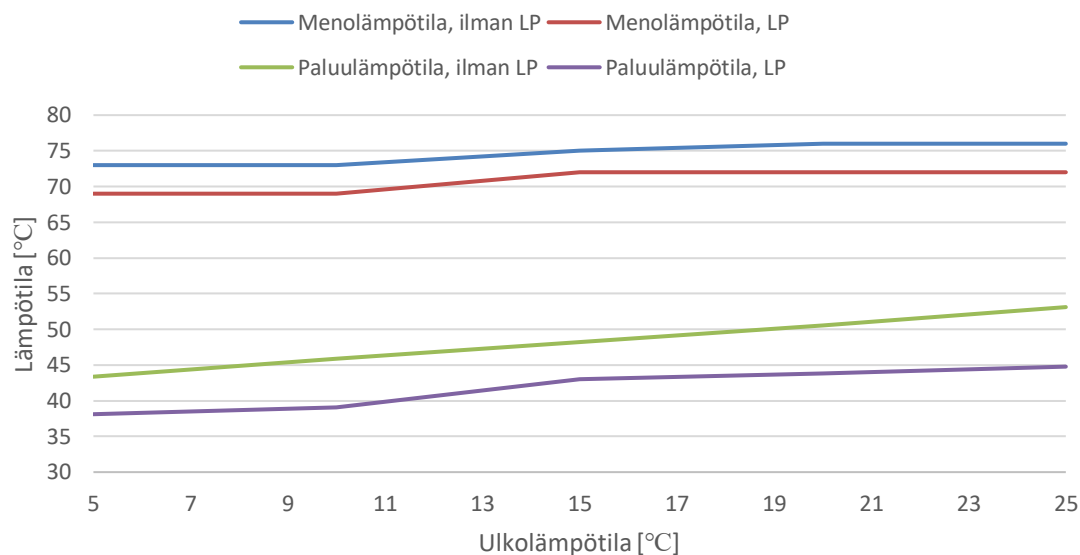


Kuva 35 Petäsmäen asuinalueen haasteellisimmat asiakkaat. Lisäksi kuvaan on merkitty keltaisilla neliöillä lämpöpumpun mahdolliset sijoituspaikat

Tässä tilanteita simuloitiin kuitenkin vain tilanteessa, jossa lämpöpumppu on sijoitettu linjaan ennen omakotitaloaluetta. Tällöin koko alueen lämpötilaa saadaan nostettua, mutta lämpöpumpulla ei voida kierrättää vettä verkossa. Petäsmäen alue on matalan kulutuksen aikaan haastava, koska suurin menoveden jäähtyminen tapahtuu pientalojen talojohdoissa. Tällöin lämpötilan nostaminen ei merkittävästi auta asiakkaan menolämpötilan nostamisessa. Ennen aluetta sijoitetulla lämpöpumpulla voidaan kuitenkin nostaa menolämpötilaa siten, että aiempien haarojen lämpötilaa ei tarvitse pitää korkeana. Simuloinneissa pientalojen menolämpötilarajaksi asetettiin $60\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Kuvassa 36 on esitetty simuloinneilla saadut lämpötilat ilman lämpöpumppua ja lämpöpumpulla. Verkon perän lämpötila nostettiin lämpöpumpulla $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja paluupuoli jäähdytettiin $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ lämpötilaan kun ulkolämpötila oli välillä $15\text{--}25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Matalammilla ulkolämpötiloilla pientalojen kulutus nousee merkittävästi, jolloin jäähtymä talohaaroissa pienee. Tällöin lämpöpumpun menupuolen lämpötilaksi riittäisi $70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Simuloiduilla lämpötiloilla suurin osa pientalojen menolämpötiloista saadaan nostettua päälle $60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Simulointien perusteella alueen syöttöpisteen menolämpötilaa voitaisiin alentaa keskimäärin 4

°C ja paluupuolen lämpötilaa 6,5 °C. Alemmilla lämpötilatasoilla tarkasteltavan alueen häviöt pienevät noin 2,7 %.



Kuva 36 Petäsmäen meno- ja paluupuolen lämpötilat eri ulkolämpötiloissa lämpöpumpulla ja ilman lämpöpumppua

Lämpöpumpun tehoon vaikuttaa tuotettava menopuolen lämpötila. Jos Petäsmäellä käytettäisiin vastaavaa lämpöpumppua kuin Hirvensalossa, olisi vaadittava kompressoriteho 45 kW korkeamman menopuolen lämpötilan takia. Lämpöpumpun mitoitukseen vaikuttaa myös virtausmäärä. Verkon perälle lämpöpumpun kautta virtaavan veden määrä on 25 °C ulkolämpötilassa 9 m³/h ja 5 °C ulkolämpötilassa 30 m³/h. Koko alueen vastaavat määrät ovat 14,5 m³/h ja 49 m³/h.

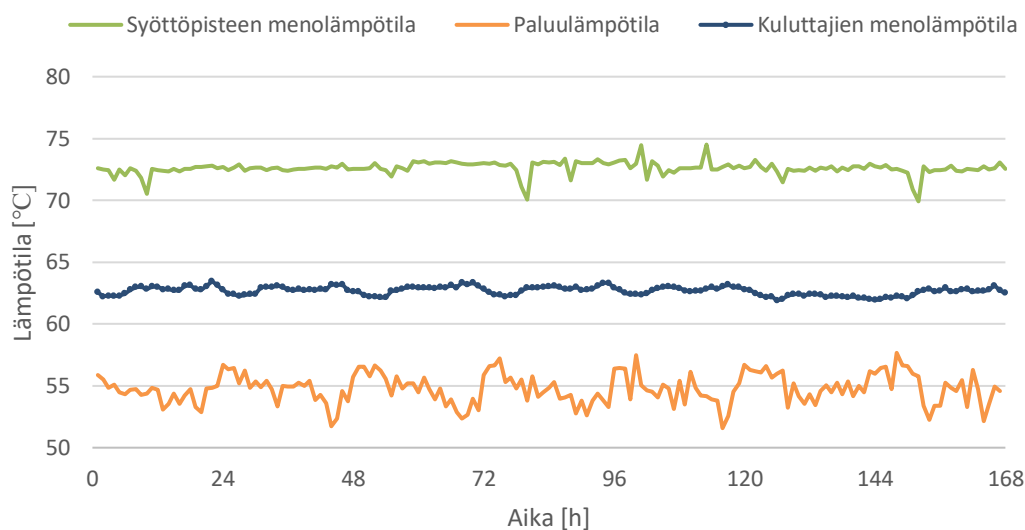
7.2 Kohde 2

Toiseksi tarkastelukohteeksi valittiin Tikanmaa. Alueella on pääosin omakotitaloasuntoja ja asuntoalue sijaitsee pitkän kaukolämpöhaaran päässä kuvan 37 mukaisesti. Asiakkaita haaran päässä on yhteensä 128 ja alueen tilausteho on vain 2,14 MW. Alueen kaukolämpöverkosto koostuu pääosin Mpuk- ja 2Mpuk -johtotyypeistä, mutta joukossa on myös Mpul -johtoja. Suurin osa johdoista on asennettu jo 90-luvun alkupuolella, joten niiden eristeen lämmönjohtavuuden voidaan olettaa kasvaneen. Tällä on myös oletettavasti vaikutusta alueen häviöihin.



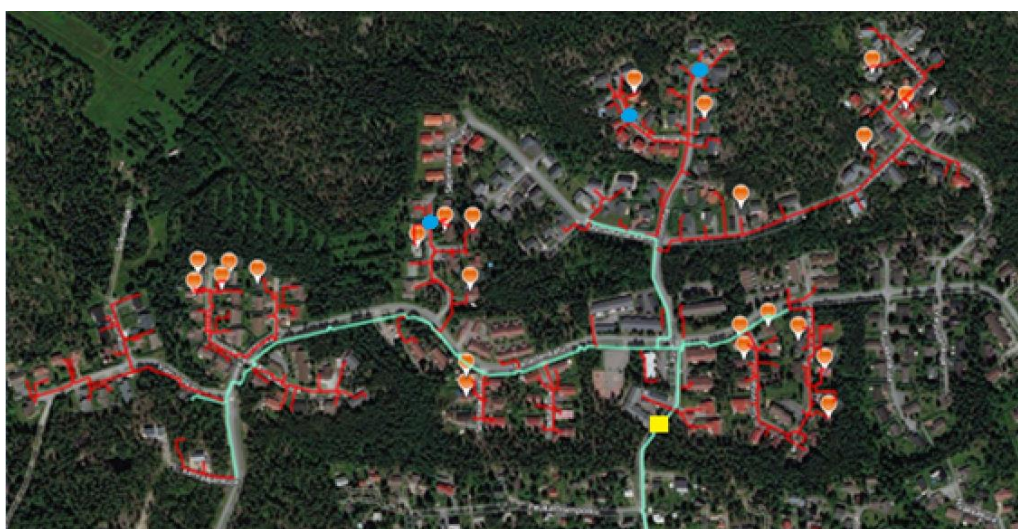
Kuva 37 Tikanmaan kaukolämpöverkko, johon alueen syöttöpiste on merkitty keltaisella neliöllä

Ulkolämpötilan noustessa päälle 10 °C laskee alueen tuntiteho alle 0,5 MW. Tästä johtuen menovesi jäähtyy noin 1-4 °C jo matkalla syöttöpisteestä asuinalueelle. Lisäksi lämpötila laskee vielä useita asteita talohaaroissa. Kuvassa 38 on esitetty syöttöpisteen lämpötila, asiakkaiden menolämpötilan keskiarvo ja paluulämpötila yhden viikon ajalta heinäkuussa 2018. Tarkastelujakson aikana ulkolämpötila on vaihdellut välillä 13-30 °C. Kuvasta nähdään, että asiakkaiden lämpötilojen keskiarvo on jatkuvasti alle 65 °C. Alueella on 128 asiakasta, joista 18 menolämpötilan keskiarvo oli alle 60 °C tarkastellulla viikolla. Jäähdytymä syöttöpisteeltä kriittisimmille asiakkaille on siis pahimmillaan yli 10 °C. Lisäksi huomataan, että alueen paluulämpötila on keskimäärin 55 °C matalista menolämpötiloista ja huonosta jäähdymästä johtuen.



Kuva 38 Tikanmaan syöttöpisteen menolämpötila, asiakkaiden menolämpötila ja paluulämpötila yhden viikon aikana

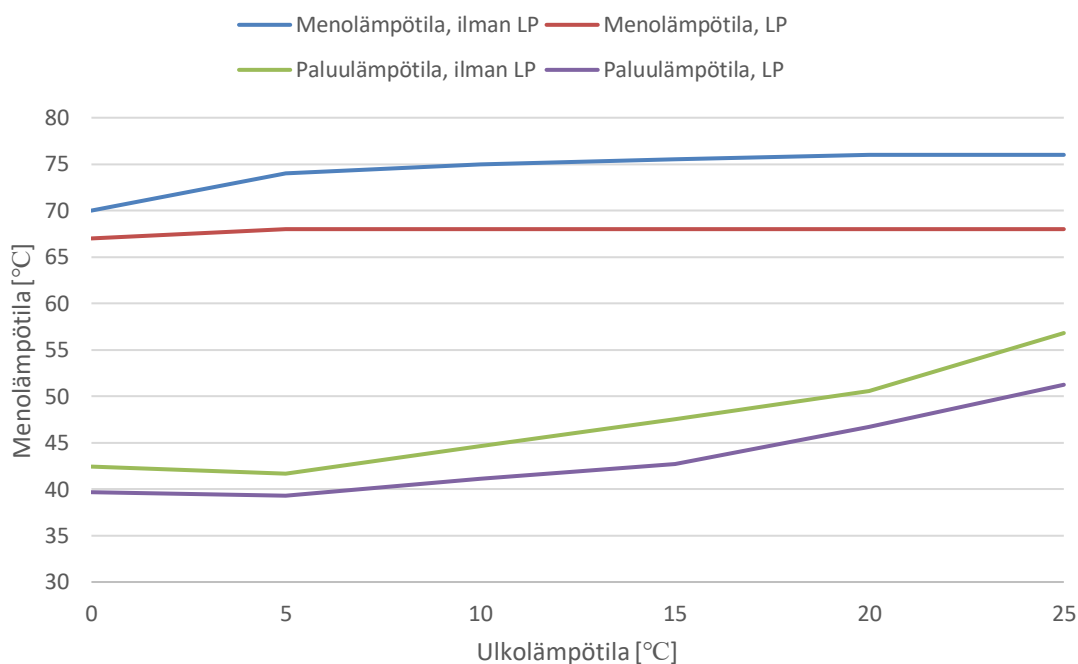
Koska asiakkaiden lämmönsiirtimet ovat toimineet nykyisilläkin lämpötilatasoilla kohtuullisesti määritettiin verkon häntäpäähän menolämpötilarajaksi 60 °C. Siirtojohdon varrella on muun muassa päiväkotia ja koulu, joten näille asiakkaille alarajaksi määritettiin 65 °C. Lämpöpumppu voitaisiin verkon asiakkaiden perusteella sijoittaa esimerkiksi juuri ennen asuinalueen haaraa kuvan 39 mukaisesti. Tällöin sillä voitaisiin nostaa asuinalueelle menevän menoveden lämpötilaa ja alentaa alueelta korkeassa lämpötilassa tulevaa kaukolämmön paluuv veden lämpötilaa. Lopullisen sijoituspaikan määrittämiseksi tulisi kuitenkin tutkia tarkemmin alueen kaavoitusta ja sähköliittymän riittävyyttä.



Kuva 39 Tikanmaan asuinalueen haasteelliset asiakkaat. Lisäksi kuvaan on merkitty keltaisella lämpöpumpun mahdollinen sijoituspaikka ja sinisellä tiedetyt kierrot

Koska Tikanmaalla ei ole kahden muun tarkastelukohteen tapaan rengasverkkoa viimeisten asiakkaiden ympärillä, ei alueelle saada kiertoa aikaan. Tästä johtuen matala kulutus aiheuttaa edelleen sen, että menovesi jäähtyy suhteettoman paljon putkissa. Kuvaan 39 on merkitty ne asiakkaat, joiden menolämpötila tippuu mittaustietojen perusteella alle 60 °C lämpötilan. Lisäksi kuvaan on merkitty alueen tiedetyt kierrot. Nykyisellään kierrot eivät selvästikään riitä asiakkaiden menolämpötilojen pitämiseen riittävällä tasolla. Alueelle tulisikin harkita termostaattiventtiileillä ohjattujen kiertojen lisäämistä. Lämpöpumpulla voitaisiin minimoida kiertojen paluupuolta lämmittävä vaikutus.

Lämpöpumpun potentiaalia tutkittiin simuloimalla alueen lämpötilatasoja eri kulutusilla. Kuvassa 40 on esitetty syöttöpisteen menolämpötilat ja vastaavat paluulämpötilat sekä lämpöpumpun ollessa käytössä että ilman lämpöpumppua. Lämpöpumpulla nostettiin menopuolen lämpötila 73 °C lämpötilaan. Paluupuoli jäähdytettiin 35 °C lämpötilaan tulevan paluulämpötilan pysyessä alle 50 °C. Tämän jälkeen paluupuoli jäähdytettiin 40 °C lämpötilaan, sillä isolla lämpötilaerolla lämpöpumppu pystyy jäähdyttämään pienemmän määrän. Simuloituilla menolämpötiloilla melkein kaikkien asiakkaiden menolämpötilat saadaan päälle 60 °C. Alueella on muutamia erittäin hyvin jopa matalilla menolämpötiloilla jäähdyttäviä asiakkaita, joiden menolämpötilan saamiseksi päälle 60 °C tulisi näihin kiinteistöihin asentaa termostaattiventtiilillä varustetut kierrot. Menolämpötilat haettiin siten, että asiakkaiden menolämpötilat verkon perällä olivat vastaavat sekä ilman lämpöpumppua että lämpöpumpulla. Lämpöpumpun ollessa käytössä voitiin keskimäärin alueelle syöttää 7,3 °C viileämpää vettä ja syöttöpisteeseen palaavan veden lämpötila oli 4 °C matalampi. Matalampien lämpötilatasojen vuoksi alueen häviöt pienenevät keskimäärin 4,7 %.



Kuva 40 Syöttöpisteen meno- ja paluulämpötilat ilman lämpöpumppua ja lämpöpumpulla

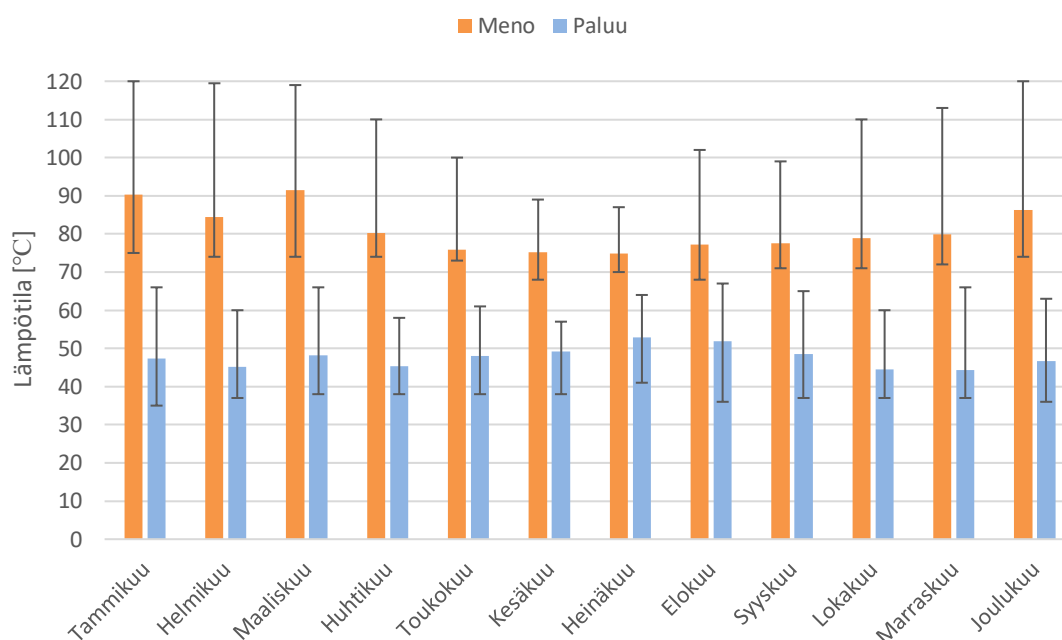
Alueen matalan tehontarpeen takia myös virtausmäärät jäävät pieniksi. Simuloiduissa tapauksissa ulkolämpötilan ollessa 5 °C koko alueen virtausmäärä oli 33,5 m³/h ja haaran päädyn asuinalueen 13,1 m³/h. Korkeammilla ulkolämpötiloilla virtausmäärät jäävät vieläkin pienemmiksi. Virtausmäärien ollessa pieniä riittäisi alueelle pilottikohdetta pienempitehoinen lämpöpumppu, jolloin myös sen käyttökustannukset olisivat matalammat.

7.3 Turku Energian kaukolämmön jakeluverkko

Edellä tarkasteltujen yksittäisten kohteiden perusteella tutkittiin lämpötilatasojen tiputtamisen vaikutusta koko Turku Energian kaukolämpöverkossa. Turussa kaukolämpöverkko koostuu sunttialueista, joihin syötetään kuumaa vettä Naantalin CHP-laitokselta tulevasta tunnelisiirto johdosta. Tällöin koko verkoston menolämpötilaa ei tarvitsisi tiputtaa kerralla vaan lämpötilatasojen tiputus voitaisiin tehdä sunttialue kerrallaan sitä mukaan, kun alueen lämpötilatason laskemista rajoittavat tekijät on tunnistettu ja poistettu. Tässä työssä tarkasteltiin kuitenkin yksinkertaisuuden vuoksi tilannetta, jossa koko verkon lämpötilataso muutettaisiin kerralla.

Turku Energialla on viime vuosina tehty jo paljon töitä kaukolämmön jakelun verkostohäviöiden pienentämiseksi erityisesti menolämpötilaa laskemalla. Kuvassa 41 on esitetty

Turun alueen kaukolämpöverkon keskimääräiset meno- ja paluupuolen lämpötilat vuonna 2018. Kesäaikaan menolämpötila on keskimäärin ollut Lämpölaitosyhdistyksen suosituksen mukainen 75 °C. Tätä suositusta tulee kuitenkin soveltaa jokaiseen kaukolämpöverkoston erikseen ja hakea optimaalinen lämpötilataso tuotannon, pumppauksen, lämpöhäviöiden ja kaukolämmön jakelun velvoitteiden osalta. Koko verkon keskilämpötilaa voitaisiin laskea alle 70 °C, kunhan kriittisimpienkin asiakkaiden lämmön saanti turvataan. Paluupuolen lämpötilan koko vuoden keskiarvo on 47,5 °C ja huhti-syyskuun 49 °C.



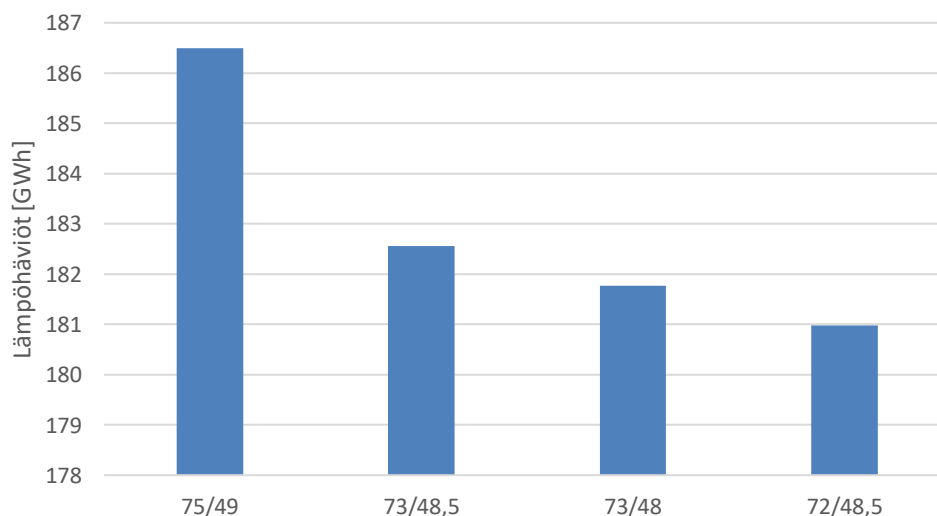
Kuva 41 Turun kaukolämpöverkon keskimääräiset meno- ja paluulämpötilat vaihteluväleinen

Tarkasteltujen kohteiden perusteella voidaan todeta, että lämmittämällä verkon häntäpäitä erillisratkaisuilla voitaisiin lämpötiloja verkon alkupäässä tiputtaa. Jos tämä toteutetaan lämpöpumpuilla, kuten edellä tarkasteluissa on tehty, saadaan samalla paluulämpötilaa alennettua. Paluulämpötilan alentaminen vähentää lämpöhäviöitä ja lisää samalla savukaasulauhduttimista saatavaa tehoa. Turku Energian kaukolämpöverkossa on 12 MW savukaasulauhdutin Orikedon biolämpökeskuksen yhteydessä ja Naantalin uudelle CHP-laitokselle on rakenteille 60 MW savukaasulauhdutin, joka valmistuu vuoden 2019 loppuun mennessä.

Kolmen tarkastellun kohteen perusteella menolämpötila voitaisiin laskea nykyisestä 75

°C lämpötilasta 73 °C lämpötilaan. Syöttöpisteen paluulämpötilaa saatiin keskimäärin laskettua 4,7 °C. Tämä ei kuitenkaan suoraan kerro koko verkon tasolla saatavasta paluulämpötilan laskusta, sillä verkon häntäpäissä kiertää vain pieni osa koko verkon vesimäärästä. Keskimääräisellä kulutuksella on verkossa kiertävän veden määrä pienimmilläänkin noin 3300 m³/h. Kolmen tarkastelukohteen syöttöpisteiden virtausten keskiarvo oli 24-53 m³/h ulkolämpötilan vaihdellessa välillä 5-25 °C. Kun keskimääräinen paluulämpötila on 49 °C, tulisi lämpöpumpuilla jäähdytetyn vesimäärän olla 730 m³/h, jotta paluulämpötilaa saataisiin koko verkon tasolla laskettua asteella. Tämän perusteella lämpöpumpuja tarvittaisiin keskimäärin 14, jos yhdellä lämpöpumpulla jäähdytetään 53 m³/h. Voidaankin pitää todennäköisenä, että lämpöpumpuilla ei ole merkittävää vaikutusta paluupuolen lämpötilaan koko verkon tasolla.

Koko Turku Energian kaukolämpöverkon lämpöhäviöt laskettiin neljällä eri lämpötilatasolla. Perustilanteeksi valittiin vuoden 2018 ja menolämpötilasuosituksen perusteella 75/49 °C. Lämpöpumpuja hyödyntämällä voidaan alentaa verkon menolämpötilaa, mutta paluupuolen lämpötilaan ei todennäköisesti merkittävästi voida vaikuttaa. Häviöt laskettiin kahdella eri lämpötilatasolla 73/48,5 °C ja 72/48,5 °C. Lisäksi laskettiin häviöt lämpötilatasolla 73/48 °C, jotta voidaan vertailla paluupuolen lämpötilan alentamisen vaikutusta häviöihin. Häviöt laskettiin kaukolämpöverkon putkiston perusteella kappaleessa 3.3 esitetyllä tavalla. Kuvassa 42 on esitetty häviöt eri lämpötilatasoilla vuoden aikana.

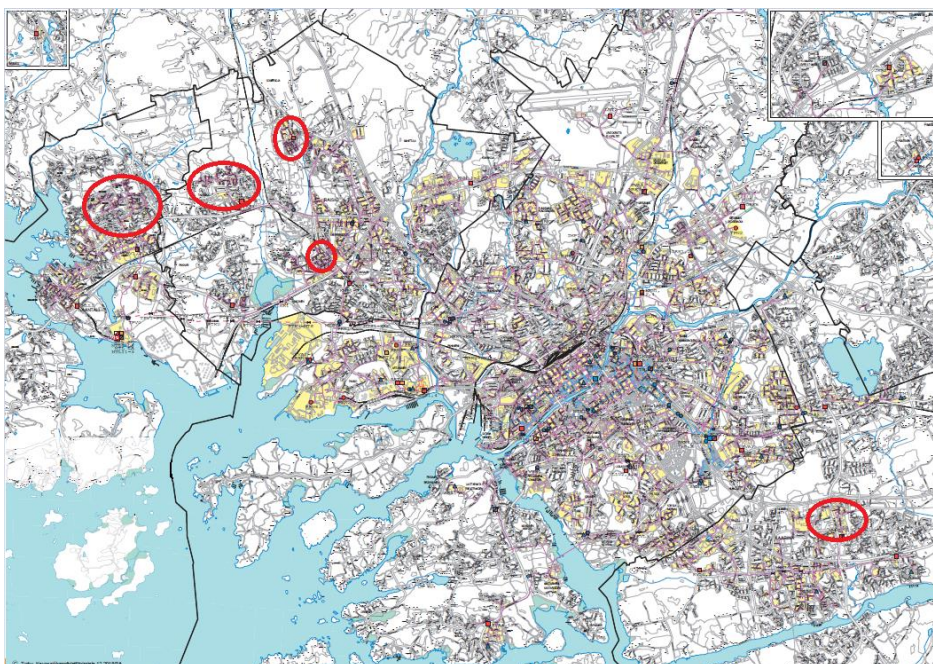


Kuva 42 Koko verkon häviöt eri lämpötilatasoilla

Jos menolämpötilaa alennettaisiin kahdella asteella, pienenisivät häviöt 2,2 %. Jos lisäksi

voitaisiin alentaa paluupuolen lämpötilaa yhdellä asteella, olisivat häviöt 2,6 % pienemmät. Todennäköisesti koko verkon paluupuolen lämpötilaan ei kuitenkaan voida merkittävästi vaikuttaa lämpöpumpuilla. Vaikka koko verkon tasolla paluupuolen lämpötilaa ei voitaisi merkittävästi laskea, laskisivat lämpöpumput paluulämpötilaa kuitenkin alueellisesti. Menopuolen lämpötilan lasku 72 °C lämpötilaan paluupuolen lämpötilan laskiessa puolella asteella vähentäisi häviöitä 3,0 %. Tämä voisi Tikanmaan ja Petäsmäen tarkastelujen valossa olla mahdollista.

TAP-ohjelmaa hyödyntäen etsittiin ongelmallisia alueita Turku Energian kaukolämpöverkon alueella. Yksittäisten asiakkaiden menolämpötila saattaa tippua alle 60 °C jopa keskustan alueella, jos asiakkaan virtaus on tarpeeksi pieni. Tutkinnan tarkoituksena oli paikantaa useamman asiakkaan ryhmittymiä, jotka rajoittavat menolämpötilan laskua. Alueita, joissa useamman asiakkaan menolämpötila on lähellä tai laskee toistuvasti alle 60 °C lämpötilan, löytyi yhteensä viisi. Nämä alueet sijaitsevat Petäsmäellä, Tikanmaalla, Naantalissa, Kaarinassa ja Nuorikkalassa. Kuvaan 43 on merkitty alueiden sijainnit. Jos näille alueille asennettaisiin lämpöpumput, voitaisiin verkon menolämpötilaa laskea niiden asiakkaiden lämmön saannin vaarantumatta. Yksittäisiä asiakkaita, joiden menolämpötila laskee alle 60 °C, on kuitenkin paljon myös muualla verkon alueella. Näiden asiakkaiden lämmön saantia ei voitaisi välttämättä taata, jos menolämpötilaa lasketaan.



Kuva 43 Turun alueen kaukolämpöverkko, johon on merkitty kriittisimmät alueet

8 KANNATTAVUUS

Hankkeen kannattavuuden arvioimiseksi tarkastellaan lämpöpumpun käytön tuomia lisäkustannuksia ja lämpötilojen laskemisen seurauksena syntyneitä säästöjä lämpöhäviöissä ja tuotannon päästöissä. Taulukkoon 3 on koottu kustannustarkasteluissa käytettyjä alkuarvoja. Sähkön hinta sisältää sähkön myyntihinnan, verot ja siirtomaksun.

Taulukko 3 Kustannustarkasteluissa käytettyjä alkuarvoja

Lämmön tuotantohinta	45 €/MWh
Sähkön hinta	100 €/MWh
Lämpöpumpun investointihinta	70 000 €
Kompressoreiden sähköteho	40 kW
Lämpöpumpun huipunkäyttöaika	4780 h
Päästöoikeuden hinta	20 €/tCO ₂
Kaukolämpötuotannon ominaispäästö	0,365 tCO ₂ /MWh

Päästöoikeuden hintana käytetään ajanjakson 9/2018-3/2019 päivähintojen keskiarvoa 21,05 €/tCO₂ (Markets Insider, 2019). Lämpöpumpun huipunkäyttöaika valittiin Turun alueen ulkolämpötilojen historiatietojen perusteella. Ulkolämpötila on keskimäärin ollut päälle 5 °C 4780 tuntia vuodessa vuosien 2015-2018 aikana. Tällä ajalla on myös laskettu eri lämpötilatasojen häviökustannukset. (Ilmatieteenlaitos, 2019.)

Lämpöpumpun kustannukset koostuvat investointikustannuksesta ja käyttökustannuksista. Investointikustannukseen kuuluvat lämpöpumpun hankintahinta ja tehtyjen rakennustöiden kustannukset, jolloin investointikustannukseksi muodostuu pilottiprojektin perusteella yhteensä 70 000 €. Käyttökustannuksiin kuuluvat lämpöpumpun kompressoreiden sähkötehot. Tällöin yhden lämpöpumpun käyttökustannukseksi saadaan kompressoritehon, käyttöajan ja sähkön hinnan perusteella 19 120 € vuodessa.

Taulukkoon 4 on koottu lähtötietojen perusteella lasketut eri lämpötilatasojen kokonaiskustannukset. Kustannukset koostuvat lämpöpumpun investointi- ja käyttökustannuksista, lämpöhäviökustannuksista ja pumppauskustannuksista. Lämpötilatason alentaminen vähentää häviöitä, jolloin myös tarvittavan tuotannon määrä vähenee. Tämä näkyy

vähentyneinä päästöinä ja siten säästöinä päästöoikeuksien hankinnassa. Eri lämpötilatasojen kustannuksia ja säästöjä verrataan valitun perustason 75/49 °C lämpöhäviöihin ja pumppaukseen.

Jotta menolämpötilan muuttumisen vaikutus pumppaukseen saataisiin määritettyä tarkasti, tulisi koko verkon käyttäytymistä simuloida eri lämpötiloilla, kulutustasoilla ja eri tuotantolaitosten ollessa käytössä. Vuosien 2018 ja 2017 kuukausikohtaisten pumppaus-sähkön, lämmön siirron ja lämpötilatasojen lukemien perusteella arvioitiin, että menolämpötilan laskeminen asteella nostaa pumppauskustannuksia 1,5 %.

Taulukko 4 Mahdollisten eri lämpötilatasojen kustannukset ja säästöt

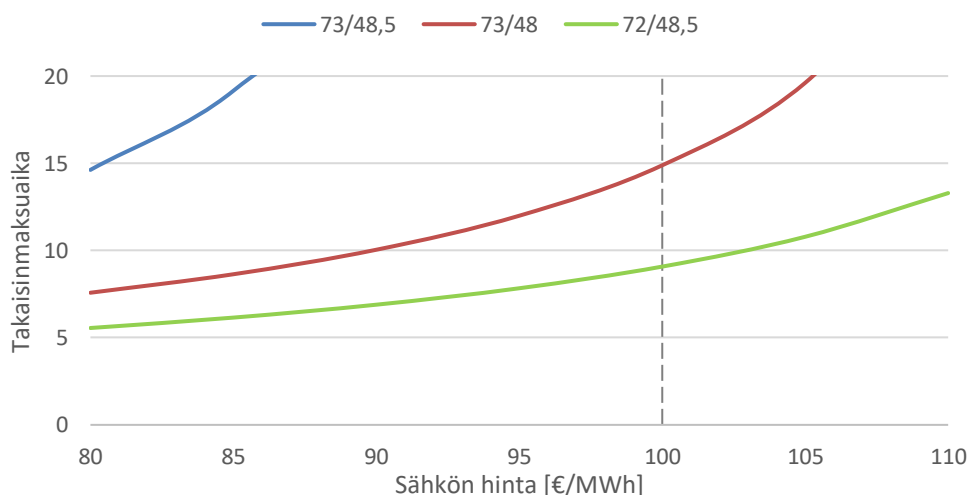
	73/48,5	73/48	72/48,5
Investointikustannukset	350 000 €	350 000 €	350 000 €
LP käyttökustannukset	95 600 €	95 600 €	95 600 €
Pumppauskustannuksen lisääntyminen	14 374 €	14 374 €	21 562 €
Kustannukset yhteensä	109 974 €	109 974 €	117 162 €
Säästöt häviökustannuksissa	96 795 €	116 154 €	135 513 €
Säästöt päästöoikeuksien hankinnassa	14 476 €	17 371 €	20 267 €
Säästöt yhteensä	111 271 €	133 525 €	155 780 €
Nettotuotto vuodessa	1 297 €	23 551 €	38 618 €
Takaisinmaksuaika	269,9	14,9	9,1

Taulukosta nähdään, että ensimmäinen vaihtoehto, jossa menolämpötila laskettaisiin 73 °C lämpötilaan ja paluupuolen lämpötilaa saataisiin keskimäärin laskettua 0,5 °C, ei kannata. Näillä lämpötiloilla lämpöhäviöiden pienentymisestä saatavan säästön ja lämpöpumppujen käyttökustannusten erotus jää liian pieneksi. Jos paluupuolen lämpötilaa saataisiin laskettua vielä puolella asteella, laskisi takaisinmaksuaika 14,9 vuoteen. Todennäköisesti paluupuolen lämpötilan alenema koko verkon tasolla jää kuitenkin alle yhden

asteen. Petäsmäen ja Tikanmaan simulointien perusteella menolämpötilaa voitaisiin mahdollisesti laskea 72 °C lämpötilaan. Tällöin hankkeen korottamaksi takaisinmaksuajaksi saadaan 9,1 vuotta.

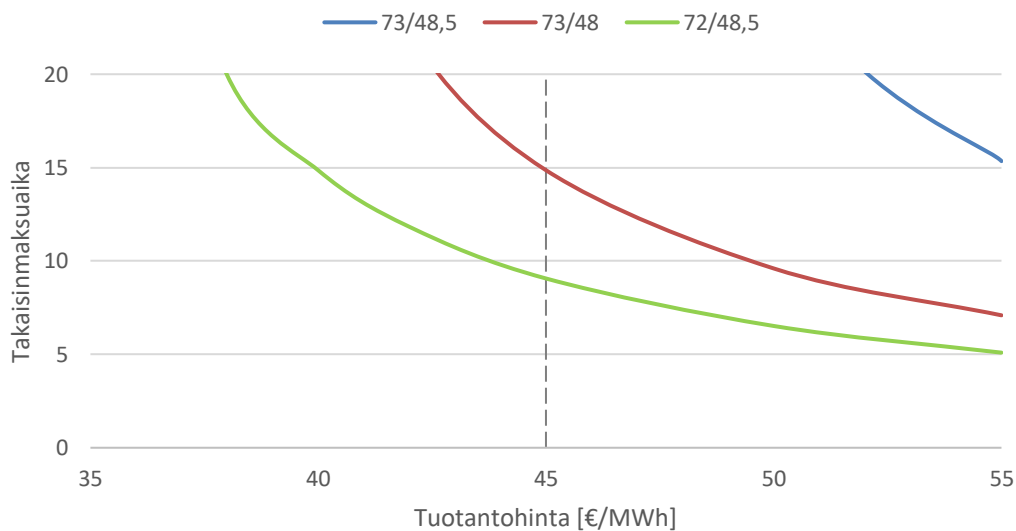
Valituilla lähtöarvoilla on kuitenkin merkittävä vaikutus eri lämpötilatasojen kannattavuuteen. Kannattavuuteen vaikuttavia tekijöitä ovat tarvittava lämpöpumppujen määrä, sähkön hinta, kaukolämmön tuotantohinta, investointikustannus ja päästöoikeuden hinta. Tarvittava lämpöpumppujen määrä on näistä merkittävin tekijä. Lähtöarvona on käytetty viittä lämpöpumppua, joka perustuu asiakkaiden menolämpötilojen tarkasteluihin. Jos lämpöpumppuja tarvitaan enemmän, ei hanke muodostu kannattavaksi millään edellä käytetyistä lämpötilatasoista. Muiden kannattavuuteen vaikuttajien tekijöiden vaikutusta on tutkittu muuttamalla jokaista tekijää yksi kerrallaan.

Kannattavuuteen vaikuttaa merkittävästi sähkön hinta. Sähkön hinta muodostuu sähkön markkinahinnasta, siirtomaksusta ja sähköverosta. Nykyisellään kaukolämpöä tuottavien lämpöpumppujen sähköstä täytyy maksaa muuta teollisuutta korkeampaa sähköveroa, mikä heikentää niiden kilpailukykyä. Jos lämpöpumppujen käyttämästä sähköstä maksettaisiin vastaavaa sähköveroa kuin teollisuudessa, tippuisi sähkön hinta melkein arvoon 80 €/MWh. Tällöin lämpötilatasoilla 73/48 °C ja 72/48,5 °C olisivat takaisinmaksuajat enää 7,6 ja 5,6 vuotta kuvan 45 mukaisesti. Hanke muuttuu kuitenkin myös herkästi kannattamattomaksi sähkön hinnan noustessa yli 100 €/MWh. Kuvaan on merkitty katkoviivalla kannattavuuslaskelmissa käytetty sähkön hinta.



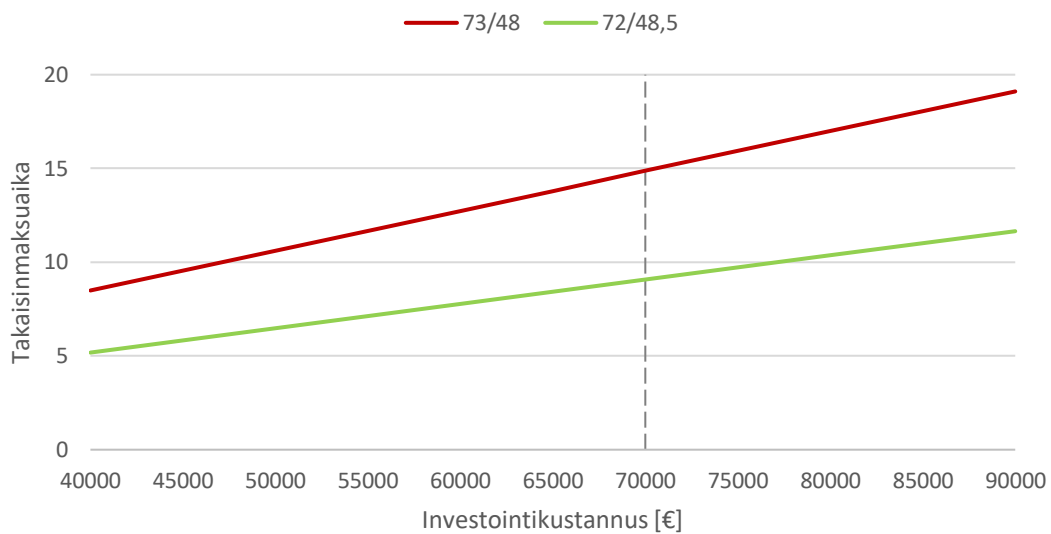
Kuva 44 Sähkön hinnan vaikutus takaisinmaksu aikaan

Kuvassa 46 on esitetty kaukolämmön tuotantohinnan muuttumisen vaikutus hankkeen takaisinmaksuaikaan. Tuotannon kallistuminen pienentää hankkeen takaisinmaksuaikaa kaikilla lämpötilatasoilla, sillä tuotantohinnan kasvaminen lisää häviöiden pienentämisestä saatavia säästöjä. Tuotantohintaan vaikuttaa enimmäkseen käytettävät polttoaineet. Lämmityskauden ulkopuolella öljyn käyttö jää vähäiseksi ja suurin osa kaukolämmöstä tuotetaan puupolttoaineilla ja kivihiilellä. Jatkossa Turku Energian kaukolämmöstä tuotetaan yhä suurempi osa biopolttoaineilla, mikä tulee vaikuttamaan tuotantohintaan.



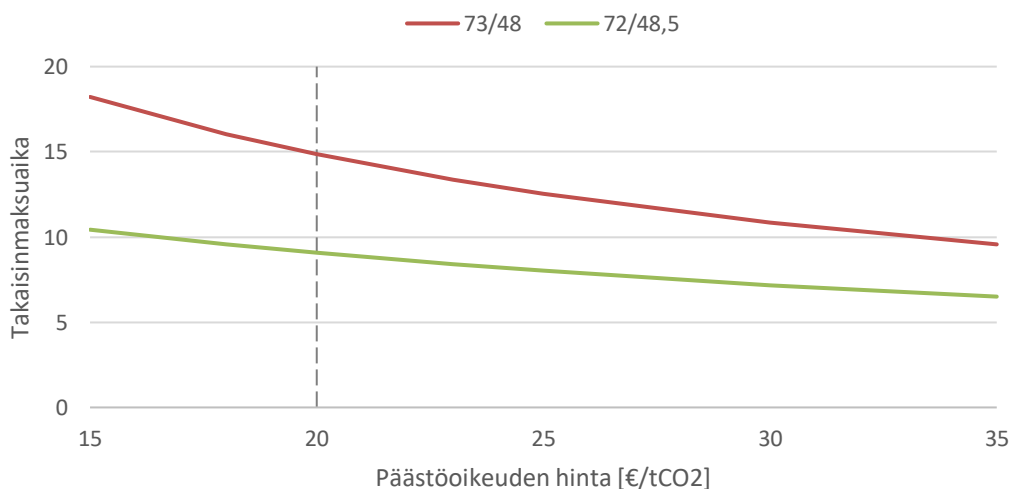
Kuva 45 Kaukolämmön tuotantohinnan vaikutus takaisinmaksuaikaan

Kannattavuuslaskelmissa on investointikustannuksen lähtöarvona käytetty pilottiprojektin perusteella saatua 70 000 €. Investointikustannuksen vaikutus takaisinmaksuaikaan on esitetty kuvassa 47. Kaikilla lämpötilatasoilla investointikustannuksen pienentyminen alentaa takaisinmaksuaikaa lineaarisesti. Lämpötilatasolla 73/48,5 °C hanke ei muutu kannattavaksi millään investointihinnalla, sillä muiden arvojen pysyessä muuttumattomana jää nettotuotto liian pieneksi.



Kuva 46 Investointikustannuksen vaikutus takaisinmaksuaikaan

Kuvaan 48 on merkitty päästöoikeuden ajanjakson 9/2018-3/2019 keskiarvohinta, jolla tehtiin taulukon 4 laskelmat. Päästöoikeuden hinnan nouseminen nostaa kaikkien vaihtoehtojen kannattavuutta. Päästöoikeuden hinnalla 35 €/tCO₂ ovat lämpötilatasojen 73/48 °C ja 72/48,5 °C korottamat takaisinmaksuajat 9,6 ja 6,5 vuotta. Päästöoikeuden hinta oli vuonna 2017 keskimäärin noin 5,5 €/tCO₂, kun nykyään hinta on päälle 20 €/tCO₂. Päästöoikeuden hinta tulee tulevaisuudessa todennäköisesti jatkamaan kasvuaan, kun ilmastotavoitteita kiristetään ja päästöoikeuksien määrää vähennetään. Päästöjen vähenemisen vaikutusta tulisi kuitenkin tutkia tarkemmin, koska lämmityskauden ulkopuolella kaukolämpö tuotetaan yleensä biopolttoaineilla ja Kakolan lämpöpumpuilla.



Kuva 47 Päästöoikeuden hinnan vaikutus takaisinmaksuaikaan

Herkkyystarkasteluista huomataan miten herkästi alkuarvojen muuttuminen vaikuttaa hankkeen kannattavuuteen. Jo pienet muutokset esimerkiksi sähkön hinnassa tai tuotantohinnassa saattavat tehdä hankkeesta kannattavan tai kannattamattoman. Herkkyystarkasteluissa jokaista kannattavuuteen vaikuttavaa osatekijää muutettiin yksi kerrallaan. Todellisuudessa arvot voivat kuitenkin muuttua samaan aikaan, jolloin hankkeen kannattavuuden arvioiminen on haastavaa. Kaikista laskelmista huomataan kuitenkin, että mitä enemmän sekä meno- että paluupuolen lämpötilaa saadaan laskettua, sitä kannattavampi hanke on. Merkittävimpänä tekijänä on siis lämpöhäviöiden pienentämisestä saatavat säästöt.

Hankkeen kannattavuutta arvioitaessa tulisi huomioida taloudellisuuden lisäksi myös vaikutus asiakkaille toimitetun lämmön laatuun. Verkon häntäpäihin asennettujen lämpöpumppujen avulla voidaan taata näille alueille tasaisempi ja korkeampi menupuolen lämpötila, millä voidaan vähentää lämmön toimituksen häiriöitä. Työn perusteella lämpöpumppujen avulla voitaisiin koko verkon lämpötilatasoja laskea, jolloin lämpöhäviöitä ja siten tuotantoa voidaan vähentää. Diplomityössä ei kuitenkaan otettu huomioon menolämpötilan laskusta johtuvaa tuotantolaitosten hyötysuhteen paranemista tai Naantalin CHP-laitoksen rakennusasteen parantumisesta, kun alemmalla kaukolämmön menolämpötilalla höyryn voidaan antaa paisua matalampaan paineeseen.

9 JOHTOPÄÄTÖKSET

Työn tavoitteena oli tutkia kaukolämpöverkon häntäpäihin asennettavien lämpöpumppujen potentiaalia koko verkon lämpötilatasojen laskemisessa sekä selvittää hankkeen kustannuksia ja säästöjä. Matalan kulutuksen aikaan eli esimerkiksi kesällä kaukolämpövesi jäähtyy putkistossa hitaan virtausnopeuden takia enemmän kuin talvella, vaikka lämpötilat ovatkin matalammat. Tästä johtuen suhteelliset häviöt kaukolämpöverkoissa ovat kesällä suuremmat kuin talvella, vaikka absoluuttiset häviöt ovatkin pienemmät. Turku Energialla on tehty useita toimenpiteitä verkostohäviöiden pienentämiseksi ja merkittävimpänä niistä on menolämpötilan laskeminen vastaamaan paremmin nykyajan vaatimuksia ja tarvetta. Vuoden 2018 touko-heinäkuussa menopuolen lämpötila oli keskimäärin Lämpölaitosyhdistyksen suosituksen mukainen eli 75 °C. Verkostohäviöt olivat silti yli 20 %. Kaukolämmön jakelun lämpöhäviöiden pienentämiseksi menolämpötilaa kannattaisi edelleen laskea. Alemmalla menolämpötilalla asiakkaiden menolämpötilat saattavat kuitenkin laskea liian alas tietyissä osissa verkkoa.

Hirvensalon Myötäisissä pilotoidaan työssä tutkittua lämpöpumppukytkentää, jossa kaukolämmön menopuolen lämpötilaa nostetaan paluupuolen lämpöä hyödyntämällä. Lämpöpumppu otettiin käyttöön vuoden 2018 loppupuolella, mutta ulkolämpötiloista johtuen sitä ajettiin vain lyhyen testikäytön verran. Lämpöpumppua on tarkoitus käyttää ulkolämpötilan noustessa päälle 5 °C lämpötilan. Näistä syistä johtuen lämpöpumpun toiminnasta ei saatu todellista dataa sen hyötyjen arvioimista varten. Lämpöpumpun potentiaalia arvioitiin simuloimalla Hirvensalon alueen lämpötiloja eri kulutustasoilla sekä lämpöpumpun ollessa käytössä että ilman lämpöpumppua. Keskimäärin syöttöpisteen menolämpötilaa saatiin laskettua 1,7 °C ja paluupuolen 3,5 °C. Lämpöpumpun käytön havaittiin olevan ongelmallista alueen häviöiden kannalta, sillä Hirvensaloon tuleva kaukolämpöjohto on vesistöalituksesta johtuen poikkeava. Alitusjohdossa menoputki kulkee paluuputken sisällä, jolloin paluupuolen lämpötilan alentaminen lisää lämpötilaeroa putkien välillä ja siten lämmönsiirtoa menopuolelta paluupuolelle. Tämä vähentää lämpöpumpusta saatavaa hyötyä alueella.

Työssä paikannettiin Turun alueen kaukolämpöverkon haasteellisimmat alueet matalan kulutuksen aikaan. Alueita, joissa usean asiakkaan menolämpötila laskee toistuvasti alle

60 °C lämpötilan, löydettiin yhteensä viisi. Näille alueille yhteistä on se, että enimmäkseen alueen kiinteistöt ovat pientaloja. Näistä kahdella alueella tutkittiin lämpöpumpun potentiaalia alueen syöttöpisteen meno- ja paluulämpötilojen alentamisessa eri kulutustasojen simuloinnilla. Petäsmäellä menolämpötilaa voitiin verkon perälle kytketyn lämpöpumpun avulla alentaa keskimäärin 4 °C ja paluupuolen lämpötilaa 6,5 °C. Alemmilla lämpötilatasoilla tarkasteltavan alueen häviöt pienenevät noin 2,7 %. Vastaavasti Tikanmaalla alueelle voitiin syöttää keskimäärin 7,3 °C viileämpää vettä ja syöttöpisteeseen palaavan veden lämpötila oli 4 °C matalampi. Matalampien lämpötilatasojen vuoksi alueen häviöt pienenevät keskimäärin 4,7 %. Tarkastelukohteiden perusteella menolämpötila voitaisiin laskea nykyisestä 75 °C lämpötilasta 72 °C lämpötilaan. Saatujen lämpötilojen suhteen täytyy kuitenkin huomioida, että ne ovat vain suuntaa antavia laskentamallissa käytettyjen oletusten takia.

Keskimääräinen paluulämpötila Turku Energian kaukolämpöverkossa kesällä 2018 oli 49 °C. Tarkasteltujen alueiden perusteella paluupuolen syöttöpisteelle palaavan veden lämpötilaa saatiin laskettua keskimäärin 4,7 °C. Verkon häntäpäiden virtausmäärät ovat kuitenkin vain pieni osa koko verkon virtausmääristä, jolloin virtausten sekoittuessa jää lämpöpumppujen merkitys paluupuolen lämpötilaan koko verkon tasolla pieneksi. Tällöin paluulämpötilan alentamisesta tuskin saadaan merkittävää tehon lisäystä verkon alueella olevista kahdesta savukaasupesurista.

Hankkeen kannattavuutta arvioitiin vertaamalla lämpöpumppujen käytön tuomia lisäkustannuksia ja vertaamalla niitä verkon lämpötilatason laskusta saataviin säästöihin. Eri lämpötilatasojen kustannuksia verrattiin vuoden 2018 kesän keskimääräiseen lämpötilatasoon 75/49 °C. Kustannustarkasteluissa todettiin, että pelkkä kahden asteen lasku menopuolella ei tee hankkeesta kannattavaa, sillä lämpöhäviöiden pienemisestä saatavat säästöt jäävät liian pieniksi suhteessa lämpöpumppujen käyttökustannuksiin. Jos menolämpötila laskettaisiin 72 °C lämpötilaan ja paluupuolta saataisiin laskettua koko verkon tasolla noin 0,5 °C, olisi hankkeen takaisinmaksuaika valituilla lähtöarvoilla 9,1 vuotta.

Kustannustarkasteluita arvioitaessa tulee kuitenkin huomioida se, että lähtöarvoja valitessa on täytynyt tehdä lukuisia oletuksia. Kuten herkkyystarkasteluistakin huomattiin,

on jo pienillä muutoksilla lähtöarvoissa merkittäviä vaikutuksia hankkeen takaisinmaksu-aikaan. Jos kaukolämmön tuotantohinta tasaantuu alle lähtöarvona käytetyn 45 €/MWh, ei hanketta voida pitää kannattavana, sillä lämpöhäviöiden pienentämisestä saatavat säästöt pienenevät jyrkästi. Jotta kannattavuudesta pystyttäisiin tekemään tarkempia arvioita, tulisi tuotantohinnan kehittymisestä olla tuotantorakenteeseen ja polttoaineiden hintojen kehitykseen pohjautuva ennuste, joka huomioi myös kesäaikaiset seisakit. Tällöin voitaisiin arvioida, lähteekö tuotantohinta nousemaan vai laskemaan lähtöarvosta eli muuttuuko hanke kannattavammaksi vai kannattomaksi.

Toinen merkittävä tekijä lämpöpumppujen kannattavuudessa on sähkön hinta. Markkinahinta oli vuonna 2018 edellisiä vuosia korkeammalla tasolla vesitilanteesta ja päästökaupan hintakehityksestä johtuen (Nord Pool, 2019). Markkinahinnan kehityksen lisäksi sähkön hintaan vaikuttavat merkittävästi sähkön siirtohinnot, jotka ovat olleet kasvussa Suomessa. Lisäksi yhteiskunnan ja lämmöntuotannon sähköistyminen saattaa vaikuttaa sähkön hintaan tulevaisuudessa. Nämä tekijät tekevät sähkön hinnan ennustamisesta haastavaa. Lämpöpumppujen kilpailukykyä alentaa se, että kaukolämpöä tuottavien lämpöpumppujen käyttämää sähköä verotetaan tällä hetkellä korkeamman sähköveron mukaan. Jos sähkövero laskettaisiin teollisuuden sähköveron tasolle, olisi sillä merkittävä vaikutus lämpöpumppujen käytön kannattavuuteen. Tällöin hanke olisi kannattava jo pienemmälläkin lämpötilapudotuksella.

Diplomityön tulosten pohjalta voidaan todeta, että lämmittämällä kaukolämpöverkon häntäpäitä paikallisesti lämpöpumpuilla voidaan koko verkon lämpötilatasoja alentaa. Tuloksia ei voida kuitenkaan yleistää koskemaan kaikkia kaukolämpöverkkoja, koska jokainen verkko ja verkon alue on omanlaisensa. Jo tässä työssä tarkastelluilla kolmella alueella vaihteli lämpöpumpusta saatava hyöty useilla asteilla. Lämpöpumppujen todellisen potentiaalin arvioimiseksi tulisikin kaikista haasteellisiksi tunnistetuista alueista tehdä vastaava laskenta ja arvioida lämpöpumpun tuoma hyöty alueen syöttöpisteen menolämpötilan laskuun. Eri alueiden menolämpötilan tarpeen ja virtausmäärien perusteella tulisi myös arvioida tarkemmin tarvittavan lämpöpumpun teholuokkaa. Kustannuksia laskettaessa oletettiin pilottihankkeen perusteella, että kaikkien viiden lämpöpumpun kompressoritehot ovat 40 kW.

Yksittäisiä menolämpötilan osalta haasteellisia asiakkaita on kuitenkin myös muualla verkon alueella. Vaikka verkon häntäpäiden menolämpötila nostettaisiinkin lämpöpumpuilla, saattaa koko verkon menolämpötilan lasku aiheuttaa ongelmia muualla verkossa sijaitsevilla asiakkailla. Ennen lisäinvestointeja tulisikin suorittaa koeajoja, joissa verkon menolämpötilaa laskettaisiin aste kerrallaan parin päivän jaksoissa, jotta lämpötilat ehtivät tasaantua koko verkossa. Tällöin voitaisiin paikantaa asiakkaat, joiden menolämpötila laskee liian alhaiseksi. Tuloksista voitaisiin arvioida, onko tällaisia asiakkaita liikaa suunniteltujen lämpöpumppualueiden ulkopuolella ja onko näille asiakkaille aiheutunut menolämpötilan lasku hyväksyttävän rajoissa. Koeajoilla saataisiin myös tietoa lämpötilan laskun vaikutuksesta pumppaukseen ja voitaisiin tarkemmin arvioida lisääntyneet pumpauskustannukset.

Lämpöpumppukytken toimivuutta tulisi myös tarkastella seuraamalla Hirvensaloon asennetun lämpöpumpun toimintaa. Lämpöpumpun toiminnasta kannattaisi seurata sen kykyä jäähdyttää paluupuolen virtausta, kompressoreiden sähkötehoa ja lämpöpumpun tuoton riittävyyttä rengasverkon alueella. Näin saataisiin arvioitua tehtyjen laskelmien paikkansapitävyyttä.

10 YHTEENVETO

Lämpöpumpputekniikan kehittyminen, kiristyvät päästötavoitteet, rakennusten tiukentuvat energiatehokkuusvaatimukset ja asiakkaiden kasvanut kiinnostus uusiutuvien energianlähteiden käyttöön ovat haastaneet perinteisesti lämpöalaa hallinneet kaukolämpöyritykset kehittämään toimintaansa. Kaukolämmön tuotannossa siirrytään yhä enenevässä määrin hiilen ja öljyn poltosta biopolttoaineisiin ja hukkalämpöjen hyödyntämiseen. Turku Energialla on myös kiinnitetty erityistä huomiota kaukolämmön verkostohäviöiden pienentämiseen. Häviöitä on saatu pienennettyä laskemalla menolämpötilaa vastaamaan paremmin verkon todellista tarvetta. Lämmityskauden ulkopuolella verkon suhteelliset häviöt ovat kuitenkin edelleen suuria ja häviöiden pienentämiseksi lämpötilatasoja kannattaisi edelleen laskea.

Diplomityön tavoitteena oli tutkia mahdollisuutta alentaa kaukolämpöverkon lämpötilatasoja lämpöpumpputekniikkaa hyödyntämällä. Matalan kulutuksen aikaan kaukolämpöverkkoon joudutaan verkon alkupään kannalta ajamaan yllilämpöä, jotta viimeisimmätkin asiakkaat saavat tarvitsemansa lämmön. Lämpöpumpuilla nostettaisiin paikallisesti kaukolämpöverkon häntäpäiden menopuolen lämpötilaa samalla jäähdyttäen paluupuolta. Tällöin lämpötilaa verkon alkupäässä voitaisiin alentaa. Työn tarkoituksena oli määrittää lämpöpumppujen mahdollistama lämpötilatasojen pudotus nykyisestä tasosta. Lisäksi tavoitteena oli laskea lämpöpumppuratkaisun kannattavuutta.

Työssä tarkasteltiin kolmea eri aluetta ja määritettiin lämpöpumpuilla saatava hyöty alueen syöttöpisteen meno- ja paluulämpötilojen alentamisessa. Keskimäärin paluupuolen lämpötilaa saatiin tiputettua 4,7 °C ja menopuolen lämpötila voitaisiin tiputtaa 73 °C tai 72 °C lämpötilaan. Koska verkon häntäpäissä virtaa vain pieni osa koko verkon virtausmääristä jää paluupuolen lämpötilan lasku vähäiseksi eikä siitä näin ollen saada hyötyä savukaasupesureita ajatellen. Vuoden 2018 kesällä kaukolämpöverkon keskilämpötila oli Turun alueella 75/49 °C. Tähän verrattuna saataisiin lämpöpumppujen mahdollistamalla matalammalla lämpötilatasolla pienennettyä häviöitä 3,9 %.

Kannattavuustarkasteluissa vertailtiin hankkeen kustannuksia lämpöhäviöiden pienenty-

misestä saataviin säästöihin. Kustannuksissa huomioitiin lämpöpumppujen kompresso-
reiden sähkön käyttö ja alemman menolämpötilan aiheuttama pumppauskustannusten
kasvu. Säästöjä syntyi lämpöhäviöiden pienentymisestä johtuen tuotantokustannuksissa
ja päästöoikeuksien hankinnassa. Lämpötilatasolla 72/48,5 °C saatiin hankkeen takaisin-
maksuajaksi 9,1 vuotta. Kannattavuutta arvioitaessa on kuitenkin otettava huomioon, että
laskelmissa käytettyjen lähtöarvojen pienetkin muutokset vaikuttavat merkittävästi hank-
keen takaisinmaksu-aikaan. Tarkempien kannattavuuslaskelmien tueksi tulisikin analy-
soida kaukolämmön tuotantohinnan ja sähkön hinnan kehitystä.

Työn tulosten perusteella voidaan verkon häntäpäiden lämpöpumppukytkennoillä alentaa
koko verkon lämpötilatasoja ja siten pienentää lämpöhäviöitä. Ongelmaksi saattaa kui-
tenkin muodostua se, että jopa keskustan alueella joidenkin asiakkaiden menolämpötilat
saattavat laskea liikaa. Mahdollisuutta alentaa menolämpötilaa työssä ehdotetulle tasolle
tulisikin testata koeajoilla, joiden avulla voidaan selvittää laskevatko asiakkaiden meno-
lämpötilat liikaa myös alueilla, joille ei suunnitella lämpöpumpun käyttöä.

LÄHTEET

Aittomäki Antero. 2012. Kylmäteknikka. Porvoo: Bookwell. s.413. ISBN 978-951-96449-7-4.

Boss Anna. 2012. Fjärrvärmecentral och frånluftsvärmepump i kombination. Svensk Fjärrvärme AB. 38 s. ISBN 978-91-7381-092-0.

Energiateollisuus ry. 2011. Kaukolämpöverkon pumppausjärjestelyt. Suositus L10/2011. ET-Kaukolämpökansio 2/2. Kaukolämpö.

Energiateollisuus ry. 2014a. Rakennusten kaukolämmitys. Määräykset ja ohjeet. Julkaisu K1/2013. ET-Kaukolämpökansio 1/1. Kaukolämpö. ISBN 978-952-5615-41-8.

Energiateollisuus ry. 2014b. Teho ja vesivirta kaukolämmön maksuperusteina. Suositus K15/2014.

Energiateollisuus ry. 2018a. Kaukolämpötilasto 2017. ISSN 0786-4809.

Energiateollisuus ry. 2018b. [Power Point-esitys]. Kaukolämpö 2017 graafeina. [viitattu 22.10.2018.] Saatavissa: https://energia.fi/ajankohtaista_ja_materiaalipankki/materiaalipankki/kaukolampo_2017_graafeina.html#material-view

Energiateollisuus ry. 2018c. [Power Point-esitys]. Kaukojäähdytys 2017 graafeina. [viitattu 22.10.2018.] Saatavissa: https://energia.fi/ajankohtaista_ja_materiaalipankki/materiaalipankki/kaukojaahdytys_2017_graafeina.html#material-view

Eskola Lari, Jokisalo Juha & Siren Kai. 2012. [verkkodokumentti]. Lämpöpumppujen energianlaskentaopas. 33 s. [viitattu 19.11.2018]. Saatavissa: <http://www.ym.fi/download/noname/%7B10A732A6-EA2F-45F9-869C-6F909138CB26%7D/30757>

Gadd Henrik & Sven Werner. 2013. Daily heat load variations in Swedish district heating systems. Halmstad University. Applied Energy 106, 47-55.

Hakala Pertti & Kaappola Esko. 2013. Kylmälaitoksen suunnittelu. Juvenus Print – Suomen Yliopistopaino Oy. Tampere. 274 s. ISBN 978-952-13-5360-4.

Helin Kristo, Syri Sanna & Zakeri Behnam. 2018. Improving district heat sustainability and competitiveness with heat pumps in the future Nordic energy system. Energy Procedia 149, 455-464.

IEA. 2016. [verkkodokumentti]. Nordic Energy Technology Perspectives 2016. Cities,

flexibility and pathways to carbon-neutrality. [viitattu 26.11.2018]. Saatavissa: <http://www.nordicenergy.org/wp-content/uploads/2016/04/Nordic-Energy-Technology-Perspectives-2016.pdf>

IEA HPT. 2018. [www-sivu]. How does a heat pump work? Heat Pumping Technologies. [viitattu 22.10.2018.] Saatavissa: <https://heatpumpingtechnologies.org/market-technology/heat-pump-work/>

Ilmatieteenlaitos. 2019. [www-sivu]. Säähavainnot. [viitattu 18.3.2019.] Saatavissa: <https://ilmatieteenlaitos.fi/havaintojen-lataus#!/>

Kensby Johan, Trüschel Anders & Dalenbäck Jan-Olof. Potential of residential buildings as thermal energy storage in district heating systems – Results from a pilot test. Applied Energy 137, 773-781.

Koivula Rami. 2015. Kaukolämpöjohdon lämpöhäviöiden talteenotto lämpöpumpputeknologian avulla. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Saatavissa: <http://lut-pub.lut.fi/bitstream/handle/10024/116050/Kaukolämpöjohdon%20lämpöhäviöiden%20talteenotto%20lämpöpumpputeknologian%20avulla.pdf;jsessionid=A89F65B7FACC735D6E22A93214B2C6C3?sequence=2>

Koskelainen Lasse, Saarela Rauli & Sipilä Kari. 2006. Kaukolämmön käsikirja. Helsinki. Energiategollisuus ry. Kaukolämpö. 566 s. ISBN 952-5615-08-1.

Markets Insider. 2019. [www-sivu]. CO2 European emission allowance price chart. [viitattu 14.3.2019.] Saatavissa: https://markets.businessinsider.com/commodities/historical-prices/co2-emissionsrechte/euro/14.9.2018_14.3.2019

Mäkelä Veli-Matti & Tuunanen Jarmo. 2015. Suomalainen kaukolämmitys. Mikkelin Ammattikorkeakoulu. 159 s. ISBN 978-951-588-506-7.

Nord Pool. 2019. [www-sivu]. Historical Market Data. [viitattu 21.3.2019.] Saatavissa: <https://www.nordpoolgroup.com/historical-market-data/>

Oilon. 2017. [verkkodokumentti]. Lämpöpumpun asennus- ja käyttöohje. [viitattu 29.10.2018.] Saatavissa: https://www.netrauta.fi/attachments/products/oilon/maailampo/Oilon__asennus-_ja_kaytto-ohje.pdf

Østergaard Poul & Andersen Anders. 2016. Booster heat pumps and central heat pumps in district heating. Applied Energy 184, 1374-1388.

Paiho Satu & Reda Francesco. 2016. Towards next generation district heating in Finland. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 65, 915-924.

Perälä Rae. 2009. *Lämpöpumput. Suomalainen käsikirja aikamme lämmitysjärjestelmästä*. Alfamer Oy. Tallinna. 119s. ISBN 978-952-472-084-7.

Pesola Aki, Bröckl Marika & Vanhanen Juha. 2011. [verkkodokumentti]. Älykäs kaukolämpöjärjestelmä ja sen mahdollisuudet. Gaia Consulting Oy. Loppuraportti. [viitattu 30.10.2018]. Saatavissa: <https://docplayer.fi/2848107-Alykas-kaukolampojarjestelma-ja-sen-mahdollisuudet.html>

Pöyry. 2010. [verkkodokumentti]. Kaukolämpöjärjestelmän paluueden hyväksikäyttö kiinteistöjen lämmityksessä. Selvitys Energiateollisuus ry:lle. 53 s. [viitattu 2.11.2018]. Saatavissa: <https://docplayer.fi/1158112-Energiateollisuus-ry.html>

Pöyry. 2011. [verkkodokumentti]. Kaukolämmön asema Suomen energiajärjestelmässä tulevaisuudessa. Pöyry Management Consulting Oy. Loppuraportti. 55 s. [viitattu 25.10.2018]. Saatavissa: <http://www2.energia.fi/kaukolampo/KLAsemaLoppuraportti52A14971.pdf>

Pöyry. 2016. [verkkodokumentti]. Kaksisuuntaisen kaukolämmön liiketoimintamallit. Pöyry Management Consulting Oy. 44 s. [viitattu 25.10.2018]. Saatavissa: https://media.sitra.fi/2017/02/27175247/Kaksisuuntaisen_kaukolammon_liiketoimintamallit-2.pdf

Pöyry. 2018. [verkkodokumentti]. Älykäs kaupunkienergia. Pöyry Management Consulting Oy. Raportti Energiateollisuus ry:lle. 58 s. [viitattu 25.10.2018]. Saatavissa: https://energia.fi/files/2862/Alykas_kaupunkienergia_LOPPURA-PORTTI_20180614.pdf

Rinne Samuli & Syri Sanna. 2013. *Lämpöpumput ja kaukolämpö energiajärjestelmässä. Suomen ilmastopaneeli. Raportti 3/2013*.

Rämä Miikka & Sipilä Kari. 2010. Challenges on low heat density district heating network design. [viitattu 19.3.2019.] Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/50992092_Challenges_on_low_heat_density_district_heating_network_design

Schmitt Frieder, Hoffmann Heinz-Werner & Göhler Torsten. 2007. *Strategies to manage heat losses - Technique and economy*. International Energy Agency. Annex VII.

Turku Energia. 2018a. [www-sivu]. Vuosikertomus 2017. [viitattu 19.10.2018]. Saatavissa: <https://www.turkuenergia.fi/turku-energia/tietoa-meista/julkaisut/>

Turku Energia. 2018b. [www-sivu]. Ympäristöohjelma. [viitattu 19.10.2018]. Saatavissa: <https://www.turkuenergia.fi/turku-energia/vastuullista-energiaa/ymparistoohjelma/>

Turku Energia. 2018c. [www-sivu]. Kaukolämmön tuotantolaitokset. [viitattu 19.10.2018]. Saatavissa: <https://www.turkuenergia.fi/kaukolampo-ja-jaahdytys/kaukolampo-kestavin-valinta/kaukolammon-alkupera-ja-ymparistovaikutukset/kaukolammon-tuotantolaitokset/>

Vainio Terttu, Lindroos Tomi, Pursiheimo Esa, Vesanen Teemu, Sipilä Kari, Airaksinen Miimu & Rehunen Antti. Tehokas CHP, kaukolämpö ja –jäähdytys Suomessa 2010 – 2025. VTT. Tutkimusraportti. 63 s. VTT-R-04071-15.

Valor. 2016. [verkkodokumentti]. Suuret lämpöpumput kaukolämpöjärjestelmässä. Loppuraportti. 45 s. [viitattu 19.11.2018]. Saatavissa: https://energia.fi/files/993/Suuret_lampopumput_kaukolampojarjestelmassa_Loppuraportti_290816_paivitetty.pdf

Verda Vittorio & Colella Francesco. 2011. Primary energy savings through thermal storage in district heating networks. *Energy* 36, 4278-4286.