



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Lauri Mettiäinen

Kaukolämpöverkon paluuveden lämpöenergian hyödyntäminen

Tekniikka
2021

TIIVISTELMÄ

Tekijä	Lauri Mettiäinen		
Opinnäytetyön nimi	Kaukolämpöverkon	paluuveden	lämpöenergian hyödyntäminen
Vuosi	2021		
Kieli	suomi		
Sivumäärä	105		
Ohjaaja	Jukka Hautala		

Kaukolämmityksen energiatehokkuuden parantamiseksi tehdään toimia kaukolämpöyhtiöissä, jotta energiasektori pääsee ilmastotavoitteisiinsa, ja kaukolämmitys vahvistaa asemaansa kilpailussa lämpöpumppuja vastaan kuluttajien lämmitysratkaisuvalinnoissa. Kaukolämmön paluuveden hyödyntäminen parantaa kaukolämpöjärjestelmän energiatehokkuutta tuoden monia hyötyjä kaukolämpöjärjestelmille. Tässä työssä määritetään paluuveden hyödyntämisestä saatavat hyödyt Vaasan alueen kaukolämpöjärjestelmälle, ja tutkitaan erilaisia ratkaisuja, joilla paluuveden lämpöenergiaa voi hyödyntää.

Tutkimuksessa on tietoperustaksi referoitu luotettavia kotimaisia ja kansainvälisiä lähteitä. Työhön on konfiguroitu laskentamalli, johon on lisätty paluuvettä hyödyntäviä ratkaisuja. Laskentamalli on verifioitu vertaamalla lähtötilanteessa laskentamallilla saatuja tuloksia järjestelmässä mitattuihin arvoihin.

Tutkimus osoitti, että kaukolämmön paluuveden hyödyntämisestä järjestelmälle saatavat hyödyt ovat pumppaussähkön kulutuksen väheneminen, järjestelmän lämpöhäviöiden pieneneminen, savukaasupesureiden lämmöntalteenottotehon paraneminen, sähkön tuotannon lisääntyminen yhdistetyllä sähkön- ja lämmöntuotantolaitoksella sekä lämpövaraston käytettävissä olevan kapasiteetin suureneminen. Tutkimuksessa vertailtiin paluuveden hyödyntämistä kiinteistön lämmittämiseen, alueellisen matalalämpöverkon lämmittämiseen ja ratkaisuun, jossa voimalaitoksella lämpöenergiaa siirretään lämpöpumpulla kaukolämmön paluuvdestä menoveteen. Selvisi, että energiateknisesti merkittävin hyöty on savukaasupesurin lämmön talteenottotehon paraneminen, ja tutkituista ratkaisuista parhaimmaksi osoittautui kiinteistöjen lämmittäminen paluuvvedellä.

Avainsanat kaukolämmitys, lämmönjakelu, lämmöntuotanto, sähkön ja lämmön yhteistuotanto

ABSTRACT

Author	Lauri Mettiäinen
Title	Utilization of Thermal Energy of Return Water in the District Heating Network
Year	2021
Language	Finnish
Pages	105
Name of Supervisor	Jukka Hautala

In order to improve the energy efficiency of district heating, efforts are made by district heating companies to enable the energy sector to meet its climate goals. The utilization of return water brings many benefits to district heating systems. In this thesis, the benefits of return water utilization for the district heating system in Vaasa were determined. In addition, this thesis presents a few solutions that utilize the return water of district heating system and compares them against each other.

The knowledge base of this thesis was referenced from international and domestic reports and literature. The thesis was conducted by configuring a calculation model to which were added solutions that utilizes the return water of district heating. The results obtained were compared with each other and with the baseline situation in terms of the energy consumption in the system and energy production. The calculation model was verified by comparing the results obtained with the calculation model in the initial situation with the values measured in the system.

The study showed that the benefits of utilizing return water of district heating are reduced pumping electricity consumption, reduced heat loss in the system, improved heat recovery efficiency of flue gas scrubbers, increased electricity production at the combined heat and power plant and increased capacity of the heat storage. The compared solutions were the utilization of return water for heating a building, heating a low-heat network and a solution where heat pump transfers heat energy from return water to flow water of the district heating system. It turned out that the most significant benefit is the improvement of the heat recovery efficiency of the flue gas scrubber. From the studied solutions heating the building with heat energy of return water of district heating turned out to be the best. This thesis provided valuable information for the company on what kind of solutions are profitable to implement in the future.

Keywords District Heating, Energy Efficiency and Combined Heat and Power

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

1	JOHDANTO.....	9
2	TOTEUTUS.....	13
3	KAUKOLÄMPÖ	15
3.1	Kaukolämpö Suomessa	15
3.2	Kaukolämmön tuotanto.....	16
3.2.1	Sähkön ja lämmön yhteistuotanto CHP	17
3.2.2	Lämpökeskus.....	18
3.3	Kaukolämpöverkko	19
3.4	Kaukolämmön jakelu	21
3.5	Kaukolämpöasiakkaat	23
3.5.1	Lämmönvaihdin.....	24
3.5.2	Säätöjärjestelmä	26
3.5.3	Kaukolämmön hinnoittelu	27
3.6	Lämpöhäviöt kaukolämpöverkossa	29
3.6.1	Lämpöhäviöiden määrittäminen.....	31
3.7	Lämmön varastointi	34
3.8	Kaukolämpöveden lämpötilan vaikutus kaukolämpöverkossa	36
3.8.1	Kaukolämpöveden lämpötilan vaikutus verkon lämpöhäviöihin	37
3.8.2	Kaukolämpöveden lämpötilan vaikutus pumppaukseen.....	38
3.8.3	Kaukolämpöveden lämpötilan vaikutus vastapainesähköntuotantoon.....	43
3.8.4	Menoveden vaikutus paluueden lämpötilaan	45
4	PALUUEDEN LÄMPÖENERGIAN HYÖDYNTÄMINEN JA SIITÄ SAATAVIEN HYÖTYJEN MÄÄRITYS	47
4.1	Savukaasupesuri	49

4.1.1	Savukaasupesurin lämmön talteenoton laskenta.....	51
4.1.2	Palamisilman kostutin savukaasupesurin yhteyteen.....	53
4.2	Savukaasupesurin luovuttaman tehon lisäys	54
4.3	Lämpöpumppu.....	56
4.4	Lämpöpumput kaukolämpöjärjestelmässä	58
4.5	Kiinteistön lämmittäminen kaukolämmön paluuedellä lämpöpumpun avulla	59
4.5.1	Ratkaisun ongelmat ja haasteet.....	62
4.6	Menoveden lämmitys paluueden lämpöenergialla lämpöpumpun avulla	63
4.7	Alueellinen matalalämpöverkko	65
4.8	Jakelun hyödyt	67
4.9	Lämmön varastoinnin hyödyt.....	67
5	PALUUEDEEN HYÖDYNTÄMINEN VAASAN ALUEEN	
	KAUKOLÄMPÖJÄRJESTELMÄSSÄ.....	68
5.1	Paluueden käytöstä saatavat hyödyt Vaasan kaukolämpöverkossa	69
5.1.1	Pumppaussähkö	69
5.1.2	Lämpöhäviöt.....	70
5.1.3	Lämmön talteenotto savukaasupesurissa	73
5.1.4	Sähköntuotannon lisääntyminen	80
5.1.5	Virtaussuuntien vaikutus.....	81
5.1.6	Polttoaineen säästö.....	83
5.1.7	Lämpövarasto.....	84
5.1.8	Yhteenveto hyödyistä	85
5.2	Paluuvettä hyödyntävät ratkaisut.....	88
5.2.1	Kiinteistön lämmittäminen kaukolämmön paluuedellä.....	88
5.2.2	Lämpöpumppu voimalaitokselle savukaasupesurin yhteyteen..	89
5.2.3	Paluueden hyödyntäminen alueelliseen matalalämpöverkkoon	91
5.2.4	Yhteenveto ratkaisuista	91

6	JOHTOPÄÄTÖS JA POHDINTA	95
6.1	Johtopäätös.....	95
6.2	Pohdinta.....	98

KUVA- JA TAULUKKOLUETTELO

Kuva 1	Kaukolämmön käyttö Suomessa kuukausittain eri vuosina. (Energiateollisuus 2020).....	15
Kuva 2	Kaukolämmön tuotannon energialähteet Suomessa vuonna 2019 (Energiateollisuus 2020).....	16
Kuva 3	CHP toimintakaavio (Thinglink 2015).....	18
Kuva 4	Kaukolämpöjärjestelmä (HSY:n verkkokurssi).	19
Kuva 5	Kaukolämmityksen johtotyyppejä, ja niiden poikkileikkaukset (Mäkelä ym. 2015, 55).	20
Kuva 6	Asiakkaan kaukolämpölaitteet (Tampereen Sähkölaitos, Kaukolämpö Oy).	24
Kuva 7	Vastavirtalevyllämmönsiirrin (Afry 2020, 10)	25
Kuva 8	Kaukolämpöveden virtaus tehon funktiona jäähtymän eri arvoilla (Energiateollisuus 2014, 22).....	27
Kuva 9	Maaperän lämmönjohtavuuden vaihtelu (Koskelainen ym. 2006, 203). .	30
Kuva 10	Läpileikkauskuvat ja laskentayhtälöt erilaisten kaukolämpöjohtojen lämpövastuksille (Koskelainen ym. 2006, 207).....	33
Kuva 11	Lämpövarasto (Wiltshire 2016, 148).....	35
Kuva 12	Kaukolämpöverkon lämpötilan ja ulkoilmanlämpötilan välinen riippuvuus. (Koskelainen ym. 2006, 336).....	37
Kuva 13	Tyypillinen kaukolämpöverkon lämpötila ulkolämpötilan funktiona (Pöyry 2018, 13).	46
Kuva 14	Yksinkertaistettu kuvaus savukaasupesurin toiminnasta (Järvenreuna 2014).	50

Kuva 15 Savukaasun luovuttama teho lämpötilan suhteen savukaasupesurissa. (Järvenreuna 2014).	51
Kuva 16 Palamisilman kostuttimen vaikutus savukaasupesurin lämmön talteenottoon (Jedfelt D, Eteläaho R, Korhonen T, 2013).....	54
Kuva 17 Kaukolämmön paluvedestä otetusta lämpöenergiasta savukaasupesurissa lämmön talteenoton tehostumisen myötä palautuva osuus kaukolämpöveden eri paluulämpötiloilla ja polttoaineen kosteksilla (Pöyry 2010, 7).	55
Kuva 18 Lämpöpumpun toiminta periaate (Industrial Heat Pumps).	57
Kuva 19 Asiakkaan lämmönjakokeskus lämpöpumppukytkenällä (Pöyry 2010, 15).	60
Kuva 20 Lämmityksen kokonaiskustannus investoinnin, sähkön ja lämmön hinta huomioituna asiakkaalle euroina vuodessa kerrostalotyypeittäin. (Pöyry 2010 24).	61
Kuva 21 Kaukolämmön hintakehitys (Energiateollisuus 2019, 22).	62
Kuva 22 Esimerkki lämpöpumppuliitännästä paluu- ja menovesiputkien välillä. (Pöyry 2010, 34).	64
Kuva 23 Esimerkki tuotantolaitokselle asennettavan lämpöpumppuliitännän vaikutuksista kaukolämpöjärjestelmään. (Pöyry 2010, 40)	65
Kuva 24 Alueellinen matalalämpöverkko kytkettynä kaukolämpöverkon paluulinjaan.....	66
Kuva 25 Vaasan kaukolämmityksen polttoainejakauma.	68
Kuva 26 Pumpaussähkön kulutus kaukolämmön meno- ja paluueden välisen lämpötilaeron funktiona.	70
Kuva 27 Vaasan alueen kaukolämpöjärjestelmän kanavatyytit ja niiden lämpöhäviöt prosenttiosuuksina verkostossa.	71
Kuva 28 Vaasan kaukolämpöverkoston lämpöhäviöt paluueden lämpötilan funktiona.	73
Kuva 29 Savukaasupesurin lämmöntalteenottoteho savukaasun eri kosteusprosentteilla ja kaukolämmön paluueden lämpötiloilla.	74

Kuva 30 Savukaasupesurissa palautuva osuus hyödynnetystä paluueden lämpöenergiasta.	75
Kuva 31 Savukaasupesurissa palautuva kaukolämmön paluuedestä otettu lämpöenergia paluueden eri lämpötiloilla ja virtaamalla savukaasun kosteuden ollessa 20,5%.	76
Kuva 32 Savukaasupesureiden lisääntyvä lämmön talteen otto.	78
Kuva 33 Savukaasupesureiden lämmön talteen otto.	79
Kuva 34 Lisääntyvä sähköntuotanto voimalaitoksilla.	80
Kuva 35 Vaasan kaukolämpöverkon virtaukset tilanteessa, jossa jätteenpolttolaitos tuottaa 55 MW ja metsähakkeenpolttolaitos 147 MW.	82
Kuva 36 Lämpövaraston hyödynnettävissä oleva kapasiteetti.	85
Kuva 37 Yhteenveto paluueden lämpötilan laskusta saatavista hyödyistä.	86
Kuva 38 Paluueden lämpötilan laskemisesta saatavat taloudelliset hyödyt.	87
Kuva 39 Kiinteistöjen lämmittämisen paluuedellä tuovat hyödyt kaukolämpöjärjestelmälle.	89
Kuva 40 Lämpöpumpun sijoittaminen voimalaitokselle.	90
Kuva 41 Yhteenveto paluuvettä hyödyntävistä ratkaisuista.	92
Kuva 42 Yhteenveto ratkaisujen taloudellisesta kannattavuudesta.	93
Taulukko 1 Lämmönsiirtimen mitoituslämpötilat (Afry 2020, 12).	26
Taulukko 2 Lämpöhäviöt putkityypeittäin.	72

1 JOHDANTO

Kaukolämmöllä on vahva asema Suomen energiasektorissa, sillä noin puolet Suomessa olevista kiinteistöistä lämmitetään kaukolämmöllä, ja yli puolet uudisrakennuksista liittyvät kaukolämpöjärjestelmiin. Kaukolämmön asemalle energiasektorissa on kuitenkin muodostunut epävarmuustekijöitä, jotka johtuvat kilpailusta lämpöpumppuratkaisuja vastaan, kaukolämpöön kohdistuneista verojen korotuksista, ja rakennuksien energiamääräyksistä.

Pariisin ilmastopimuksen ja Suomen ilmastotavoitteiden johdosta myös energiapolitiikan tavoitteet ovat kunnianhimoiset kohti fossiilivapaata energiantuotantoa. Polttoaineiden hintojen nousu ja kustannusten vaihtelu luovat osaltaan painetta siirtyä kohti uusiutuvaa ja tehokkaampaa energiantuotantoa. Suomessa kaukolämpöyhtiöt ovat jo ottaneet merkittäviä harppauksia kohti puhtaampaa tuotantorakennetta. Kaukolämmitys on myös tulevaisuudessa tehokas lämpöenergian siirtojärjestelmä taajama-alueilla, ja tuotannon puhdistuessa sekä jakelun tehostuessa kaukolämpöjärjestelmät mahdollistavat taajama-alueiden tehokkaan siirtymän pois fossiilisista energialähteistä.

Kaukolämpöä tuotetaan pääasiassa sähkön ja lämmön yhteistuotantolaitoksilla, joissa hyötysuhde on korkea, ja suuren kokoluokan laitoksilla tehokas savukaasujen puhdistus ja korkeat savupiiput ovat mahdollisia toteuttaa, jotka pitävät päästöjä matalina ja poissa ihmisten hengitysilmosta. Näistä syistä asiantuntijat ovat tietoisia kaukolämmityksen eduista, mutta melkein puolet kaukolämmöstä tuotetaan fossiilisilla polttoaineilla, joka on johtanut kuluttajien perspektiivistä hieman heikentyneeseen yleis mielikuvaan kaukolämmöstä.

Edellä mainituista syistä kaukolämmityksen on vähennettävä fossiilisten polttoaineiden käyttöä, ja pitää hinnoittelu kilpailukykyisenä, jotta kaukolämmitys pitää asemansa kuluttajien ensisijaisena lämmitysratkaisuna. Onnistuakseen näissä tavoitteissa kaukolämpöjärjestelmistä on tehtävä energiatehokkaampia, ja uusia ratkaisuja on tehtävä. Tämä opinnäytetyö tukee juuri näitä ajankohtaisia

kaukolämmityksen tavoitteita tutkimalla kaukolämmön paluueden lämpöenergian hyödyntämismahdollisuuksia ja siitä saatavia hyötyjä kaukolämpöjärjestelmän tehokkuudelle ja kaukolämmön tuotannolle.

Opinnäytetyön toimeksiantaja on Vaasan Sähkö Oy, jonka liiketoimintaa ovat sähkön myynti, tuotanto, jakelu ja kaukolämmitys. Tämä opinnäytetyö on tehty kaukolämpöyksikölle. Vaasan Sähköllä tehdään toimia hiilidioksidipäästöjen vähenemisen eteen ja energiatehokkuuden parantamiseksi. Tämä opinnäytetyö tukee molempia tavoitteita antaen tietoa kaukolämpöverkon paluueden hyödyntämismahdollisuuksista.

Työn tavoitteena on määrittää saavutettavat hyödyt kaukolämmön paluueden hyötykäytöstä Vaasan seudun kaukolämpöjärjestelmässä. Työssä tutkitaan ratkaisuja, joissa kaukolämmön paluuedestä siirretään lämpöenergiaa menoveteen lämpöpumpun avulla, paluuedestä siirretään lämpöenergiaa alueelliseen matalalämpöverkkoon sekä ratkaisua, jossa kaukolämpöjärjestelmään otettaisiin asiakkaita, joiden kiinteistöjen lämmitys otetaan kaukolämmön paluuedestä.

Paluueden lämpöenergian käyttäminen madaltaa luonnollisesti sen lämpötilaa, josta on monia hyötyjä kaukolämpöjärjestelmälle. Työssä tutkitaan saatavia hyötyjä tuotantolaitoksien rakennesuhteen, savukaasupesurien lämmön talteenoton, järjestelmän pumppaussähkön ja lämpöhäviöiden osalta. Työn rajaamiseksi mahdolliset muut hyödyt kuten verkoston pullonkaulakohtien kapasiteetin suureneminen ja tehokkaampi hukkalämpöjen hyödyntäminen ovat jätetty käsittelemättä. Paluueden hyödyntämisestä saatavat hyödyt ovat yksilöllisiä, ja hyötyjen kartoitus on tehtävä jokaiselle kaukolämpöjärjestelmälle erikseen.

Tämä opinnäytetyö määrittää hyödyt Vaasan alueen kaukolämpöjärjestelmälle vuositasolla ja järjestelmän eri ajoaikoina, koska vaikutukset vaihtelevat vuodenajan mukaan johtuen ulkolämpötilan vaikutuksesta järjestelmän ajotapaan. Tutkimalla hyödyt paluueden hyödyntämisestä, voidaan määrittää

paluueden lämpöenergian arvo Vaasan Sähkö Oy:lle. Työssä esitetään myös uudenlainen kaukolämmön hinnoittelutariffi, jotta paluueden käyttäminen olisi myös kaukolämmön asiakkaille taloudellisesti kannattavaa.

Paluueden hyödyntämisellä saavutetaan kaukolämpöjärjestelmän energiatehokkuuden paranemista sekä rahallisia säästöjä kaukolämmön myyjälle. Jos työssä esitetty uudistettu kaukolämpötariffi otetaan käyttöön, mahdollistaa se kaukolämmön myyntiä edullisempaan hintaan jäähtymäänsä parantaville asiakkaille, ja parantaa kaukolämmön kilpailukykyä lämpöpumppuja vastaan lämmityksen hinnassa.

Kaukolämpöverkon paluueden hyötykäytöllä saavutetaan hyötyjä kaukolämpöjärjestelmän kaikissa osissa. Koska saavutettavat hyödyt ovat niin moninaiset, työssä esitetään melko laaja teoriaperusta kaukolämpöjärjestelmästä ja sen osista.

Luvussa kaksi esitetään työn toteutus ja tutkimusmenetelmät sekä perustellaan miksi niihin on päädytty. Luvussa kerrotaan työn rajauksesta, lähdekritiikistä perusteluineen ja mistä työssä käytetyt lähtötiedot ovat peräisin.

Työn luvussa kolme kerrotaan ensin lyhyesti kaukolämmityksestä Suomessa, jonka jälkeen esitetään osat, joista kaukolämpöjärjestelmä koostuu. Luvussa kerrotaan miten järjestelmä on mitoitettu, miten jakelu toimii, ja mitkä ovat järjestelmän toimivuuden reunaehdot. Luvun lopussa kerrotaan järjestelmän lämpö- ja painehäviöistä sekä kaukolämpöveden lämpötilan vaikutuksesta järjestelmässä.

Luvussa neljä esitetään yleisellä tasolla kaukolämmön paluueden hyödyntämismahdollisuudet kiinteistöihin, alueelliseen matalalämpöverkkoon ja menoveden lisälämmitykseen. Luvussa esitetään mahdollisia lämpöpumppukytkentöjä paluueden hyödyntämiseksi sekä yhtälöt, joilla määritetään paluueden jäähtymän rahallinen arvo. Savukaasupesurin toimintaperiaate kuvataan luvussa, sekä mihin pesurin lämmön talteenotto

perustuu, ja miten se on riippuvainen kaukolämmön paluuedestä. Luvussa esitetään myös laskenta yhtälöitä savukaasujen lämmön talteenotosta. Lisäksi lämpöpumpun toimintaperiaate on kuvattuna luvussa.

Viidennessä luvussa esitellään Vaasan alueen kaukolämpöjärjestelmä sekä esitetään laskennan tulokset paluueden käytön hyödyistä Vaasassa. Luvussa esitetään miten paluueden lämpöenergiaa hyödyntäviä ratkaisuja voidaan sijoittaa Vaasan kaukolämpöjärjestelmään ja mitkä hyödyt saavutetaan eri ratkaisuilla. Luvun lopussa vertaillaan paluueden lämpöenergiaa hyödyntäviä ratkaisuja toisiinsa.

Kuudennessa luvussa tehdään ensin johtopäätös, jossa analysoidaan tulokset, arvioidaan tutkimuksen luotettavuutta ja vertaillaan työssä esitettyjä ratkaisuja toisiinsa. Johtopäätöksen jälkeen luvussa on pohdintaa, jossa kerrataan työn tavoitteet ja arvioidaan kuinka työ onnistui vastaamaan tavoitteisiinsa sekä menetelmävalintojen onnistumista. Pohdintaosuudessa esitetään myös jatko- ja lisäkehittämisideoita perustellusti.

2 TOTEUTUS

Tämän opinnäytetyön teoriaosuus on toteutettu perehtyen kirjallisuuteen sekä aikaisempiin tutkimuksiin työhön liittyvistä aiheista. Aihetta käsittelevän kirjallisuuden tutkiminen osoitti tutkittavan aiheen todella laajaksi ja moninaiseksi, joten työ päätettiin rajata käsittelemään vain oletetusti merkittävimpiä hyötyjä, ja vastaamaan toimeksiantajan antamiin tavoitteisiin.

Opinnäytetyön tietoperusta on kerätty referoiden monipuolisista ja luotettavista kotimaisista sekä kansainvälisistä lähteistä. Lähteinä on käytetty vain tunnettujen alan asiantuntijoiden tekemiä tutkimuksia, raportteja ja kirjoja. Lähteiksi on valittu mahdollisimman uutta tietoa. Kaupallisista lähteistä työssä on vain muutama objektiivista tutkimusta havainnollistava kuva. Suomi on kaukolämmityksen edelläkävijämaa, jonka vuoksi jopa 70 % työssä käytetyistä lähteistä ovat kotimaisia. Tietoperustassa on tehty analyysejä sekä johtopäätöksiä esitetyistä yhtälöistä johdattaen tutkimusta kohti tavoitteita.

Tutkimuksen lähtötiedot ovat Vaasan Sähkö Oy:n keräämä data kaukolämpöverkostosta sekä Mustasaarella sijaitsevan jätteenpolttolaitoksella kerätty data sähkön ja kaukolämmön yhteistuotantolaitoksen tuotannosta ja savukaasupesurista. Kertyneen datan perusteella on tehty selvitys kaukolämpöjärjestelmän nykytilasta lämpöhäviöiden, savukaasupesurin, pumppaussähkön kulutuksen, kaukolämmön tuotannon ja meno- ja paluueden lämpötilojen osalta.

Työssä on konfiguroitu laskentamalli tutkittaville aiheille eli savukaasupesurin lämmön talteenottoteholle, verkoston lämpöhäviöille ja pumppaussähkön kulutukselle. Laskentamalli on verifioitu vertaamalla laskemalla saatuja tuloksia mitattuihin arvoihin nykytilanteessa. Työssä on luotu skenaarioita, joissa laskentamalliin on lisätty kaukolämmön paluueden lämpöenergiaa hyödyntäviä ratkaisuja, ja määritetty ratkaisusta saatavat hyödyt kaukolämpöjärjestelmälle.

Skenaarioiden hyötyjä on verrattu nykytilaan ja toisiinsa. Laskennan tuloksien perusteella on arvioitu kannattavuutta energiatehokkuuden ja taloudellisuuden näkökulmasta. Laskennan tuloksia on arvioitu vuoden keskiarvona sekä kuukausitasolla.

Työssä on tehty selvitys, minkälaiset vaatimukset paluuvien hyödyntämiseksi eri tarkoituksiin ovat. Fluidit Heat -simulointiohjelmalla on selvitetty missä kyseiset vaatimukset täyttyvät Vaasan kaukolämpöjärjestelmässä, ja mihin paluuvien lämpöenergiaa hyödyntävät ratkaisut tulisi sijoittaa järjestelmässä, jotta saatavat hyödyt olisivat mahdollisimman suuret.

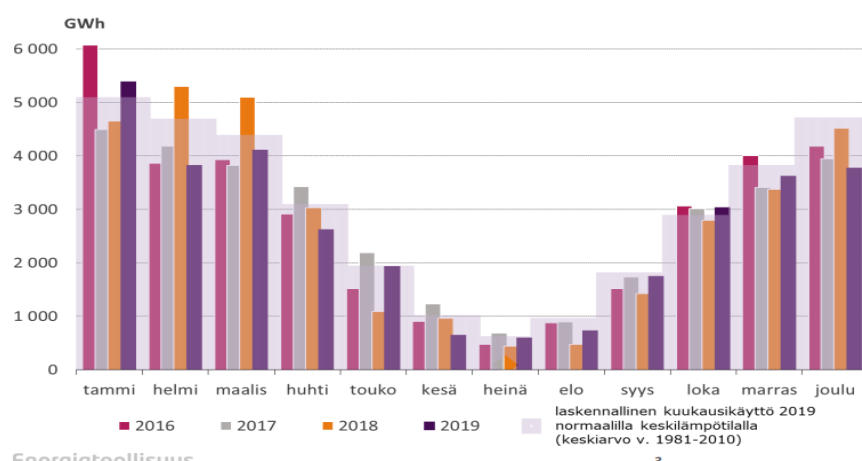
Pilottihankkeen tekemiseen ei ollut mahdollisuutta, joten työ on päätetty tehdä vain teorian tasolla, ja analyysit sekä johtopäätökset perustuvat luotettavana pidettävien laskennan tuloksiin. Työssä tutkitaan kolmea erilaista ratkaisua kaukolämmön paluuvien hyödyntämiseksi, ja työn lopputuloksen perusteella voi tehdä päätöksen mistä ratkaisusta on kannattavaa tehdä pilottihanke.

3 KAUKOLÄMPÖ

Kaukolämpö on toimintavarma, energiatehokas ja ympäristöystävällinen lämmitysmuoto. Kaukolämmitys on järjestelmä, jonka tehtävä on tuottaa keskitetysti lämpöä laajalla alueella oleville asiakkaille, kuten kaupungeissa sijaitseville kotitalouksille ja teollisuudelle. Keskitetysti tuotettu lämpö toimitetaan kaukolämpöverkoston asiakkaille. Lämpö toimitetaan kuuman veden välityksellä, joka kuumennetaan kattilassa voimalaitoksella, ja pumpataan kaukolämpöverkostoa pitkin asiakkaille. (Mäkelä & Tuunanen 2012, 11-12) Tässä luvussa kuvataan kaukolämpöjärjestelmän toimintaperiaate yleisellä tasolla.

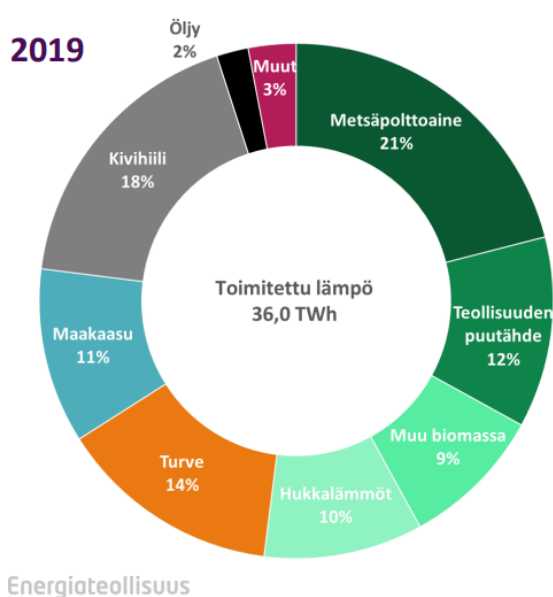
3.1 Kaukolämpö Suomessa

Kaukolämmön käyttö on lisääntynyt Suomessa melko tasaisesti vuonna 1970 käytetystä 5 TWh:sta vuonna 2019 käytettyyn 36 TWh:n. Talviaikaan kaukolämpöä käytetään huomattavasti enemmän kuin kesäaikaan, kuten kuvasta 1. havaitaan. Kaukolämpöyhtiöt huolehtivat, että kaukolämpöasiakkaat saavat riittävästi lämpöä. Eri vuodenaikoina käytetään erilaisia tuotantomuotoja ulkolämpötilasta riippuen. (Energiateollisuus 2020)



Kuva 1. Kaukolämmön käyttö Suomessa kuukausittain eri vuosina (Energiateollisuus 2020)

Kaukolämmön tuotannossa uusiutuvien energialähteiden käyttö ja hukkalämpöjen hyödyntäminen lisääntyy jatkuvasti, ja ilmastoneutraalisti tuotetaan jo yli puolet Suomen kaukolämmöstä. Kuva 2 esittää eri energialähteiden osuuden Suomen kaukolämmön tuotannossa vuonna 2019. Fossilisia polttoaineita on korvattu pääasiassa biomassalla, jonka käyttö on kaksinkertaistunut 2010-luvulla. (Energiateollisuus 2020)



Kuva 2. Kaukolämmön tuotannon energialähteet Suomessa vuonna 2019 (Energiateollisuus 2020)

Asuin- ja palvelurakennuksissa kaukolämpö on Suomen suosituin lämmitysmuoto 46 % osuudella, jonka osuus kasvaa, koska uudisrakennuksista noin 57 % liittyvät kaukolämpöverkkoihin. (Energiateollisuus 2020)

3.2 Kaukolämmön tuotanto

Kaukolämpövoimalaitos on laitos, jossa tuotetaan pelkästään kaukolämpöä, tai laitos, jossa tuotetaan sekä sähköä että kaukolämpöä. Nykyään myös hukkalämmön talteenotolla tuotetaan kaukolämpöä. Hukkalämpöä voidaan ottaa

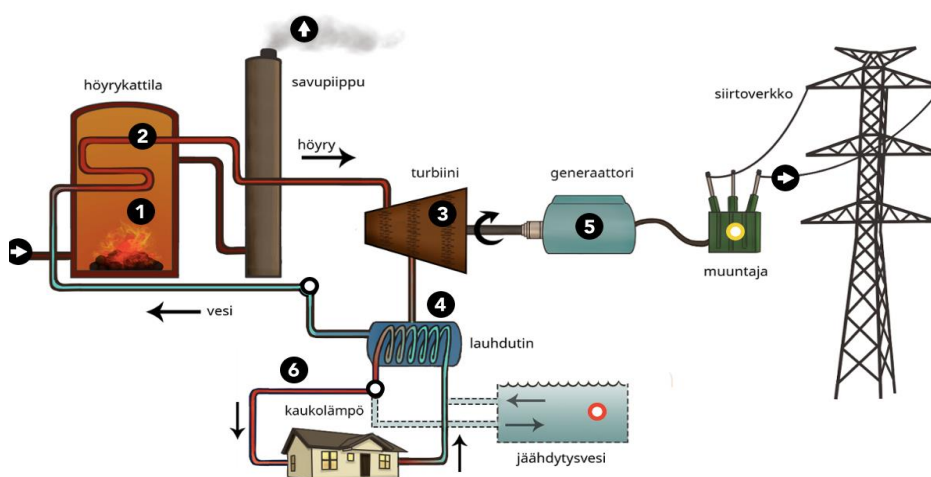
talteen esimerkiksi savukaasuista savukaasupesuria hyödyntämällä tai jäteveden lämpöä lämpöpumppua hyödyntämällä. 2010-luvulla hukkalämpöjen hyödyntäminen on yli 3 kertaistunut kaukolämmössä. (Hillamo 2019)

Tuotantolaitoksien mitoituksessa tavoitellaan optimaalista energian kokonaistuotantoa, joka huomioi kaukolämmön lisäksi sähköntuotannon. Kaukolämpöjärjestelmässä on yleensä useita eri kokoisia tuotantolaitoksia, joiden käyttö ja käyttöajat riippuvat verkon siirtokapasiteetista, polttoaineiden hinnoista ja ennen kaikkea asiakkaiden tehon tarpeesta. Tuotantolaitokset mitoitetaan tehontarpeen vaihtelu huomioiden. Lämmöntuotantolaitokset voidaan luokitella peruskuormalaitoksiin, jotka tuottavat suurimman osan vuoden tehon tarpeesta, sekä huippu- ja varalämpökeskuksiin, joiden tehtävä on täydentää peruskuormalaitoksen tuotantoa. (Mäkelä ym. 2012, 28-32)

3.2.1 Sähkön ja lämmön yhteistuotanto CHP

Sähkön ja lämmön yhteistuotanto (CHP) tarkoittaa voimalaitoksen käyttöä siten, että sähköntuotannon hukkalämmöstä tuotetaan kaukolämpöä, joka muuten lauhdutettaisiin ympäristöön. Hukkalämmön hyödyntäminen parantaa merkittävästi voimalaitoksen hyötysuhdetta. Perinteiselle voimalaitokselle erinomainen hyötysuhde on noin 40 prosenttia, mutta hukkalämmön hyödyntämisellä esimerkiksi kaukolämmön tuottamiseen, voi voimalaitoksen hyötysuhde nousta yli 90 prosenttiin. CHP laitoksessa höyryturbiinilta poistuvalla kuumalla vedelle tai höyrylle on monia hyödyntämismahdollisuuksia kuten prosessitai kaukolämmöntuottaminen. (Abdullah 2012, 160) Voimalaitoksen muodostavat vähintään yksi kattilan ja turbiinin yhdistelmä. Kuva 3 havainnollistaa CHP laitoksen toiminnan. Kattiloissa poltetaan useasti montaa eri polttoainetta. Kaukolämpölaitoksessa oleva höyryturbiini voi olla vastapaineturbiini, jolloin sähköteho riippuu kaukolämpöverkkoon syötettävän veden lämpötilasta. Käytössä voi olla myös väliotto-lauhdeturbiini. Tällaisessa ratkaisussa kaukolämmön vesi lämmitetään väliottohöyryllä ja höyryn voidaan antaa paisua lauhduttimen paineeseen asti. (Jalovaara, Aho, Hietamäki & Hyytiä 2003, 21)

Suomessa CHP-laitosta käytetään yleensä kaukolämmön tarpeen mukaan. Laitoksen täysi kapasiteetti on käytössä, kun lämmitystarve on suurin. Silloin se tuottaa myös suurimman määrän sähköä. Sähkön kysyntä on yleensä korkeinta kylminä talvipäivinä, ja silloin lämmöntarve on myös suurin. Toisaalta sähkön ja lämmön yhteistuotantolaitoksessa sähköntuotanto voidaan säätää myös sähkön markkinahinnan mukaan. CHP:n sopeutuvuutta ja energiatehokkuutta voidaan parantaa entisestään lisäämällä lämpöakkuja kaukolämpöjärjestelmään ja lämpöenergiaa talteen ottavan savukaasupesurin voimalaitoksen yhteyteen. (Energiateollisuus)



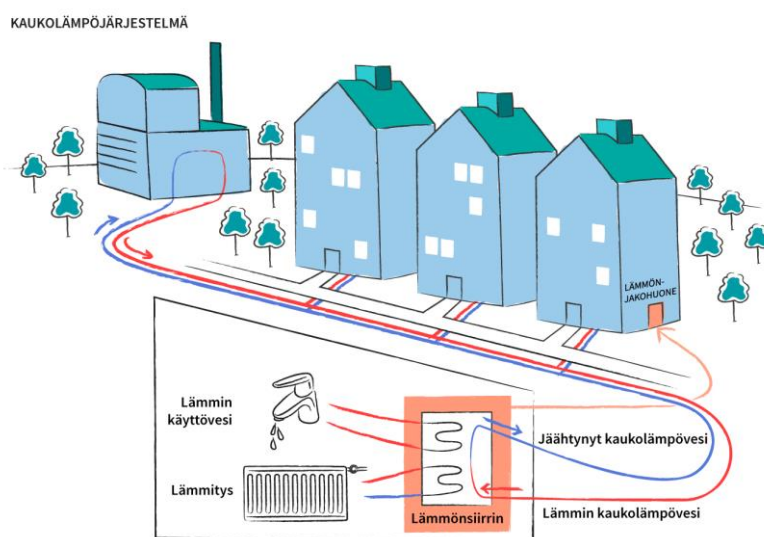
Kuva 3. CHP toimintakaavio (Thinglink 2015)

3.2.2 Lämpökeskus

Kaukolämpöä voidaan tuottaa myös pelkästään lämpöä tuottavissa laitoksissa, joita kutsutaan lämpökeskuksiksi. Lämpökeskuksissa lämpö tuotetaan höyry- tai kuumavesikattiloilla. Prosessissa saadaan polttoaineesta, polttotekniikasta, kattilan mitoituksesta ja ajotavasta riippuen 85 – 95 % polttoaineen sisältämästä energiasta hyödynnettyä veteen tai höyryyn. Suurin häviö tulee savukaasuista. Pääpolttoaineena lämpökeskuksissa käytetään maakaasua, puuta, turvetta, ja kevytpolttoöljyä. (Koskelainen, Saarela & Sipilä 2006, 282)

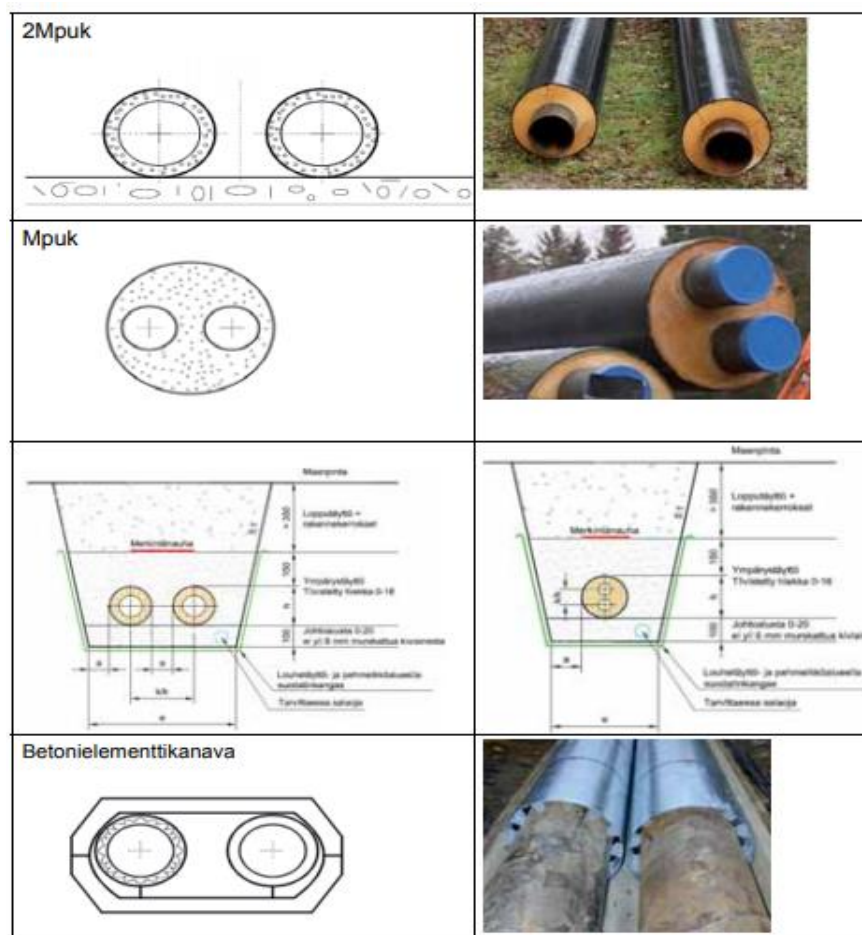
3.3 Kaukolämpöverkko

Kaukolämpöverkko on kaksiputkinen verkosto, jonka tarkoitus on siirtää voimalaitoksella tuotettua lämpöenergiaa putkistossa kiertävän veden avulla. Toisessa putkessa virtaa kuuma vesi eli menovesi, joka on ulkolämpötilasta riippuen 65 – 115 celsiusastetta. Toisessa putkessa kulkee paluuvesi, jonka lämpötila yleensä vaihtelee 40 ja 60 celsiusasteen välillä. Lämmitettävissä kohteissa eli useimmiten rakennuksissa on lämmönvaihtimet, jotka ottavat rakennuksessa kiertävään lämmitysjärjestelmään lämpöenergian talteen kaukolämmön menovesiputkesta. Lämmönvaihtimesta kaukolämpövesi palaa jäähtyneenä paluuesiputkeen, jota pitkin vesi palaa takaisin voimalaitokselle uudelleen lämmitettäväksi. (Energiateollisuus) Kuvassa 4 on esitetty yksinkertaistettu kuva kaukolämpöjärjestelmän toiminnasta. Kaukolämpöjärjestelmän kannattavuuden kannalta verkon kestävyys on todella tärkeää verkon korkeiden rakennus- ja korjauskustannusten vuoksi (Mäkelä ym. 2015, 50).



Kuva 4. Kaukolämpöjärjestelmä (HSY:n verkkokurssi)

Kaukolämpöjärjestelmässä meno- ja paluuesiputki muodostavat yhdessä kaukolämpöjohdon. Verkosto koostuu talojohdoista, runkojohdoista ja siirtojohdoista. Siirtojohdot ovat suurimpia johtoja, jotka yhdistävät voimalaitokset runkojohtoihin. Runkojohdot yhdistävät siirtojohdot talojohdoin, jotka yhdistävät lämmitettävät kohteet kaukolämpöverkkoon. (Mäkelä ym. 2015, 51) Kuvassa 5 esitellään yleisimmät kaukolämpöjohtotyypit. Nykyään uudet johdot tehdään pääasiassa Mpuk- ja 2Mpuk-johtotyypeistä, mutta kaukolämpöverkostoissa on käytössä vielä paljon vanhoja betonielementtikanavatyyppejä.



Kuva 5. Kaukolämmityksen johtotyyppejä, ja niiden poikkileikkaukset (Mäkelä ym. 2015, 55)

Putkissa virtava vesi on käsitelty hapen ja mekaanisten epäpuhtauksien poistamiseksi sekä korroosion estämiseksi. Kaukolämpövesi on myös värjätty helpottamaan mahdollisten vuotojen havaitsemista, ja tunnistamista kaukolämpövuodoksi. Yleensä kaukolämpöputket asennetaan vajaan metrin syvyyteen maahan. Putkissa on tehokas lämmöneristys. Suomessa jakeluverkon häviöihin kuluu verkoston siirtämästä lämpöenergiasta keskimäärin 8-9 prosenttia. Kaupungeissa häviöihin menee vähemmän kuin harvemmin asutulla alueella. Suomessa on yli 15 000 kilometriä kaukolämpöverkkoa, ja vuosittain rakennetaan 250 – 500 kilometriä uutta verkkoa. (Energiateollisuus, kaukolämpöverkot)

3.4 Kaukolämmön jakelu

Lämmön siirto tapahtuu siten, että tuotantolaitoksella lämmitetty vesi pumpataan lämmitettäviin kohteisiin kiertopumpuilla. Paineen pito ja lisäveden pumppaus vaativat myös pumppausta kaukolämpöjärjestelmässä. Verkon painetasoja säädetään paineenpitopumpuilla, ja paine-eroa säädetään kiertopumpuilla. Pumppuja ohjataan taajuusmuuntajilla. Kiertopumput ovat yleensä tuotantolaitoksella sijaitsevia keskipakopumppuja. Kiertopumpun valinnassa huomio keskittyy tilavuusvirtaan, hyötysuhteeseen ja kierrosnopeuteen. Kiertopumput mitoitetaan sopimaan kaukolämpöjärjestelmän painehäviöiden mukaan, jotka syntyvät esimerkiksi tuotantolaitoksilla, verkossa ja mittakeskuksissa. (Koskelainen ym. 2006, 170)

Kaukolämpöjärjestelmässä pumppaus tapahtuu tuotantolaitoksilla sekä välipumppaamoissa. Pumppaus optimoidaan siten, että asiakkaille toimitetaan sovitun määrän verran lämpöenergiaa mahdollisimman kustannustehokkaasti. Parhaaseen energiatehokkuuteen päästään käyttämällä välipumppaamoja, ja sijoittamalla ne parhaiten soveltuviin kohtiin verkostossa, koska käyttämällä välipumppaamoja sähkönkulutus on huomattavasti pienempi verrattuna yhteen

suureen pumppaamoon. Kaukolämpöputkistossa tapahtuu aina painehäviöitä. Putkikoko ja virtaavan veden määrä ovat eniten painehäviöön vaikuttavia tekijöitä. Käytännössä kaukolämpöverkon painehäviöt riippuvat kaukolämpöveden jäähtymisestä, eli lämpötilaerosta veden saapuessa asiakkaalle ja sieltä lähtiessä. Kuten alla olevasta yhtälöstä 1 huomataan, mitä pienempi lämpötilaero, sitä suurempi virtaus vaaditaan tuottamaan sama kaukolämpöteho. Virtauksen kasvaessa myös painehäviöt kasvavat. (Mäkelä ym. 2015, 45)

$$\Phi = \rho \cdot q_v \cdot c_p \cdot \Delta t \quad (1)$$

missä

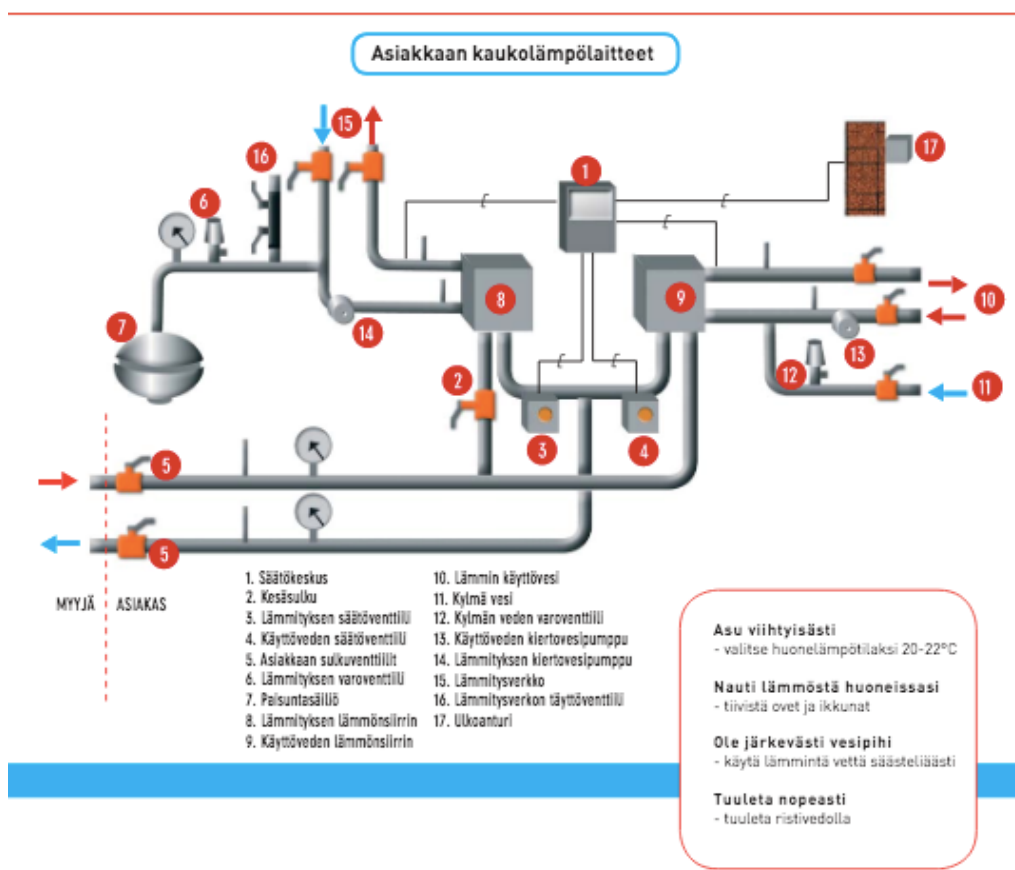
Φ	on kaukolämpöteho	[kW]
ρ	on kaukolämpöveden tiheys	[kg/dm ³]
q_v	on kaukolämpöveden virtaama,	[dm ³ /s]
c_p	on kaukolämpöveden ominaislämpökapasiteetti,	[kJ/kg K]
Δt	on kaukolämmön meno- ja paluueden lämpötilaero	[K]

Kuluttajien tarvitsema virtauksen määrä vaihtelee yleensä paljon sekä vuosi- että vuorokausitasolla. Kuluttajat määrittävät kaukolämpöjärjestelmän pumppauksen virtaaman määrän. Nostokorkeus on aina pidettävä niin korkeana, että jokaiselle kuluttajalle pystytään takaamaan vähintään 0,6 bar:n paine-ero, joka asettaa haasteita pumppaukselle asiakkaan tarvitseman virtauksen määrän vaihtelusta johtuen. Mitoittaessa pumpun nostokorkeutta on myös huomioitava, että asiakkaalle sallitaan normaalisti maksimissaan 5 bar:n paine-ero meno- ja paluuputken välille. Kaukolämpöpumppaus on suunniteltava siten, että missään käyttötilanteessa eikä missään osassa verkkoa ei pumppaus aiheuta

kaukolämpöverkon paineluokan ylittäviä paineita eikä liian alhaisia paineita. (Energiateollisuus 2011, 1) Paineet ja lämpötila kaukolämpöverkostossa mitoitetaan verkon kriittisten häntäpään asiakkaiden mukaan, koska paine-erot ovat siellä pienimpiä ja lämpötila matalin. (Koskelainen ym. 2006, 326, 340)

3.5 Kaukolämpöasiakkaat

Suomessa kaukolämpöasiakkailla on omat kuvan 6 kaltaiset lämmönjakokeskukset, jotka koostuvat säätölaitteista, lämmönsiirtimistä, pumpuista ja muista laitteista kuten venttiileistä ja mittareista. Jokainen asiakas siis kytkeytyy kaukolämpöverkkoon lämmönjakokeskuksella, joiden säätölaitteet säätävät kaukolämmön vesivirtaa. Lämmönsiirtimet eli useimmiten lämmönvaihtimet ovat osa lämmönjakokeskusta, jotka erottavat kaukolämpöverkon veden ja rakennusten järjestelmien vedet toisistaan. Asiakkaan kiinteistössä olevaa järjestelmää kutsutaan toisiopuoleksi ja myyjän järjestelmää ensiopuoleksi. Pumput jakavat lämpöä rakennuksen kaikkiin lämmitystä vaativiin kohteisiin kuten käyttövedeen, huonetilojen lämmitykseen sekä ilmanvaihtoon. Parhaiten toimiva lämmönjakokeskus sisältää usean eri lämmönsiirtimen. Eri toiminta-ajat tai lämpötilat omaavat lämmityspiirit on suositeltavaa lämmittää omilla lämmönvaihtimilla, esimerkiksi huonetilojen lämmitykseen ja käyttöveden lämmitykseen on suositeltavaa käyttää erillisiä lämmönsiirtimiä. (Mäkelä ym. 2015, 65)



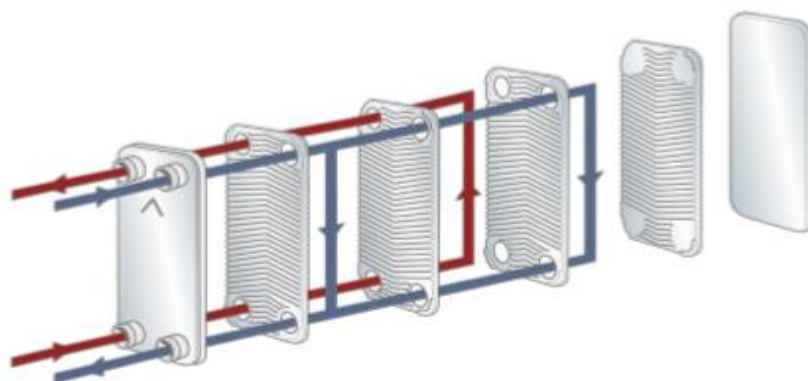
Kuva 6. Asiakkaan kaukolämpölaitteet (Tampereen Sähkölaitos, Kaukolämpö Oy)

3.5.1 Lämmönvaihdin

Lämmönvaihdin on laite, jota käytetään tehokkaaseen lämmönsiirtoon väliaineesta toiseen siten, että aineet eivät sekoitu keskenään. Väliaineet ovat eri lämpötilassa olevia fluideja, eli väliaineita, joissa rakenneosat pääsevät liikkumaan vapaasti toistensa suhteen. Kaasut ja nesteet toimivat yleensä fluideina lämmönvaihtimissa. Väliaineet lämmönvaihtimessa erotetaan kiinteillä seinämillä, siten että fluidit eivät ole suorassa kosketuksessa tai pääse sekoittumaan keskenään. Lämmönvaihtimia on monenlaisia moniin eri käyttötarkoituksiin. (Branson 2010)

Lämmönvaihdin koostuu hyvin lämpöä johtavista levyistä tai putkista, joiden sisällä virtaa fluidit. Fluidivirrat voidaan suorittaa usealla eri tavalla. Termodynaamisesti tehokkain lämmönvaihdin on vastavirtauslämmönvaihdin, mutta lämmönvaihdinta valitessa eri käyttötarkoituksiin on muitakin vaikuttavia tekijöitä, jonka vuoksi eri tyyppisiä lämmönvaihtimia on erittäin paljon. Lämmönvaihtimet voidaan jakaa kolmeen eri päägeometriaan: vastavirta, jossa nesteet virtaavat rinnakkain ja vastakkaisiin suuntiin; rinnakkainen virtaus, jossa nesteet virtaavat rinnakkain ja samaan suuntaan; ristivirtaus, jossa nesteet virtaavat kohtisuorassa suunnassa toisiinsa nähden. Kuva 7 esittää vastavirtalämmönvaihtimen rakenteen ja nesteen virtaussunnan.

Geometrisen kokoonpanon lisäksi lämmönvaihtimen tehokkuus ja mitoitus riippuvat monista muista muuttujista kuten lämmönvaihtimen läpikulkevista massavirroista, lämmönvaihtimeen tulevien fluidien tulo-, - ja lähtölämpötiloista, termofysikaalisista ominaisuuksista sekä seinämien pinta-alasta ja lämpövastuksesta. (Gicquel 2011, 272)



Kuva 7. Vastavirtalevyllämmönsiirrin (A fry 2020, 10)

Suomessa olemassa olevien rakennusten lämmönsiirtimet ovat mitoitettu taulukon 1 mukaisesti. Uudisrakennuksissa, joissa on parempi energiatehokkuus, toisiolämpötilat ovat matalampia, mahdollistavat matalammat tulolämpötilat ja parantavat kaukolämpöveden jäähtymää. Ensiopuolen tulolämpötila on mitoitettu 115 celsiusasteeseen, ja ensiopuolen paluulämpötila saa maksimissaan olla 3 celsiusastetta korkeampi kuin toisiopuolen paluulämpötila. (Afry 2020,11-12)

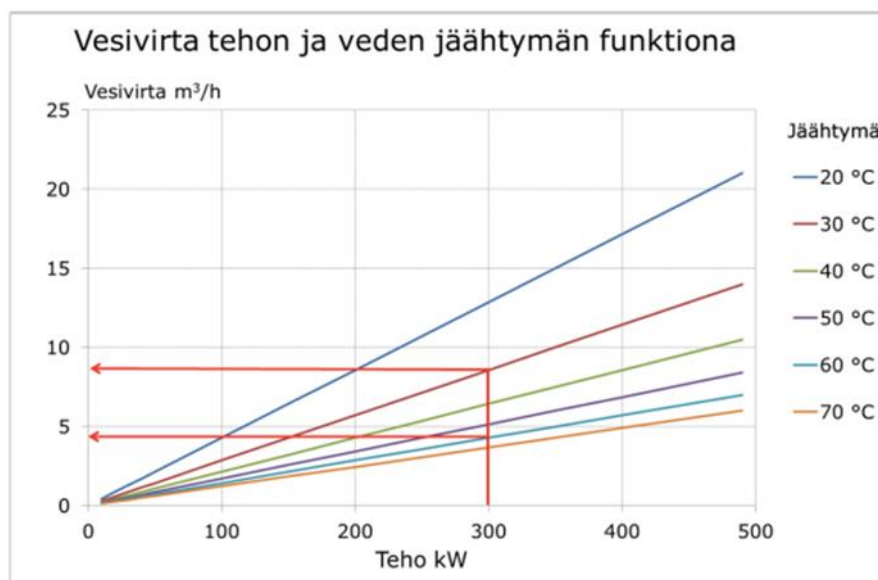
Taulukko 1. Lämmönsiirtimen mitoituslämpötilat (Afry 2020, 12)

	Lämmönsiirtimen mitoituslämpötilat [°C]			
	Ensiö		Toisio	
	Tulo	Paluu	Paluu	Meno
Lämmityksen lämmönsiirtimet, radiaattorilämmitys	115	43 (max)	40 (max)	70 (max)
Lämmityksen lämmönsiirtimet, radiaattorilämmitys – vanhat rakennukset	115	63 (max)	60 (max)	80 (max)
Lämmityksen lämmönsiirtimet, lattialämmitys	115	33 (max)	30 (max)	40 (max)
Kosteiden tilojen mukavuuslattialämmitys	70	28 (max)	25 (max)	35 (max)
Ilmanvaihdon lämmönsiirtimet	115	43	40	70

3.5.2 Säätojärjestelmä

Suomessa kaukolämmön taloudellinen kannattavuus perustuu asiakkaiden lämmönjakokeskusten säätölaitteisiin, joilla asiakkaan käyttämää lämmitystehoa säädetään. Kaukolämmön myyjä ei pysty suoraan vaikuttamaan asiakkaan säätölaitteisiin. Kaukolämpöveden lämpötila ja paine-ero sekä painetaso ovat tekijöitä, joihin lämmönmyyjä keskittyy kaukolämmön laadun varmistamiseksi. Lämmönmyyjä on vastuussa asiakkaalle tulevan veden lämpötilasta, mutta paluueden lämpötila riippuu asiakkaan lämmönjakojärjestelmästä. Asiakkaan on taloudellisesti kannattavaa huolehtia lämmönjakojärjestelmänsä toimivuudesta. (Mäkelä ym. 2015, 78) Asiakkaan säätöjärjestelmä ottaa tarvitsemansa tehon

kaukolämpöverkosta. Kuva 8 havainnollistaa kaukolämpötehon kaukolämpöveden virtauksen ja jäähtymän asiakkaan laitteissa suhteen. (Energieellisuus 2014, 22)



Kuva 8. Kaukolämpöveden virtaus tehon funktiona jäähtymän eri arvoilla (Energieellisuus 2014, 22)

3.5.3 Kaukolämmön hinnoittelu

Kaukolämmön hinnoittelu perustuu kaukolämpötariffiin, jonka suuria etuja ovat kustannusvarmuus, yksinkertaisuus, selkeys ja yleispätevyys. Kaukolämpötariffi koostuu liittymis-, - perus- ja energiamaksusta. Kaukolämmön kiinteät kustannukset katetaan perus- ja liittymismaksuilla ja muuttuvat kustannukset katetaan energiamaksulla. Laskutus perustuu asiakkaan lämmönjakokeskuksella mitattuihin arvoihin, jossa lämpötila mitataan meno- ja paluujohdoista sekä virtaama paluujohdosta. (Pöyry 2010, 11-13)

Kaukolämpöteho perustuu virtauksen lisäksi lämpötilaeroon lämmönvaihtimen meno ja paluupuolella, ja suuresta jäähtymästä asiakkaan laitteissa on monia hyötyjä lämmönmyyjälle, mutta asiakas ei hyödy paremmasta jäähtymästä

mitenkään. Tästä syystä kaukolämpötariffiin voisi lisätä yhden termin lisää, joka huomioi jäähtymän asiakkaan laitteissa. Uusi termi olisi jäähtymähyvitys, joka antaisi asiakkaalle alennusta kaukolämpölaskussa, jos asiakkaalta palautuva paluuveden lämpötila on keskimääräistä paluulämpötilaa matalampi, ja jos palautuvan veden lämpötila on merkittävästi keskimääräistä korkeampi olisi sillä hintaa nostava vaikutus. Näin asiakkailla olisi motivaatiota parantaa kaukolämpölaitteitaan, ja pyrkimään parempaan jäähtymään laitteissansa. Jäähtymä hyvityksen arvo määräytyisi alla näkyvän kaavan 2 mukaan. (Pöyry 2010, 11-13)

$$H_{\text{jäähtymä}} = k \cdot \emptyset_{\text{jäähtymä}} \quad (2)$$

missä

$H_{\text{jäähtymä}}$ on jäähtymä hyvityksen määrä [€]

k on jäähtymän arvo [€/MWh]

$\emptyset_{\text{jäähtymä}}$ on jäähditysenergia [MWh]

Kaavassa käytössä oleva jäähtymä määräytyy alla näkyvän kaavan 3 mukaisesti. Jäähtymätermin määrittämiseen pitää olla sovittuna referenssilämpötila, joka määrittää jäähtymähyvityksen nollatason, joka voidaan valita vaikka tuotantolaitoksella mitatun keskimääräisen paluuveden lämpötilan mukaan.

$$\emptyset_{\text{jäähtymä}} = q_{m,kl} (T_{\text{referenssi}} - T_{\text{paluu,mitattu}}) \quad (3)$$

missä

$q_{m,kl}$ on mitattu kaukolämmön massavirta [kg/s]

$T_{\text{referenssi}}$ on sovittu paluulämmön referenssilämpötila [°C]

$T_{\text{paluu, mitattu}}$ on mitattu paluuveden lämpötila [°C]

3.6 Lämpöhäviöt kaukolämpöverkossa

Kaukolämmön jakelukustannuksista merkittävin on lämpöhäviöt. Lämpöhäviöt johtuvat yleensä liian korkeasta käyttölämpötilasta, liian ohuesta tai vanhentuneesta eristyksestä, ylimitoitetusta putkistosta, maaperän suuresta lämmönjohtavuudesta, vuotovesistä ja lämmön mittausepä tarkkuuksista, jotka luokitellaan häviöiksi. Verkon käyttölämpötila säädetään ulkolämpötilan mukaan alhaisimmaksi mahdolliseksi, jolla asiakkaat saavat tarvitsemansa lämpötehon. Uusien asiakkaiden myötä verkon kuormitusaste kasvaa, ja verkon hyötysuhde paranee. Vuotovedet pumpataan pois, vuotokohtat korjataan ja mineraalieristeet kuivataan. Suurin osa lämpöhäviöistä pystytään torjumaan mainituilla toimenpiteillä. Olemassa olevan verkon lämpöhäviöitä, jotka eivät poistu mainituilla keinoilla, on pienennettävä muilla keinoilla kuin eristeiden lisäämisellä kyseisen toimenpiteen erittäin korkeista kustannuksista johtuen. Verkoston lämpöhäviöiden suuruus voidaan arvioida vertaamalla tuotetun tai ostetun lämmön määrää myytyyn lämmön määrään. Tarkempaan lämpöhäviöiden määrittämiseen pitää tuntea kaukolämpöverkko, sen johtojen ominaisuudet sekä ympäröivän ympäristön olosuhteet. (Koskelainen ym. 2006, 209)

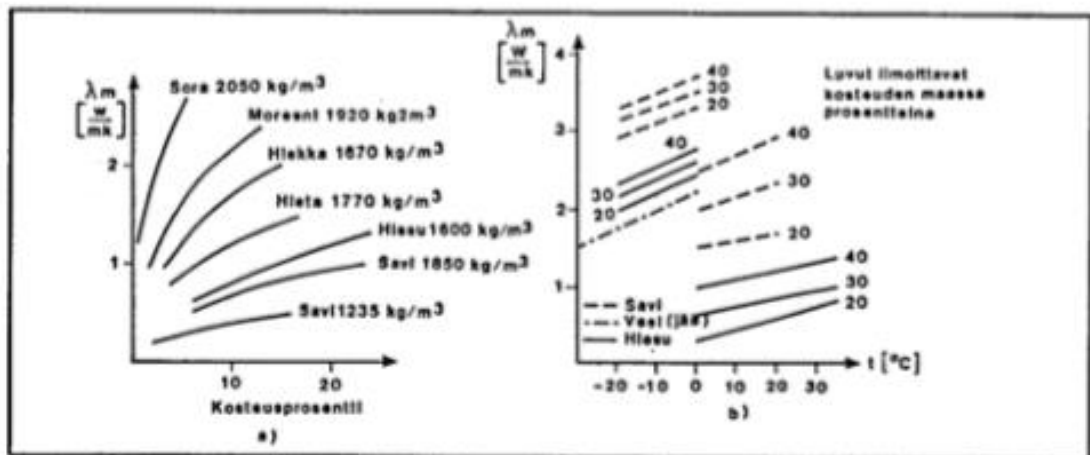
Lämpöhäviöiden suhteellinen suuruusero eri kokoisissa kaukolämpöjohdoissa johtuu eri kokoisesta vaippapinta-alasta johdon siirtokykyyn suhteutettuna. Pienten putkikokojen lämpöhäviöt ovat 10 – 20 %, ja suurten noin 4 – 10 %. Lämpöhäviö syntyy lämmön johtumisesta maaperään ja edelleen ympäristöön. Kuitenkin osa menoveden lämpöenergiasta johtuu paluuveteen, joka ei mene hukkaan vaan pysyy järjestelmässä. Kaukolämpöjohdot eristetään nykyään polyuretaanilla. Käytössä on kuitenkin vielä myös vanhoja kaukolämpöjohtoja, jotka ovat eristetty mineraalivillalla. Eristyksen lämmönjohtavuus voidaan laskea alla näkyvällä kaavalla 4. (Koskelainen ym. 2006, 203)

$$\lambda_i = \lambda_{60} + \lambda_{ikä} + \lambda_{kost} + \lambda_{konv} \quad (4)$$

missä

λ_i	on eristyksen lämmön johtavuus	$[W/(K \cdot m)]$
$\lambda_{ikä}$	on eristeen käyttöiän vaikutus lämmönjohtavuuteen	$[W/(K \cdot m)]$
λ_{kost}	on kosteuden aiheuttama muutos	$[W/(K \cdot m)]$
λ_{konv}	on konvektiovirtausten aiheuttama lisäys	$[W/(K \cdot m)]$
λ_{60}	on eristeen keskimääräinen lämmönjohtavuus 60 °C lämpötilassa	$[W/(K \cdot m)]$

Maaperän lämmönjohtavuus riippuu maaperän laadusta ja kosteudesta, jonka lämmönjohtavuus vaihtelee alla näkyvän kuvan 9 osoittamalla tavalla. (Koskelainen ym. 2006, 203)



Kuva 9. Maaperän lämmönjohtavuuden vaihtelu (Koskelainen ym. 2006, 203)

3.6.1 Lämpöhäviöiden määrittäminen

Lämpöhäviöiden määrittäminen tapahtuu seuraavalla tavalla:

Ensin on laskettava lämmönsiirtokertoimet K_1 ja K_2 kaavoilla 5 ja 6. (Koskelainen ym. 2006, 205)

$$K_1 = \frac{R_g + R_i}{(R_g + R_i)^2 - R_m^2} \quad (5)$$

ja

$$K_2 = \frac{R_m}{(R_g + R_i)^2 - R_m^2} \quad (6)$$

missä

R_g on maaperän lämpövastus

R_i on eristeen ja vaipan lämpövastus

R_m on putkien keskinäisen vaikutuksen huomioiva lämpövastus

Yhtälöissä tarvittava maaperän lämpövastus lasketaan alla näkyvällä kaavalla 7.

$$R_g = \frac{1}{2\pi\lambda_g} \ln\left(\frac{4H}{D_c}\right) \quad (7)$$

missä

R_g on maaperän lämpövastus

λ_g on maaperän lämmönjohtavuus [W/mK]

H on putken korjattu sijaintisyvyys [m]

D_c on putken kuoren halkaisija [m]

Putken korjattu sijaintisyvyys tarkoittaa lasketaan muuttamalla maanpinnan lämpövastus ekvivalenteiksi maakerrokseksi ja lisäämällä se putken todelliseen sijaintisyvyyteen. Tämä lasketaan alla näkyvällä kaavalla 8.

$$H = H' + \frac{\lambda_g}{\alpha_{gs}} \quad (8)$$

missä

H	on putken korjattu sijaintisyvyys	[m]
H'	on putken todellinen syvyys	[m]
λ_g	on maaperän lämmönjohtavuus	[W/mK]
α_{gs}	on maanpinnan lämmön siirtokerroin	[W/m ² K]

Eristeen ja vaipan lämpövastus lasketaan kaavalla 9.

$$R_i = \frac{1}{2\pi\lambda_i} \ln \frac{D_i}{D_p} + \frac{1}{2\pi\lambda_c} \ln \frac{D_c}{D_i} + R_{hi} \quad (9)$$

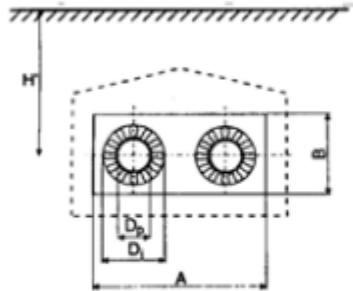
missä

λ_i	on eristeen lämmönjohtavuus	[W/mK]
D_i	on eristeen ulkohalkaisija	[m]
D_p	on putken ulkohalkaisija	[m]
λ_c	on kuoren lämmönjohtavuus	[W/mK]
R_{hi}	on lämpövastus eristeen pinnalla betonikanavassa, jossa on ilmatila	[mK/W]

Betonielementtikanavan lämpövastukset lasketaan eri tavalla kuin kiinnivaahdotettujen kaukolämpöputkien lämpövastukset. Kuvasta 10 nähdään

poikkileikkaus kaukolämpöjohtojen päätyyppeihin, ja niiden lämpövastuksien laskentakaavat.

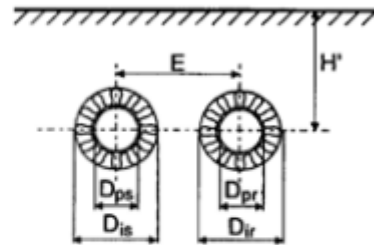
Betonikanava ja putkien ympärillä mineraalivillaeriste



$$D_c = \frac{2.2 \cdot A \cdot B}{A + B} \quad h_s = 7.7 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

$$R_{hi} = \frac{1}{\pi D_i h_s} \quad R_{hg} = \frac{1}{2(A+B) \cdot h_s} \quad R_m = R_g$$

Kiinnivaahdotetut putket



$$D_c = D_i \quad R_{hg} = R_{hi} = 0$$

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

Kuva 10. Läpileikkauskuvat ja laskentayhtälöt erilaisten kaukolämpöjohtojen lämpövastuksille (Koskelainen ym. 2006, 207)

Jos kaukolämpöjohdot ovat symmetriset, seuraavaksi voi laskea lämpöhäviöt meno- ja paluujohdolle sekä johdon kokonaislämpöhäviön seuraavien kaavojen 10, 11 ja 12 mukaan. (Koskelainen ym. 2006, 204)

$$\Phi'_m = K_{1m}(T_m - T_g) - K_{2m}(T_m - T_g) \quad (10)$$

$$\Phi'_p = K_{1p}(T_p - T_g) - K_{2p}(T_m - T_g) \quad (11)$$

$$\Phi'_{tot} = \Phi'_m + \Phi'_p = 2(k_1 - k_2) \left[\frac{T_m - T_p}{2} - T_g \right] \quad (12)$$

missä

Φ'_{tot} on lämpöhäviöteho [W/m]

k_1 ja k_2 ovat lämmönläpäisylukuja [W/mK]

T_m	on menolämpötila	[K]
T_p	on paluulämpötila	[K]
T_g	on maaperän lämpötila	[K]
Φ'_m	on menoputken lämpöhäviö	[W]
Φ'_p	on paluuputken lämpöhäviö	[W]

Lopuksi lasketaan vielä lämpöenergian siirtyminen menovedestä paluuveteen kaavalla 13.

$$R_{\text{kesk}} = \frac{1}{4\pi\lambda_g} \ln\left(1 + \left(\frac{2H}{E}\right)^2\right) \quad (13)$$

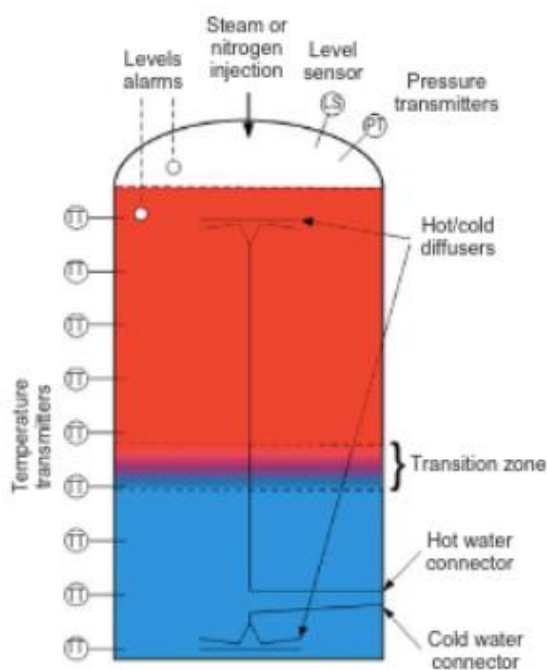
missä

R_{kesk}	on siirtynyt lämpöenergia	[W]
λ_g	on maaperän lämmönjohtavuus	[W/mK]
H	on putken korjattu sijaintisyvyys	[m]
E	on etäisyys putkien välillä	[m]

3.7 Lämmön varastointi

Nykyaikaisessa kaukolämpöjärjestelmässä on käytössä lämpövarastot, joihin lämpöenergiaa varastoidaan, kun sen tuotanto on edullista tai järjestelmällä on ylituotantoa. Lämmön varastointiin on useita erilaisia toteutustapoja. Kaukolämpöjärjestelmissä lämmönvarastointi on yleensä toteutettu kuvan 11 mukaisissa suurissa vesisäiliöissä, jotka ovat toisioverkossa kaukolämpöverkon suhteen. Säiliössä on vettä eri lämpötiloissa sekoittumatta, joka mahdollistaa varaston energiasisällön muuttumisen veden määrän pysyessä samana. Kuuma

vesi pysyy säiliön yläosassa ja kylmä säiliön pohjalla, koska kuuman veden tiheys on pienempi kuin kylmän veden tiheys. Kuuman ja kylmän veden välillä on niin sanottu siirtymävyöhyke, jossa veden lämpötila vaihtelee. Lämpövarasto latautuu, kun kaukolämpöverkosta siirretään lämpöenergiaa varastoon, ja vastaavasti lämpövarasto tyhjenee, kun kaukolämpöverkko ottaa lämpöenergiaa varastosta. (Wiltshire 2016, 145-149)



Kuva 11. Lämpövarasto (Wiltshire 2016, 148)

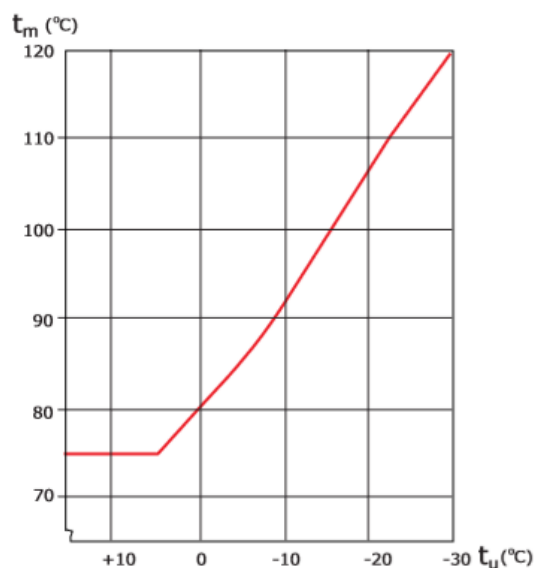
Lämpövarastoilla saavutetaan monia hyötyjä kaukolämpöjärjestelmässä. Vastapainevoimalaitoksella sähkön hinnan ollessa korkea, voidaan tuottaa enemmän sähköä, jolloin myös lämmöntuotanto lisääntyy. Jos lämmöntuotanto ylittää järjestelmän tarpeen, voidaan yli menevä lämpö varastoida myöhempää käyttöä varten. Aikana jolloin sähkön hinta on alhainen, kuten yöllä, kannattaa sähköntuotanto minimoida, jonka seurauksena myös lämmöntuotanto vähenee, jolloin mahdollinen lämmöntuotannon vaje voidaan tuottaa lämpövarastosta. Kesäaikaan, kun hukkalämpöä on paljon, sitä voidaan varastoida syksyä ja talvea

varten lämpövarastoon. Lämpövarastoa hyödyntämällä, voidaan säätää ja optimoida lämmön tuottoa järjestelmässä, ja vähentää fossiilisten polttoaineiden polttoa.

3.8 Kaukolämpöveden lämpötilan vaikutus kaukolämpöverkossa

Kaukolämmön menoveden lämpötilan säätö perustuu kaukolämpöverkon energiataseeseen. Kaukolämmön menoveden lämpötilan säätö optimaaliseksi on tärkeää, koska sillä on vaikutusta kaikkiin kaukolämpöverkon osiin. Kaavasta 1 on nähtävissä, että jos asiakkaan lämmöntarve pysyy samana, ja menoveden lämpötilaa lasketaan, on menoveden virtausta lisättävä saman lämpötehon saavuttamiseksi. Menoveden lämpötilaa nostamalla, virtausta voidaan laskea saman lämpötehon saavuttamiseksi. Kaukolämpöveden lämpötilaerolla asiakkaan lämmönjakokeskuksen yli, ja kaukolämpöveden virtauksella on siis kääntäen verrannollinen suhde keskenään.

Menoveden lämpötilaa säädetään ulkolämpötilan mukaan kuvan 12 osoittamalla tavalla. Menoveden lämpötilan säätö tapahtuu lämmöntuotantolaitoksella erillisessä sekoituspiirissä. Haluttua lämpötilaa voidaan ylläpitää pumppausta säätämällä. Menoveden lämpötilan alaraja määräytyy asiakkaiden kaukolämpölaitteiden mitoituksesta, lämpöhäviöistä, käyttöveden lämmityksen mitoituksen riittävydestä ja verkon siirtokyvystä, eli vesivirran nostomahdollisuuden rajallisuudesta. Menoveden lämpötilan yläraja määräytyy pääasiassa verkon suunnittelulämpötilan mukaan, mutta myös lämpöhäviöiden minimoimiseksi lämpötila halutaan pitää mahdollisimman alhaalla, ja yhdistetyn sähkön ja lämmöntuotantolaitoksilla sähköntuotanto on korkeampi, kun kaukolämmön menolämpötila on alhaisempi. (Koskelainen ym. 2006, 335-336)



Kuva 12. Kaukolämpöverkon lämpötilan ja ulkoilmanlämpötilan välinen riippuvuus. (Koskelainen ym. 2006, 336)

Kaukolämmön asiakkaiden lämmönjakokeskusten mitoitustulolämpötila on mitoitettu 115 Celsius asteeseen, joka kuitenkin toteutuu harvoin, koska ulkolämpötilat harvoin laskevat niin alas, että mitoitustulolämpötila olisi tarpeen (Afrý 2020, 14).

3.8.1 Kaukolämpöveden lämpötilan vaikutus verkon lämpöhäviöihin

Lämpöhäviöt verkostossa tapahtuvat pääasiassa johtumalla. Lämmönjohtumisen määrä on suoraan verrannollinen lämpötilaeroon kahden kappaleen välillä eli tässä tapauksessa virtaavan veden ja maaperän välillä. Maaperän lämpötila pysyy lähes samana ympäri vuoden, joten lämpöhäviöiden määrä riippuu kaukolämpöveden lämpötilasta sekä kaukolämpöputkissa käytetyistä lämmöneristyksistä. Lämpöhäviötä tapahtuu sekä menovesiputkesta että paluuvesiputkesta. Oletuksena on, että lämpöhäviöistä noin kaksi kolmasosaa häviää menovedestä ja yksi kolmasosa paluuedestä. (Koskelainen ym. 2006, 204)

Lämpöhäviöitä voi vähentää laskemalla tuotantolaitokselta lähtevän menoveden lämpötilaa. Kuten kaavalla 1 todettiin, että menoveden lämpötilaa laskettaessa on kaukolämpöveden virtausta nostettava. Virtauksen nostaminen aiheuttaa painehäviöiden kasvua verkostossa, eli rajoittavana tekijänä menolämpötilan laskemiselle on painehäviöiden kasvu niin suureksi, että kaukolämpöpumput eivät pysty pumppaan enää suurempaa painetta tai verkon rakennepaine ei sitä salli. (Pöyry 2018, 13) Lämpöhäviöistä johtuen menoveden lämpötila on sitä alhaisempi mitä kauempana ollaan tuotantolaitoksesta. Tästä syystä menoveden lämpötila pitää säätää verkostossa kauimpana tuotantolaitosta olevien asiakkaiden mukaan. Koska kesäaikana lämmöntarve asiakkailla on yleensä pelkästään käyttöveden lemmitykseen, aiheuttaa se veden seisomista kaukolämpöverkossa, joka lisää lämpöhäviöitä.

Lämpöhäviöitä voidaan vähentää myös laskemalla paluuveden lämpötilaa, joka samalla nostaa lämpötilaeroa meno- ja paluuesijohtojen välillä. Lämpötilaeron kasvaessa on sillä myös pumppauksen tarvetta vähentävä vaikutus.

3.8.2 Kaukolämpöveden lämpötilan vaikutus pumppaukseen

Kaukolämmön menoveden lämpötila on kääntäen verrannollinen kaukolämmön vesivirtaan. Kuten kaava 1. osoittaa, on kaukolämpöveden lämpötilalla vaikutus pumppaukseen, ja siten pumppujen sähkön kulutukseen. Pumppujen sähkön tarve voidaan laskea alla näkyvän kaavan 14 avulla. (Koskelainen ym. 2006, 170)

$$P_{el} = \frac{q_{m,kl} \cdot g \cdot H}{\eta} \quad (14)$$

missä

P_{el} on pumpun sähköteho [W]

$q_{m,kl}$ on kaukolämpöveden massavirta [Kg/s]

g on putoamiskiihtyvyys [9,81 m/s²]

H on pumpun nostokorkeus [m]

η on pumpun hyötysuhde

Tilavuusvirran noustessa nousee kaukolämpöputkissa virtaavan veden nopeus, joka kasvattaa painehäviötä putkistossa. Painehäviöiden noustessa pumpuilta vaaditaan enemmän nostokorkeutta. Nostokorkeuden kasvun vaatimus on yksilöllistä jokaisessa kaukolämpöverkossa. (Energiateollisuus 2011, 6)

Painehäviöt sekä korkeuserot määrittävät kaukolämpöjärjestelmän pumppauksen tarpeen. Kaukolämpöjärjestelmän putket mitoitetaan tyypillisesti painehäviöiden mukaan. Eri kokoisille kaukolämpöjohdoille on määritetty sallitut painehäviöt kilometriä kohti. (Koskelainen ym. 2006, 155.) Painehäviöt koostuvat kertavastuksista ja kitkasta. Veden virtaus putkessa aiheuttaa kitkaa, josta syntyy painehäviötä. Kitkan aiheuttaman painehäviön voi laskea alla näkyvällä kaavalla 15. (Koskelainen ym. 2006, 199)

$$\Delta_{pV} = \mu \frac{L}{d_s} \frac{\rho w^2}{2} = \mu \frac{8L}{d_s^5} \frac{\rho Q^2}{\pi^2} = \mu \frac{8L}{d_s^5} \frac{\dot{m}^2}{\pi^2 \rho} \quad (15)$$

missä

Δ_{pV} on painehäviö [Pa]

μ on kitkakerroin

ρ on veden tiheys [kg/m³]

w on virtausnopeus [m/s]

L on putken pituus [m]

d_s on putken sisähalkaisija [m]

Q on tilavuusvirta [m³/s]

\dot{m} on massavirta [kg/s]

Kertausvastusta syntyy kaukolämpöverkostossa risteymäkohtien, mutkien, lämmönsiirrinten ja venttiilien aiheuttamasta vastuksesta virtaukselle.

Kertavastuksen aiheuttaman painehäviön voi laskea alla näkyvällä kaavalla 16. (Koskelainen ym. 2006, 202)

$$\Delta p_k = \zeta \frac{\rho w^2}{2} = \zeta \frac{8\rho Q^2}{\pi^2 d_s^4} \quad (16)$$

missä

Δp_k	on painehäviö	[Pa]
ζ	on kertavastusluku	
ρ	on veden tiheys	[kg/m ³]
w	on virtausnopeus	[m/s]
d_s	on putken sisähalkaisija	[m]
Q	on tilavuusvirta	[m ³ /s]

Kokonaispainehäviö saadaan laskemalla yhteen kertavastushäviöt ja kitkahäviöt verkostossa alla näkyvällä kaavalla 17. (Koskelainen ym. 2006, 202)

$$\Delta p = \Delta p_v + \Delta p_k \quad (17)$$

missä

Δp	on kokonaispainehäviö	[Pa]
Δp_v	on kitkan aiheuttama painehäviö	[Pa]
Δp_k	on kertavastuksen aiheuttama painehäviö	[Pa]

Painehäviö on likimain verrannollinen virtauksen määrän toiseen potenssiin. Jos tunnetaan painehäviöt jollakin tilavuusvirralla, saadaan painehäviö laskettua myös muilla tilavuusvirroilla kaavalla 18. (Koskelainen ym. 2006, 202)

$$\frac{\Delta p_1}{\Delta p_2} = \left(\frac{Q_1}{Q_2}\right)^2 \quad (18)$$

missä

Δp	on kokonaispainehäviö	[Pa]
Q	on tilavuusvirta	[m ³ /s]

Edellä esitetyt kaavat todistavat, että virtauksen nopeuden kasvaessa painehäviöt kasvavat putkistossa, ja siten pumppauksen määrää on lisättävä. Kaukolämmön myyjä ei voi virtauksen nopeutta suoraan määrittää, vaan sen määrää asiakkaiden säätölaitteet. Kaukolämmön myyjä voi kuitenkin epäsuorasti vaikuttaa virtaukseen putkien koon valitsemisella ja kaukolämpöveden lämpötilan säädöllä. Mitä suuremmat halkaisijat putkissa ovat tai mitä korkeampi veden lämpötila on, sitä hitaammin vesi virtaa putkistossa, ja painehäviöt ovat matalammat. Kaukolämpöjohtoja ei kannata mitoittaa liian suuriksi, koska liian hitaasti virtaava vesi lisää suhteellista lämpöhäviötä. Myös liian korkea veden lämpötila lisää lämpöhäviötä.

Menoveden lämpötilaa optimoidessa huomio kiinnittyy pumppauksen osalta sen kustannuksiin. Pumppauksen kustannus riippuu siitä, missä pumppu sijaitsee. Jos pumppu sijaitsee sähkön ja lämmön yhteistuotantolaitoksella, on sen käyttämä sähkö edullisempaa, koska silloin pumpun käyttämä sähkö on omatuotantosähköä, ja sen hinta on sähkönmarkkinahinta. Jos pumppu sijaitsee CHP-laitoksen ulkopuolella esimerkiksi välipumppaamossa, koostuu sähkön hinta markkinahinnan lisäksi veroista ja sähkön siirtomaksusta, jolloin se on kalliimpaa. Pumppauksen kustannus voidaan laskea alla näkyvällä kaavalla 19.

$$K_{\text{pump}} = \frac{K_{\text{sähk}}}{\eta_{\text{pump.ulk}}} - K_{\text{kl}} \quad (19)$$

missä

K_{pump} on pumppauksen kustannus huomioiden menolämpötila [€/MWh]

$K_{\text{sähk}}$ on pumpun sähkön käytön hinta [€/MWh]

$\eta_{\text{pump.ulk}}$ on pumpun hyötysuhde, ulkoiset häviöt vähennettynä

K_{kl} on kaukolämmön kustannus [€/MWh]

Jos kaukolämpöverkkoon tehdään lämpötilamuutoksia, saman kaukolämpötehon syöttämiseen pätee alla näkyvä kaava 20.

$$P_{kl} = Q_1 \rho_1 c_{p1} \Delta T_1 = Q_2 \rho_2 c_{p2} \Delta T_2 \quad (20)$$

missä

P_{kl} on kaukolämpöteho [W]

c_p on kaukolämpöveden ominaislämpökapasiteetti [kJ/kgK]

ΔT on meno- ja paluuvien lämpötilaero [K]

Kaavasta voidaan johtaa kaava 21, joka osoittaa lämpötilaeron ja tilavuusvirran välisen yhteyden.

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} \quad (21)$$

Pumppaustekniikan perusteista voidaan johtaa keskipakopumpun kierrosluvun muutoksen vaikutuksen tehon tarpeeseen, nostokorkeuteen ja tilavuusvesivirtaan. Kyseisiä yhtälöitä kutsutaan affiniteettisäännöiksi. Kaava 22 osoittaa tilavuusvirran riippuvuuden pyörimisnopeudesta ja kaava 23 tehon riippuvuuden pyörimisnopeudesta. (Koskelainen ym. 2006, 171)

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2} \quad (22)$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^3 \quad (23)$$

missä

Q on tilavuusvirta [m³/h]

n on pyörimisnopeus [r/s]

P on pumppausteho [W]

Kaukolämpöveden lämpötilan muutostilanteessa kaukolämmön pumppauksen tehon tarve saadaan johdettua kaavaan 24.

$$P_2 = P_1 \left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} \right)^3 \quad (24)$$

missä

P_1 on pumppausteho ennen muutosta [W]

P_2 on pumppausteho muutoksen jälkeen [W]

ΔT_1 on meno- ja paluueden lämpötilaero ennen muutosta [K]

ΔT_2 on meno- ja paluueden lämpötilaero muutoksen jälkeen [K]

Kaavat todistavat, että jos lämpötilaeroa saadaan kasvatettua, saadaan säästöjä pumppauksen tarpeen vähentyessä. Säästöjen suuruus on yksilöllistä jokaisessa kaukolämpöverkossa. Lämpötilaeroa kannattaa suurentaa enemmän paluueden lämpötilan alentamisella kuin menolämpötilan nostamisella, koska paluueden lämpötilaa laskemalla myös lämpöhäviöt pienevät.

3.8.3 Kaukolämpöveden lämpötilan vaikutus vastapainesähköntuotantoon

Vastapainevoimalaitoksella tuotetaan sekä sähköä että kaukolämpöä. Voimalaitoksen prosessissa höyryn paisunta katkaistaan korkeammassa paineessa eli niin sanotussa vastapaineessa, eikä anneta paisua lauhduttimen alipaineeseen saakka. Vastapainevoimalaitoksen teknistä tasoa mitataan useammalla karakteristikalla eli teknisellä ominaiskäyrällä, koska vastapainevoimalaitoksella tuotetaan kahta tuotetta. Rakennussuhde, joka tarkoittaa tuotetun sähköenergian ja kaukolämmön suhdetta vastapainelaitoksella, lasketaan kaavalla 25. (Koskelainen ym. 2006, 295)

$$r = \frac{P}{\Phi_{kl}} \quad (25)$$

missä

r on rakennussuhde

P on sähköteho [W]

Φ_{kl} on kaukolämpöteho [W]

Jos kaukolämmön menolämpötilaa säädetään turbiinin jälkeisellä lämmönvaihtimella, on sillä vaikutus vastavoimalaitoksen rakennussuhteeseen, ja siten korkeampi kaukolämmön menoveden lämpötila johtaa pienempään sähköntuotantoon.

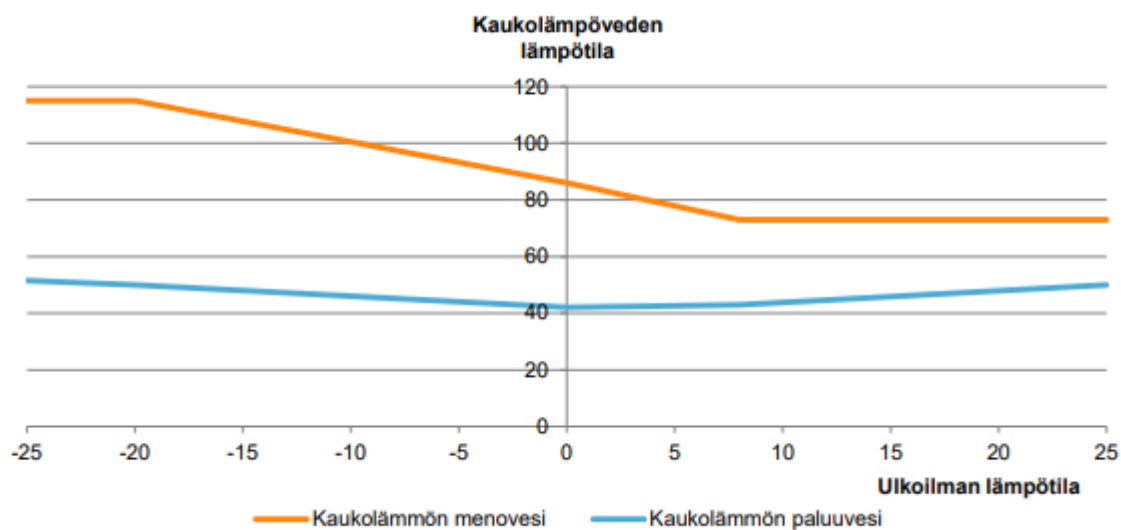
Sähkön ja lämmönyhteistuotantolaitoksella, jossa kaukolämpö lämmitetään kahdessa vaiheessa ensin vastapaineisella höyryllä ja sitten turbiinin väliottohöyryllä, on kaukolämpöverkon paluueden lämpötilan alentamisella sähköntuotantoa lisäävä vaikutus. Matalampi paluueden lämpötila alentaa vastapainelämmönsiirtimen jälkeistä kaukolämpöveden lämpötilaa, joka johtaa pienempään vastapaineeseen, joten höyry paisuu turbiinissa pidemmälle, ja sähköntuotanto lisääntyy. Paluueden lämpötilan laskiessa sähköntuotantoteho kasvaa 0,1 % laskenutta lämpötila-astetta kohti. On huomioitava, että lisääntynyt sähköteho vähentää yhteistuotantolaitoksen lämpötehoa, ja laitoksen käydessä täydellä teholla, on laskenut lämpöteho tuotettava kaukolämpöjärjestelmään huipputeholaitoksella, jossa lämmön tuotannon hinta on lähellä sähkön hintaa, ja rahallinen hyöty jää lähes olemattomaksi. (Pöyry 2010, 8)

Kaukolämpöjärjestelmässä, jossa on sähkön ja lämmön yhteistuotantolaitos, jossa on lämpöä talteen ottava savukaasupesuri, savukaasupesurin lämmön talteenottoteho lämmittää vastapaineeseen virtaavaa kaukolämmön paluuvettä tehonsa verran. Yleensä kaukolämmön paluueden virtaus on niin suuri, että savukaasupesurin lämmön talteenottoteho ei riitä lämmittämään paluuvettä yhtä

paljon, kuin sen lämpötilaa on laskettu lämpöpumpulla tai muulla ratkaisulla. Tällaisessa ratkaisussa sähköntuotanto ei lisääny koko 0,1 % laskenutta astetta kohden, mutta järjestelmä hyötyy myös lisääntyneestä lämpötehosta. (Pöyry 2010, 8)

3.8.4 Menoveden vaikutus paluueden lämpötilaan

Paluueden lämpötila määräytyy sen mukaan paljonko kaukolämmön lämpötila laskee asiakkaan lämmönvaihtimissa, johon vaikuttaa asiakkaan tehon tarve ja käyttöveden kulutus, jotka vaihtelevat paljon asiakaskohtaisesti. Tästä syystä menolämpötilan vaikutusta paluulämpötilaan on vaikea arvioida tarkasti. (Mäkelä ym. 2015, 108) Kuva 13 kuvaa kaukolämmön meno- ja paluueden tyypillisiä lämpötiloja eri ulkolämpötiloilla. Kuten kaava 1. osoittaa menoveden lämpötilaa laskettaessa, on kaukolämpöveden virtausta lisättävä saman kaukolämpötehon saavuttamiseksi. Kun kaukolämpöveden virtausta lisätään, veden jäähtymä asiakkaan lämmönsiirtimissä laskee, joten paluueden lämpötila nousee. Liian korkea paluueden lämpötila aiheuttaa haittoja järjestelmässä tuotantolaitoksilla, jossa liian korkea paluueden lämpötilaa joudutaan lauhduttamaan. Jos voimalaitoksella on lämpöä talteen ottava savukaasupesuri, myös sen hyötysuhde huononee. (Energiateollisuus 2014, 22)



Kuva 13. Tyypillinen kaukolämpöverkon lämpötila ulkolämpötilan funktiona (Pöyry 2018, 13)

Järjestelmän tehokkuuden suhteen on ositettu, että suuri meno- ja paluueden lämpötilaero vähentää energia- ja ylijäämähäviöitä ja, että meno- ja paluulämpötilojen alentaminen lisää järjestelmän kokonaistehokkuutta. (Gadd & Werner 2014, 16)

4 PALUUVEDEN LÄMPÖENERGIAN HYÖDYNTÄMINEN JA SIITÄ SAATAVIEN HYÖTYJEN MÄÄRITYS

Kaukolämmön menoveden lämpötila vaihtelee ulkolämpötilan mukaan tyypillisesti lämpötilassa 80 - 100 °C, jollaisena se toimitetaan asiakkaille. Esimerkiksi maalämpöön verrattuna kaukolämpö on siten parempaa energiaa. Asiakas ei ole kuitenkaan kiinnostunut siitä, kuinka lämpimänä energia hänelle toimitetaan, vaan on tyytyväinen kunhan huoneistossa on mukava lämpötila ja käyttövesi on tarpeeksi kuumaa.

Nykyään on kasvavissa määrin niin sanottuja matalan lämpötilan kiinteistöjä, eli esimerkiksi kiinteistöjä, joiden lämmitys tapahtuu lattialämmityksenä. Tällaisiin kiinteistöihin kaukolämmön menovesi on turhankin hyvää ja arvokasta, joka johtaa tilanteeseen, missä kaukolämmön on vaikea kilpailla maalämmön kanssa kustannustehokkuudesta. Ratkaisuna tähän kaukolämpöyhtiöt voivat myydä paluuedestä lämmityksen matalan lämpötilan kohteisiin. Johtuen paluueden hyödyntämisestä saatavista hyödyistä kaukolämpöjärjestelmälle paluueden arvo ei ole niin korkea kuin menoveden, ja se soveltuu hyvin tällaisten kohteiden lämmitykseen, ja kaukolämmön kilpailuasema paranee.

Paluueden lämpötila ei ole kuitenkaan yleensä riittävän korkea käyttöveden lämmitykseen, mutta sen lämpötilaa voidaan nostaa esimerkiksi lämpöpumppukytkennällä. Kiinteistöjen lämmittäminen paluuedellä alentaa paluueden lämpötilaa, josta on monia hyötyjä kaukolämpöjärjestelmälle. (Pöyry 2010, 7)

Tässä luvussa määritetään kaukolämmön paluueden jäähdyttämisen hyödyt, esitetään savukaasupesurin ja lämpöpumpun toiminta sekä esitetään ratkaisuja, joilla kaukolämmön paluuvettä hyödynnetään. Tässä luvussa jäähtymästä puhuttaessa tarkoitetaan paluuvettä jäähdyttävää energiamäärää vastaavaa

rahallista hyötyä. Paluuveden yhden celsiusasteen jäähtymään tarvittava energia voidaan laskea kaavalla 26.

$$E_{\circ C} = \dot{m}_{klv} c_p t \quad (26)$$

missä

$E_{\circ C}$ on yhden asteen jäähtymään tarvittava lämpöenergia [Wh]

\dot{m}_{klv} on kaukolämpöveden keskimääräinen massavirta [kg/h]
vuodessa

c_p on veden ominaislämpökapasiteetti [kJ/kgK]

t on aika [h]

Kun yhden asteen jäähtymään tarvittava lämpöenergia tiedetään, niin voidaan laskea jäähtymätermi kaavalla 27.

$$J = \frac{S_{\circ C}}{E_{\circ C}} \quad (27)$$

missä

J on jäähtymätermi [€/Wh]

$S_{\circ C}$ on yhden asteen jäähtymästä saatava rahallinen hyöty [€/°C]

Paluuveden lämpötilaa alentamalla on mahdollista saada monia hyötyjä. Hyödyt ovat erittäin riippuvaisia kaukolämmön tuotantomuodoista, ja niiden painotuksesta verkossa. Jokaiselle kaukolämpöverkolle pitää siis määrittää saadut hyödyt erikseen. Hyödyt riippuvat tuotetaanko kaukolämpöä lämpökeskuksessa vai sähkön ja lämmön yhteistuotantolaitoksella, ja onko lämmöntuotantolaitoksilla lämpöä talteen ottava savukaasupesuri vai ei. Jos kaukolämpöverkossa on liitettyä lämpövarasto, silläkin on merkitystä saataviin

hyötyihin. Paluueden jäähdyttämisen hyöty lasketaan jäähtynyttä energiayksikköä kohti. (Pöyry 2010, 8)

Tärkeää on huomioida, että kaukolämpöjärjestelmää ajetaan teho tai massavirta edellä, ja vasta toisena asiana huomio kiinnittyy veden lämpötilaan. Suuria lämpötilamuutoksia kaukolämpöveden lämpötilaan ei kannata tehdä, eikä muutoksia kannata tehdä lyhyelle aikavälille. Muutoksilla tulee tähdätä rauhallisesti ja ennakoivasti. Koko vuoden keskimääräisiä lämpötiloja hieman laskemalla saadaan lämpöhäviöitä hieman vähennettyä. (Hillamo 2019)

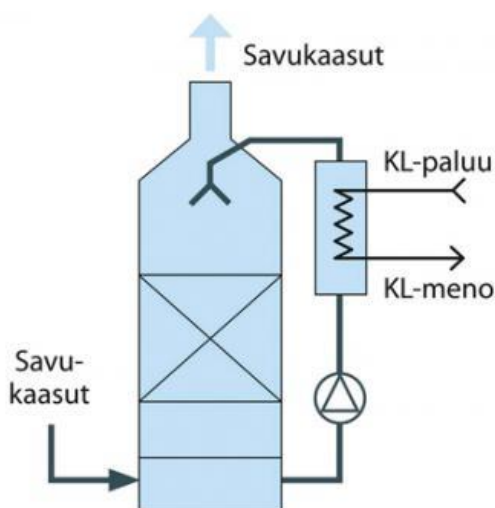
Asiakkaiden kaukolämpölaitteet ovat mitoitettu aikaisemmin työssä mainitulla tavalla, ja ottavat talteen aina tarvitsemansa tehon. Tästä johtuen, jos kaukolämmön menolämpötilaa muuttaa, muuttuu myös virtaus, ja siten verkon siirtokapasiteetti. Asiakkaan laitteiden vaatiessa lisää virtausta, vaatii verkko lisää pumppausta, joka lisää sähkön kulutusta. Pumppaukseen käytetty sähkö ei mene kuitenkaan hukkaan, vaan muuttuu painehäviöiden myötä lämmöksi verkostossa. Kaukolämpöverkon lämpötiloja optimoidessa ei kannata keskittyä pumppauksen minimointiin, jos muita hyötyjä pystytään saavuttamaan. (Hillamo 2019)

4.1 Savukaasupesuri

Savukaasupesuri on laite, jonka tarkoitus on puhdistaa palamisen tuloksena syntyneitä savukaasuja. Yleensä epäpuhtauksia, joita savukaasupesuri erottelee ovat rikkidioksidi (SO_2) ja vetykloridi (HCl) sekä raskasmetallit ja hiukkaset. Savukaasuissa on epäpuhtauksien lisäksi paljon lämpöenergiaa, jota nykyään savukaasupesurit yleensä ottavat talteen lämmönvaihtimia hyödyntämällä. Rakenteeltaan savukaasupesuri on torni, jonka alapäädystä ajetaan savukaasut sisään, ja pesurin kiertovesi ajetaan pesurista ulos. Tornin yläpäädyssä on suihkuttimet, joista kiertovesi suihkutetaan pesuriin sisään. Pesurin yläpäässä on myös savupiippu, josta puhdistetut savukaasut ajetaan ulos. Lämpöenergiaa talteen ottavassa savukaasupesurissa, suihkuttimet ovat vähintään kahdessa tasossa. Tällaisessa savukaasupesurissa suihkuttimien alla on täytekappaleita

lämmönsiirtopinta-alan lisäämiseksi. (Pöyry 2016, 2) Kuvassa 14 on esitetty, miten lämmön talteenotto kaukolämpöön tapahtuu prosessissa.

Savukaasupesurissa epäpuhtaudet erottuvat veteen, joka suihkutetaan savukaasupesuriin ajettavaan savukaasuun. Pesurissa kiertävän pesuveden happamuutta eli pH arvoa säätämällä pystytään säätämään pesurin erotusastetta. Happamuutta säädetään kemiallisesti yleensä Natrium Hydroksidilla (NaOH). Likaantunut pesuvesi ohjataan jäteveden käsittelyyn, ja korvataan puhtaalla vedellä. Puhdistunut savukaasu ajetaan savupiipun kautta ulos pesurista. (Pöyry 2016, 2)

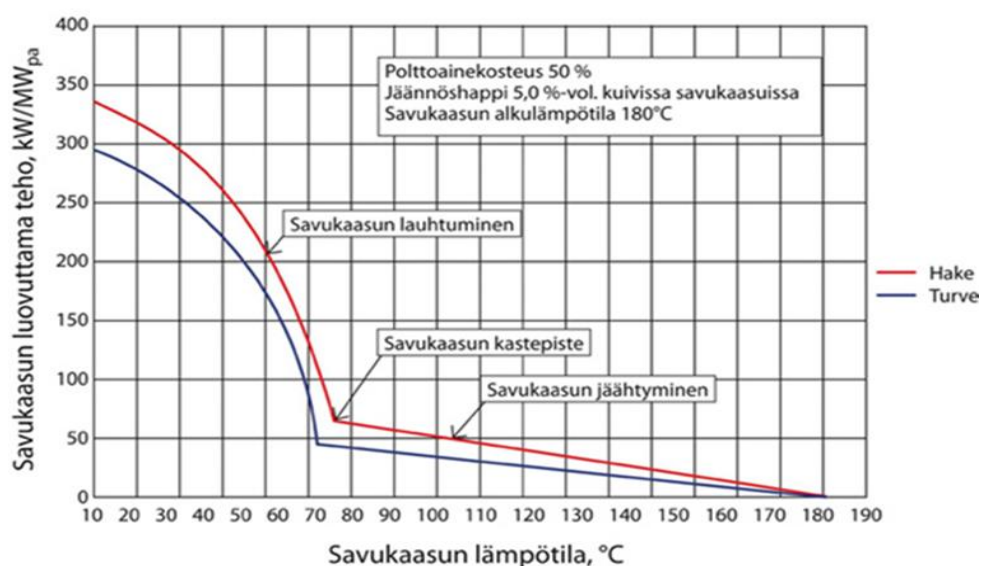


Kuva 14. Yksinkertaistettu kuvaus savukaasupesurin toiminnasta (Järvenreuna 2014)

Lämpöenergiaa talteen ottavassa savukaasupesurissa on kaksi prosessointivaihetta. Ensin on savukaasujen pesuvaihe, jossa suurin osa pienhiukkasista poistuu, ja savukaasut jäähtyvät märkälämpötilaan. Tämän jälkeen savukaasut ajetaan lauhtuttimeen, jossa lämpöenergian talteenotto tapahtuu lauhtamalla valuvaan kiertoveteen. Lämmönsiirtopintana toimivat pesurissa olevat täyttekappaleet. Kiertovesi, johon lämpöenergia on lauhtunut,

johdetaan lämmönvaihtimen kautta takaisin kiertoon. Lämmönvaihdin siirtää lämpöenergian kaukolämpöveeten. (Järvenreuna 2014)

Entalpiamuutokset kasvavat merkittävästi veden faasimuutosten yhteydessä. Tästä syystä pesurissa on ehdottoman tärkeää saavuttaa kastepistelämpötila, eli lämpötila, jossa vesihöyryn suhteellinen kosteus on 100 prosenttia. Kun lämpötila onnistutaan laskemaan kastepisteen alapuolelle, savukaasun vesihöyry muuttuu nesteeksi, ja merkittävät lämpöenergian siirtymät saavutetaan. Tällä tavalla lämpöä siirtyy jopa 2350 KJ/Kg. (Järvenreuna 2014) Kuva 15 esittää savukaasupesurin lämmön talteenottotehon eri lämpötiloilla, ja havainnollistaa kastepistelämpötilan saavuttamisen merkityksen.



Kuva 15. Savukaasun luovuttama teho lämpötilan suhteen savukaasupesurissa. (Järvenreuna 2014)

4.1.1 Savukaasupesurin lämmön talteenoton laskenta

Ensin on määritettävä savukaasujen kastepistelämpötila, jonka saa tekemällä palamislaskun polttoaineelle, jossa selviää savukaasun massavirta sekä

savukaasun moolinen koostumus. Kastepistelämpötila saadaan laskemalla kaavalla 28. (Anttonen 2011)

$$T_{kp,sk} = T(p''_{H_2O}) \quad (28)$$

missä

$T_{kp,sk}$ on savukaasujen kastepistelämpötila [°C]

$T(p''_{H_2O})$ on savukaasujen vesihöyryn osapaineen kylläinen lämpötila [°C]

Kastepistelämpötilan kylmemmillä lämpötiloilla lauhtumisesta saatava lämpöteho voidaan laskea kaavalla 29. (Anttonen 2011)

$$P_{tiiv} = q_{m,tiiv} * [h''(T_{ka}) - h'(T_a)] \quad (29)$$

missä

P_{tiiv} on vesihöyryn lauhtumisesta vapautuva lämpöteho [W]

$q_{m,tiiv}$ on lauhtuvan vesihöyryn määrä [kg/s]

$h''(T_{ka})$ on kylläisen vesihöyryn entalpia jäähtymän keskimääräisessä lämpötilassa [kJ/kg]

$h'(T_{ka})$ on kylläisen veden entalpia jäähtymän keskimääräisessä lämpötilassa [kJ/kg]

Lauhtuvan vesihöyryn määrä voidaan laskea kaavalla 30. (Anttonen 2011)

$$q_{m,tiiv} = M_{H_2O} (p(T_{alku})n_{sk,alku} - p(T_{loppu})n_{sk,loppu}) \quad (30)$$

missä

M_{H_2O} on veden moolimassa [g/mol]

$p''(T)$ on kylläisen vesihöyryn paine [bar]

n_{sk} on savukaasujen moolivirta [mol/s]

Savukaasuista vapautuu lauhtumisen lisäksi muutakin lämpötehoa, jonka määrä voidaan laskea kaavalla 31. (Anttonen 2011)

$$P_{muu} = \sum(q_{m,i}c_{p,i}(T_{sk.alku}-T_{sk.loppu})) \quad (31)$$

missä

P_{muu} on savukaasujen jäähtymästä vesihöyryn lauhtumisen lisäksi vapautuva lämpöteho. [W]

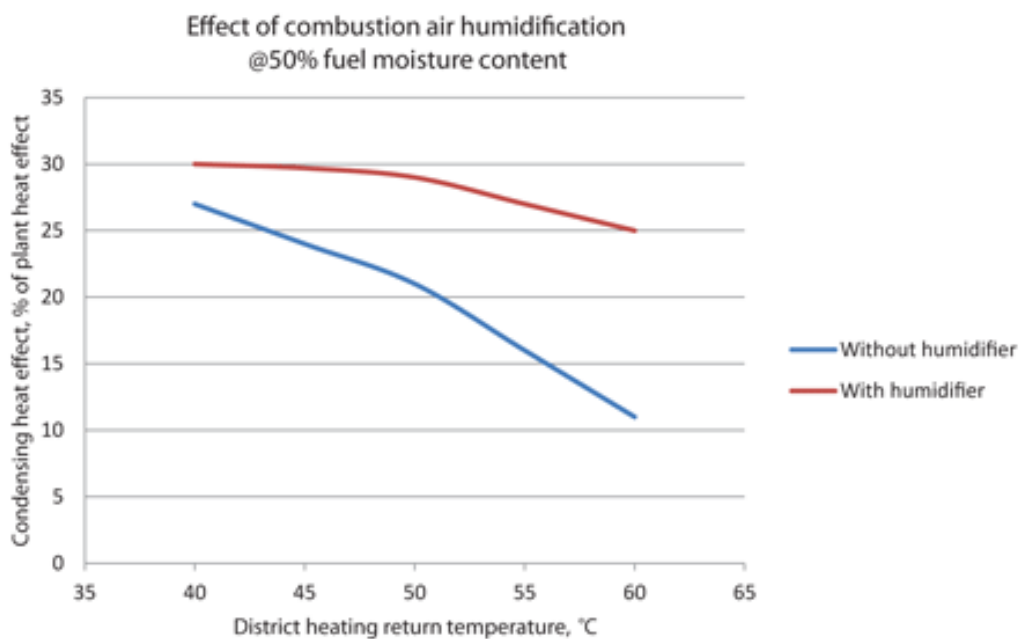
$q_{m,i}$ on savukaasukomponentin massavirta [kg/s]

$c_{p,i}$ on savukaasukomponentin ominaislämpökapasiteetti [kJ/kgK]

T_{sk} on savukaasujen lämpötila [K]

4.1.2 Palamisilman kostutin savukaasupesurin yhteyteen

Palamisilma voidaan kostuttaa siten, että kattilaan syötetään vesihöyryä, jonka johdosta savukaasun kastepiste nousee, lämpötila laskee ja tilavuusvirta laskee. Tämän ansiosta palamisilmaan siirtynyt energia saadaan otettua talteen korkeammilla lämpötiloilla. Kuva 16 havainnollistaa savukaasupesurin lämmön talttenottotehon palamisilman kostuttimen kanssa ja ilman kostutinta.

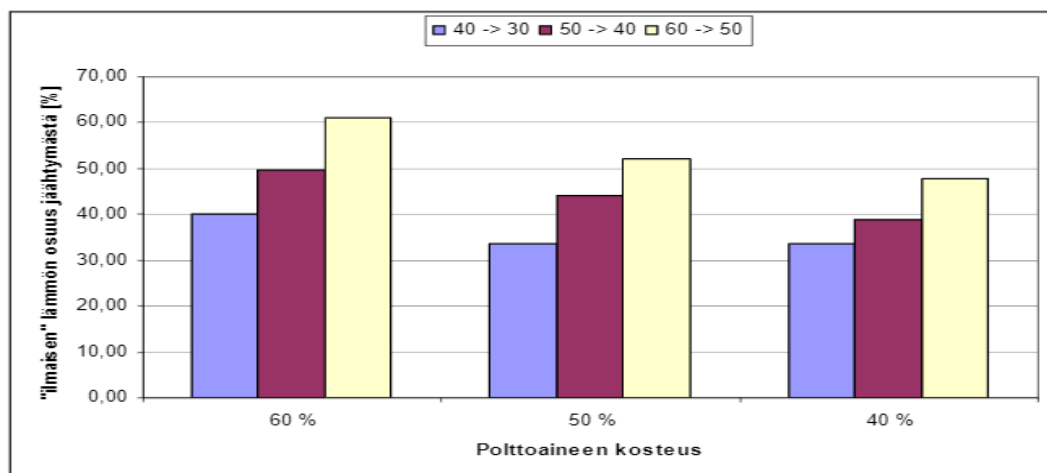


Kuva 16. Palamisilman kostuttimen vaikutus savukaasupesurin lämmön talteenottoon (Jedfelt D, Eteläaho R, Korhonen T, 2013)

4.2 Savukaasupesurin luovuttaman tehon lisäys

Savukaasupesurissa savukaasun luovuttama teho on sitä suurempi, mitä matalampi lämpötila savukaasupesurissa on. Tästä syystä kaukolämpöverkon paluueden lämpötila halutaan saada matalaksi. Lämpöpumpulla voidaan säätää kaukolämmön paluueden lämpötilaa halutulle tasolle, jossa kastepiste saavutetaan ja hyödyt saadaan maksimoitua. Jos lämpöpumpulla paluueden lämpöenergiaa siirretään menoveteen tai kiinteistöön, lämpöenergiaa ei mene hukkaan ja savukaasupesurin hyödyt saadaan optimoitua. (Järvenreuna 2014)

Koska savukaasupesurin lämmön talteenottoteho paranee kaukolämmön paluueden lämpötilan madaltuessa, ja kaukolämmön paluuedestä otettu lämpöenergia madaltaa sen lämpötilaa, palautuu osa paluuedestä otetusta lämpöenergiasta "ilmaiseksi" savukaasupesurissa. Kuva 24 esittää kuinka suuri osa hyödynnetyistä paluuedestä palautuu savukaasupesurissa polttoaineen eri kosteuksilla ja paluueden eri lämpötiloilla.



Kuva 17. Kaukolämmön paluvedestä otetusta lämpöenergiasta savukaasupesurissa lämmön talteenoton tehostumisen myötä palautuva osuus kaukolämpöveden eri paluulämpötiloilla ja polttoaineen kosteksilla (Pöyry 2010, 7)

Jos lämpöä talteen ottava savukaasupesuri on lämmön ja sähkön yhteistuotantolaitoksella, ja paluueden lämpötilaa lasketaan lämpöpumpulla, saadaan hyötyjä lämmöntalteenoton lisäksi sähkön tuotannon lisääntymisestä voimalaitoksen käydessä täydellä kuormalla, mutta jos laitos käy osakuormalla, pesurista saatu lisälämpö vähentää sähköntuotantoa turbiinin lämpökuorman pienentymisen takia. Jos laitosta ajetaan vain osakuormalla, saatava hyöty voi jäädä mitättömäksi jos menetetyt sähkön hinta on lähes sama kuin talteen otetun lämmön hinta. Laitoksella, jossa tuotetaan pelkästään lämpöä, ei tätä ongelmaa ole, joten suurin hyöty paluueden jäähtytyksellä saadaan lämpökeskuksessa, jossa on lämpöä talteen ottava savukaasupesuri.

Lämpöpumpulla paluuedestä poistetusta lämpöenergiasta saadaan savukaasupesurissa takaisin 30 - 60 % riippuen savukaasujen kosteudesta ja paluueden lämpötilasta. Jos pumppaussähkön hinnaksi oletetaan 50 €/MWh, lämmön tuotantokustannukseksi 35 €/MWh ja peruskuormalaitoksen tuotantokustannuksiksi 25 €/MWh, ja laitosta ajetaan täydellä teholla, lämmön talteen ottavasta pesurista saadaan lämpöpumpulla viilennetystä paluuedestä

hyötyä 12 €/MWh sekä sähköntuotannon lisääntymisestä 0,3 €/MWh. (Pöyry 2010, 8-13) Kaukolämpöjärjestelmät, joissa on lämpövarasto, on mahdollista ajaa valittuja tuotantolaitoksia useammin täydellä teholla, ja saada suurempi hyöty lämpöä talteen ottavalla savukaasupesurilla varustetun yhdistetyn sähkön ja lämmön tuotantolaitoksesta.

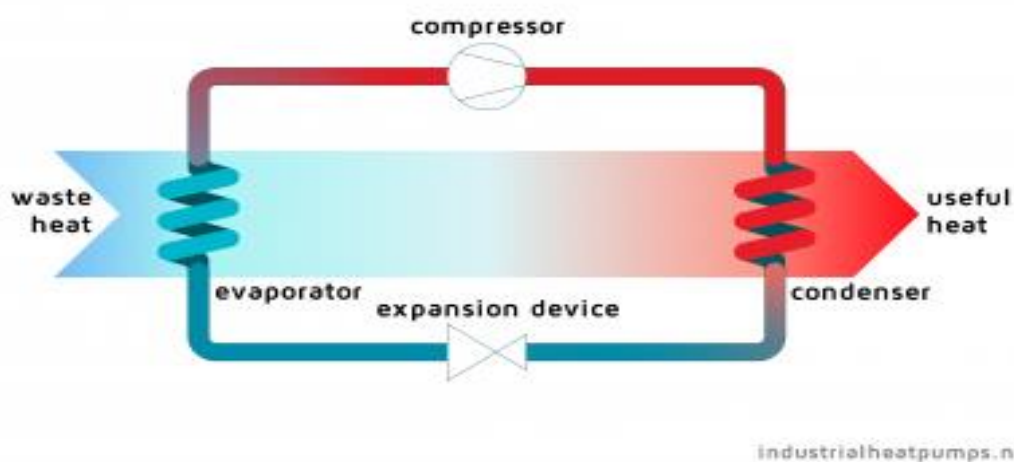
4.3 Lämpöpumppu

Lämpöpumppu on laite, joka pystyy siirtämään lämpöenergiaa matalammasta lämpötilasta korkeampaan. Tyypillisesti lämpöpumpuksi kutsutaan laitetta, joka siirtää lämpöenergiaa matalammasta lämpötilasta korkeampaan tavoitteenaan lämpimämmän lähteen lämpötilan nosto. Jos tarkoituksena on laskea viileämmän lähteen lämpötilaa, kyseistä laitetta kutsutaan usein jäähdytysjärjestelmäksi. (Dincer & Kanoglu 2010, 275)

Suurimman osan lämpöpumpuista toiminta perustuu höyryn puristusyykliin. Tässä tekniikassa käytettävät komponentit ovat samat sekä lämmitys että viilennystarkoitukseen. Nämä komponentit ovat kompressori, lauhdutin, höyrystin ja paisuntalaite. Lämpöpumpussa kiertää kylmäaine. Kylmäaineet ovat usein kloorifluorihilivetyjä (HCFC). (Dincer et al. 2010, 275) Nykyään ollaan siirtymässä ympäristöystävällisempiin kylmäaineisiin muunmuassa EU:n F-kaasuastuksen vaatimusten täyttämiseksi. Tällainen ympäristöystävällisempi kylmäaine on esimerkiksi R1234ZE.

Lämpöpumpun yksinkertaistettu toimintaperiaate on kuvattuna kuvassa 18. Höyrystin on lämmönvaihdin, jossa erittäin kylmä kylmäaine ja lämmönlähde kohtaavat, jolloin kylmäaine lämpenee riittävästi höyrystyäkseen. Höyrystyessään kylmä aina sitoo itseensä lämpöenergiaa. Seuraavaksi kompressori nostaa höyrystyneen kylmäaineen korkeaan paineeseen, joka saa sen lämpenemään. Seuraavaksi syntynyt lämpö siirtyy lauhduttimeen eli toiseen lämmönvaihtimeen,

jossa lämpöenergia luovutetaan lämmitettävään kohteeseen, ja kylmäaine muuttuu jälleen nesteeksi. Kylmäaine johdetaan seuraavaksi paisuntalaitteelle, jossa sen paine lasketaan, ja muutetaan jälleen erittäin kylmäksi, jonka jälkeen kierto alkaa alusta. (Dincer et al. 2010, 275)



Kuva 18. Lämpöpumpun toiminta periaate (Industrial Heat Pumps)

Lämpöpumpussa hyödynnetään termodynamiikan toista lakia, ja tehdään työtä lämpöpumpun kylmäaineella. Lämpöpumpun käyttämiseksi tarvitaan ulkoista energiaa eli sähköä. Teoriassa lämpöpumpun toimittama kokonaisenergia on yhtä suuri kuin käyttöenergian määrä plus lämmönlähteestä uutettu lämpöenergia. (Dincer et al. 2010, 275)

Lämpöpumpputekniikka on tehokas tapa edistää lämpöenergian tehokasta käyttöä. Matalalämpöinen hukkalämpö, joka muuten päästettäisiin ilmaan tai veteen, pystytään lämpöpumpulla muuntamaan tehokkaasti korkeaksi lämpötilaksi, ja hyödyntämään haluttuun tarkoitukseen esimerkiksi teollisuuden tai kaukolämmön tarpeisiin. Lämpöpumput ovat sekä taloudellisia että ympäristöystävällisiä. Lämpöpumppujen yksinkertainen tekniikka mahdollistaa standardoitujen järjestelmämallien soveltamisen edullisesti sekä uudisrakentamiseen että jälkiasennuksiin. (Dincer et al. 2010, 275)

On monta tapaa ilmaista lämpöpumpun hyötysuhde, joista yleisin on lämpökerroin (COP, Coefficient of Performance). COP on lämpöpumpusta ulostulevan lämpöenergian suhde lämpöpumppuun syötettyyn käyttöenergiaan. Lämpöpumput tuottavat enemmän energiaa kuin kuluttavat, jonka takia hyötysuhdetta kuvataan lämpökertoimena. Lämpökerroin saadaan sitä korkeammaksi, mitä lähempänä lämmön lähteen ja lämmitettävän kohteen lämpötilat ovat toisiaan. (Dincer et al. 2010, 278) Jos lämpöpumpulla on vain yksi tunnettu toiminnan lämpötilataso, voidaan teoreettinen lämpökerroin määrittellä alla näkyvällä kaavalla 32 (Eskola, Jokisalo & Siren 2012, 20).

$$\text{COP}_C = \frac{T_L}{T_L - T_H} \quad (32)$$

missä

COP_C on lämpöpumpun Carnot lämpökerroin

T_L on lämpöpumpun lauhtumislämpötila [K]

T_H on lämpöpumpun höyrystymislämpötila [K]

Carnot lämpökerroin on suurin teoreettisesti mahdollinen lämpökerroin, joka voidaan saada kahden eri lämpötilan välille. Lämpöpumpun todellinen hyötysuhde saadaan lämpöpumpun todellisen lämpökertoimen ja Carnot lämpökertoimen suhteesta. Höyrystymis- ja lauhtumislämpötilojen lisäksi todellinen lämpökerroin on riippuvainen lämpöpumpun kylmäaineesta, kompressorin hyötysuhteesta sekä lämpöpumpun lämpö- ja painehäviöistä.

4.4 Lämpöpumput kaukolämpöjärjestelmässä

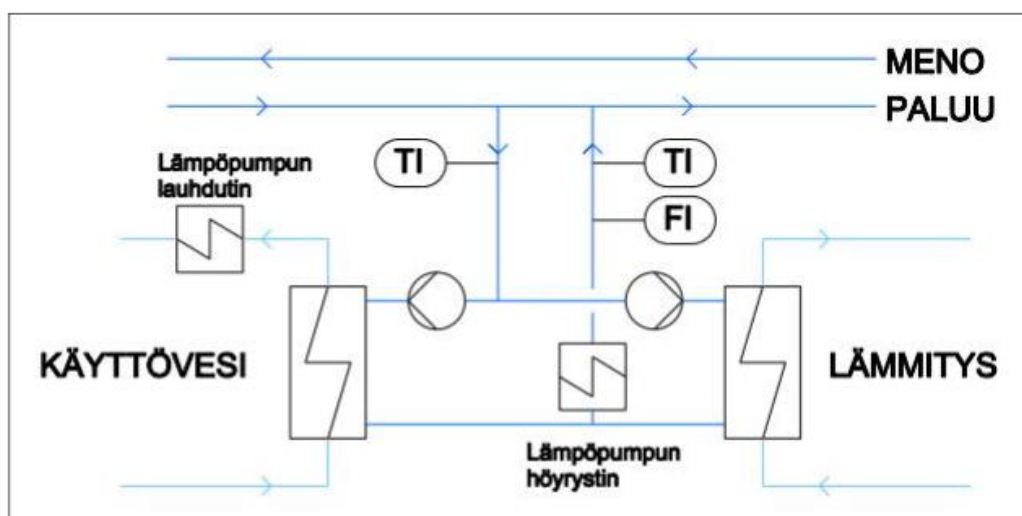
Lämpöpumppuja käytetään kaukolämpöjärjestelmissä moniin eri tarkoituksiin kuten hukkalämpöjen talteenottoon ja kaukolämpöveden menolämpötilan nostoon. Tässä opinnäytetyössä tutkitaan kaukolämpöverkkoon liitettävää lämpöpumppuliitettä, jonka tarkoitus on pumpata lämpöenergiaa paluvedestä

menoveteen, alueelliseen matalalämpölämpötilaiseen verkkoon tai paluuedestä suoraan kiinteistöön. Tavoite on optimoida paluueden lämpöenergian hyödyntäminen.

4.5 Kiinteistön lämmittäminen kaukolämmön paluuedellä lämpöpumpun avulla

Normaalissa asiakkaan kaukolämpökytkennässä sekä lämmityksen että käyttöveden lämpö otetaan menolinjasta ja palautetaan paluulinjaan. Lämmityksen ja käyttöveden tehon säätö tapahtuu lämmönvaihtimien jälkeen. Käytetyn energian määrä määritetään mittaamalla lämpötila molemmista linjoista sekä virtaus paluulinjasta. (Pöyry 2010, 20)

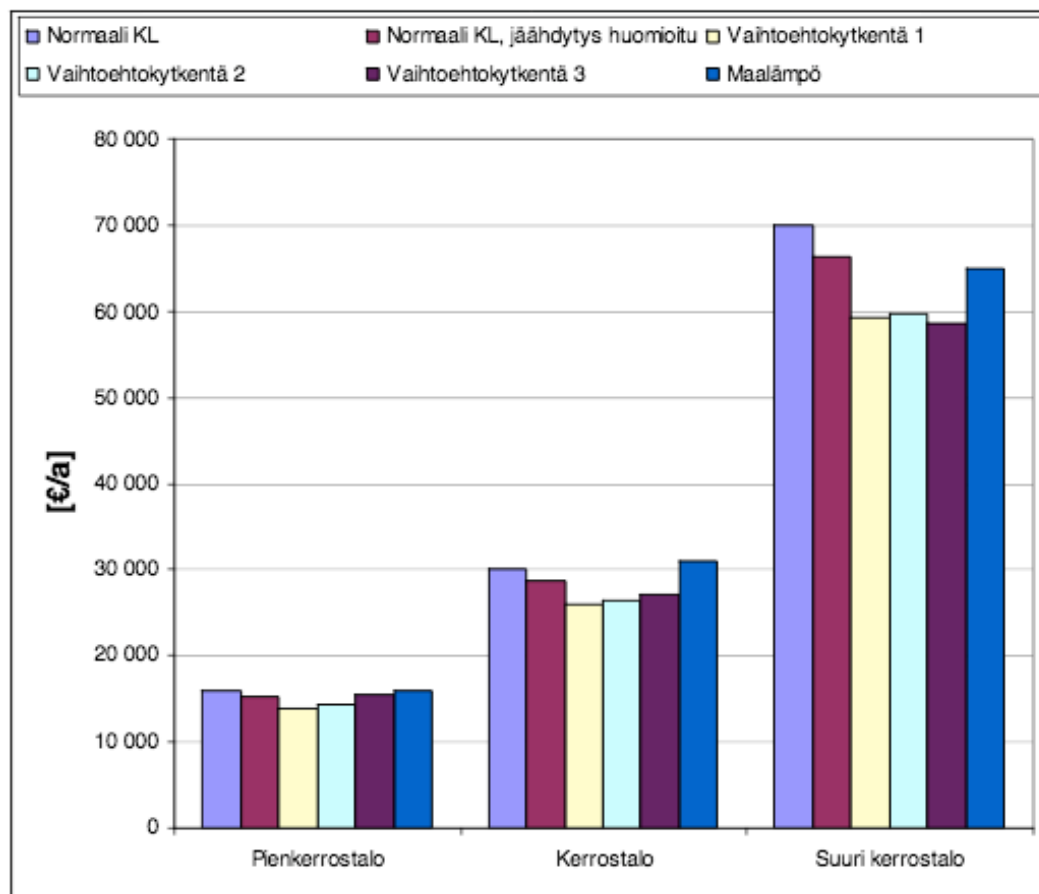
Jos kiinteistössä on käytössä matalalämpöratkaisu kuten lämmitys lattialämmityksellä, kiinteistön lämmitystarve voidaan täyttää ottamalla lämpö kaukolämpölinjan paluujohdosta. Koska paluueden lämpötila ei ole riittävän korkea käyttöveden lämmitystä varten, nostetaan sen lämpötila lämpöpumpun avulla riittävän korkeaksi kuvan 19 osoittamalla kytkennällä. Erot normaaliin asiakkaan lämpökeskuskytkentään verrattuna ovat käyttöveden ja lämmityksen tehon säätö, jotka tehdään taajuusmuuntajasäädetyllä pumpulla, lämmitys vesi otetaan paluulinjasta, ja lämpöpumppu tulee kytkentään lisäksi, joka ottaa lämpöenergiansa lämmönjakokeskuksen paluulinjasta. (Pöyry 2010, 22) Tällä tavalla lämmitetty kiinteistö viilentää paluuedettä käyttämänsä tehon verran.



Kuva 19. Asiakkaan lämmönjakokeskus lämpöpumppukytkennällä (Pöyry 2010, 15)

Paluuedellä voidaan lämmittää kiinteistöjen lämmitys myös sellaisilla ratkaisuilla, joissa käyttöveden lisälämmityksessä lämpöpumppu korvataan suoralla sähkölämmityksellä tai kytkennällä, jossa lämmitys otetaan kaukolämpöjohdon paluuedestä, ja käyttöveden lämmitys kaukolämpöjohdon menovedestä. Nämä kolme vaihtoehtoa kilpailevat perinteisen kaukolämmön ja maalämmön kanssa, ja ovat soveltuvia etenkin kerrostaloihin. Pöyryn tekemän tutkimuksen mukaan, jossa investoinnin takaisinmaksuajaksi on määritetty 20 vuotta, ja koroksi 5%, on keskimääräisellä kaukolämmön hinnalla Suomessa kaikki kolme vaihtoehtoa kokonaiskustannuksiltaan edullisempia lämmitysratkaisuja kuin perinteinen kaukolämpö tai maalämpö kuten kuva 20 osoittaa. Vertailu on tehty sillä oletuksella, että luvussa 3 esitetty jäähtymätermi on otettu käyttöön, ja paluuedellä lämmitetyn kiinteistön jäähtymä muodostuu kaukolämpöjohdon menoveden ja kiinteistöstä palautuvan veden lämpötilojen erotuksesta. Kuvassa vaihtoehtokytkenä 1 on liitännä, jossa käyttöveden lämmitys otetaan kaukolämpöjohdon menovedestä. Vaihtoehtokytkenä 2 on kytkentä, jossa käyttöveden lämmitys otetaan kaukolämpöjohdon paluuedestä, ja sen lämpötilaa nostetaan sähköllä. Vaihtoehto 3 on kuvassa 18 esitetty

lämpöpumppukytkentä. Kaikki vaihtoehtoiset kytkennät ottavat kiinteistön lämmityksen paluujohdosta. (Pöyry 2010, 24-25)

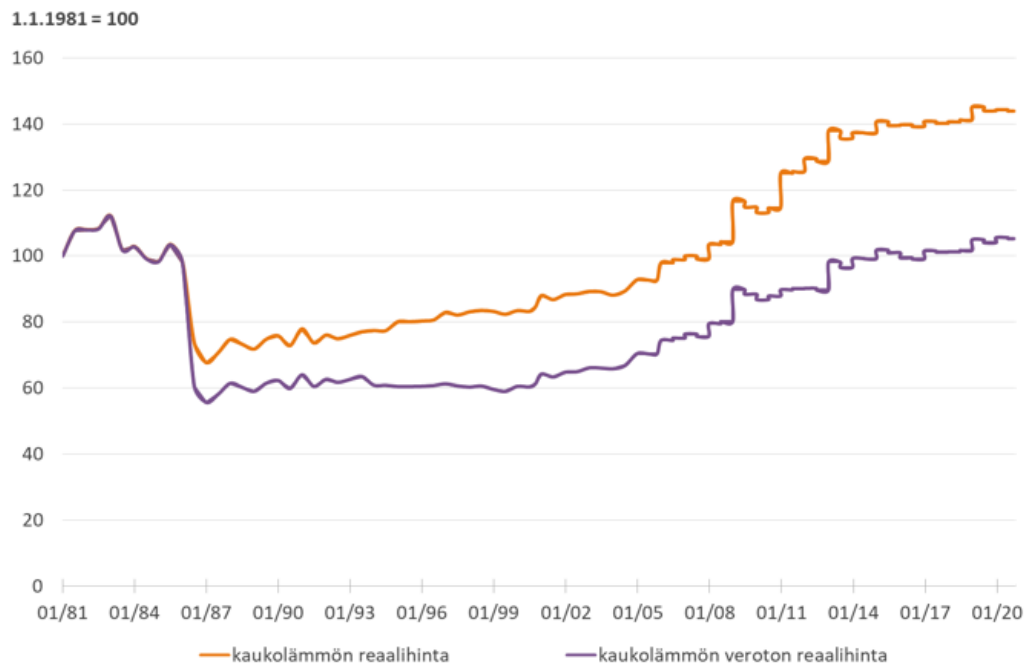


Kuva 20. Lämmityksen kokonaiskustannus investoinnin, sähkön ja lämmön hinta huomioituna asiakkaalle euroina vuodessa kerrostalotyypeittäin. (Pöyry 2010 24)

Myös radiaattorilämmitteisiä kiinteistöjä voidaan lämmittää kaukolämpöjohdon paluuedellä, mutta näissä kohteissa myös radiaattorien lämmitykseen menevän lämpötilaa pitää nostaa lämpöpumpulla tai sähköllä. Näissä kohteissa ratkaisu ei kuitenkaan pärjää perinteiselle kaukolämpölämmitykselle hintakilpailussa. (Pöyry 2010)

Kaukolämmön polttoaineiden verotuksen jatkuva kiristyminen on johtanut jatkuvaan polttoaineiden hinnannousuun ja on siten nostanut kaukolämmön

hintaa, jonka näkee kuvasta 21, joka osoittaa kaukolämmön hinnan kehityksen. (Energieollisuus 2019)



Kuva 21 Kaukolämmön hintakehitys (Energieollisuus 2019, 22).

Kaukolämpöyhtiöiden tavoite on pysyä ensisijaisena lämmitysmuotona asiakkaille, jos kaukolämpö on saatavilla. Maalämmön yleistyessä investointi maalämpöön tulee yhä edullisemmaksi, ja kaukolämmön käyttöhintojen samaan aikaan noustessa, on kaukolämpöyhtiöiden tehtävä uusia ratkaisuja turvataksaan asemansa ensisijaisena lämmitysvaihtoehtona.

4.5.1 Ratkaisun ongelmat ja haasteet

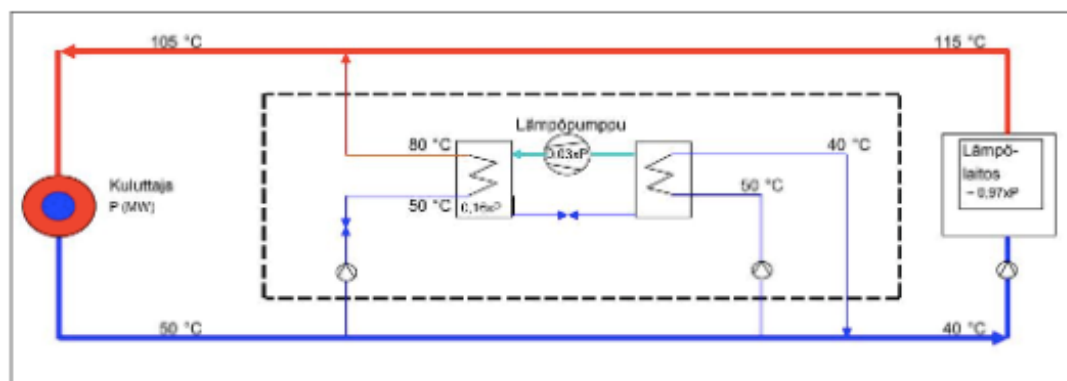
Kiinteistöjen lämmittämiseen kaukolämmön paluuedellä liittyy useita haasteita ja ongelmia. Virtaus kaukolämpöverkossa on erittäin paikkakohtaista, ja asiakkaan, jonka lämmitys tulee paluuedestä, täytyy sijaita paikassa jossa virtaus

on riittävä tarvittavan lämmön saamisen varmistamiseksi. Ongelmallisimpia paikkoja ovat verkoston latvaosat sekä silmukat. Ongelmallisimpia aikoja ovat kesäaikaan yöt, jolloin lämmityksen tarve on yleensä pientä, ja paluuedellä lämmitettävä kiinteistö vaatii suurta lämmitystehoa. Talviaikaan kiinteistöt vaativat suurinta virtausta, mutta myös muu kaukolämmön kulutus on suurta, ja virtaukset ovat suuria verkostossa, poikkeuksena saattavat olla latvaosat ja silmukkajohdot. Silmukkajohdoissa ongelmia tuottaa myös veden virtaussuunta, koska paluuedellä lämmitettävä kiinteistö liittyy verkoston paluujohtoon kahdella putkella, on ehdottoman tärkeää että kiinteistön menovesiputki on sijoitettuna virtauksen kannalta ensimmäisenä vastaantulevaksi, jotta vältytään ”hullun kierroksi” kutsutulta ilmiöltä jossa kiinteistöltä palaava vesi virtaisi uudestaan kiinteistöön. Silmukkajohdoissa virtauksen suunta voi muuttua esimerkiksi verkoston huoltotöiden aikana tai jos verkoston lämmöntuotantolaitoksia sijaitsee verkoston molemmissa päissä. Virtaussuunnan vaihtelu on ongelma, joka voidaan kuitenkin ratkaista kytkemällä kiinteistön paluuesiputki kahteen eri kohtaan eri puolille kiinteistön menovesiputkea. (Anttonen 2011, 70-72)

4.6 Menoveden lämmitys paluueden lämpöenergialla lämpöpumpun avulla

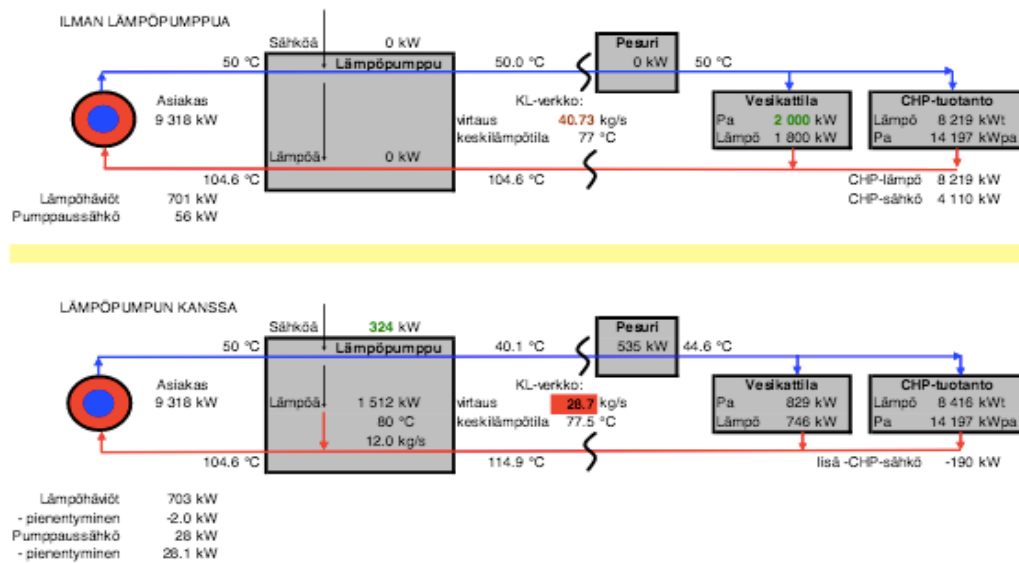
Kaukolämpöverkon paluueden lämpöenergiaa voi hyödyntää myös pumppaamalla lämpöä paluuedestä menoveteen. Tällaisessa ratkaisussa lämpöpumpun investointi, käyttö, huolto ja järjestelmän toteuttaminen kuuluvat lämpöyhtiölle. Ratkaisun mahdolliset taloudelliset hyödyt tulevat luonnollisesti myös lämpöyhtiölle tässä ratkaisussa. Ratkaisun hyödyt pohjautuvat paluueden vähempiarvoiseen energiaan verrattuna menoveden energiaan. Lämpöpumpun avulla paluueden lämpö parannetaan sellaiseksi, joka voidaan myydä asiakkaalle. Toimenpiteellä on useita ja tapauskohtaisesti vaihtuvia vaikutuksia lämmönhankinnan kustannus- ja energiataseisiin. Kyseisen

lämpöpumppuliitännän vaikutukset pitää selvittää aina tapauskohtaisesti. Lämpöpumppu voidaan sijoittaa esimerkiksi verkostossa käytön kannalta hankalaan haaraan, siten että paluueden lämpötila laskee ja pumppu tuottaa osan kyseisen haaran menoveden energiasta. Kuvassa 22 on esitetty edellä mainittu kytkentä. Tämän seurauksena virtaus ja pumppauksen tarve vähenevät huomattavasti, joten lämpöpumpun käyttämästä sähkökulutuksesta osa saadaan säästettyä siirtopumppujen sähkön kulutuksesta ja merkittävä osa paluueden menettämästä lämpöenergiasta palautuu savukaasupesurissa. Parhaimmillaan ratkaisulla voidaan säästää myös verkostoinvestoinneissa. (Pöyry 2010, 33)



Kuva 22. Esimerkki lämpöpumppuliitännästä paluu- ja menovesiputkien välillä. (Pöyry 2010, 34)

Jos suuritehoinen lämpöpumppu sijoitetaan verkostossa tuotantoyksiköiden ulkopuolelle, on putken kuormitus- ja virtaustilanteet selvitettävä huolellisesti. Selvityksellä halutaan varmistaa, että lämpöpumpulla on mahdollisimman pitkä huippukäyttöaika ja paluuvesi ei viilene liikaa huonontaen lämpöpumpun lämpökerrointa. Lämpöpumppu tulee mitoittaa siten, että virtaama on riittävä minimikuormalla. (Pöyry 2010, 35)



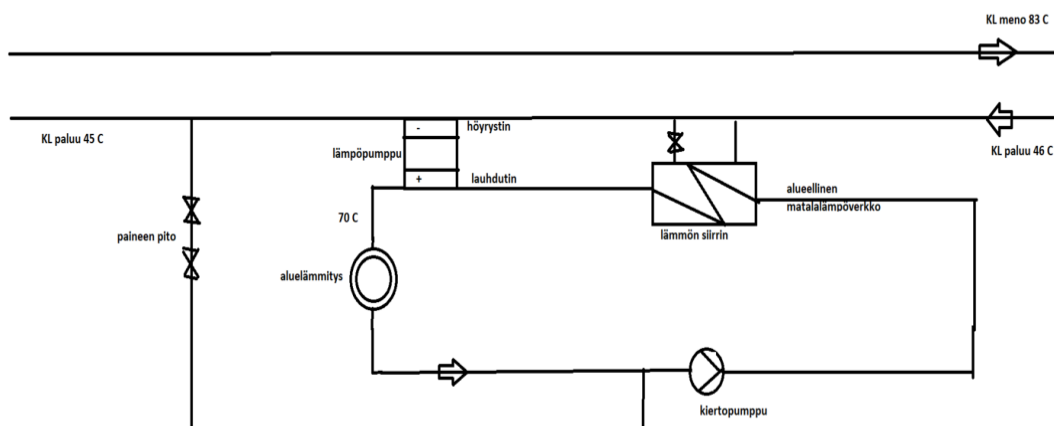
Kuva 23. Esimerkki tuotantolaitokselle asennettavan lämpöpumpullitännän vaikutuksista kaukolämpöjärjestelmään. (Pöyry 2010, 40)

Kuvassa 23 on esitetty ratkaisu, jossa lämpöpumppu sijoitetaan voimalaitokselle, ja kyseisen ratkaisun vaikutuksista. Ratkaisun taloudellinen kannattavuus on erittäin riippuvainen pesurissa palautuvan energian määrästä, verotuksesta, päästömaksuista, käyttöajasta, investoinnin reaalkorkokannasta sekä tuotetun ja myydyn energian hinnasta.

4.7 Alueellinen matalalämpöverkko

Paluveden lämpöenergiaa voidaan hyödyntää myös alueellisella matalalämpöverkolla. Matalalämpöverkko olisi kytkettynä esimerkiksi kuvassa 24 esitetyllä tavalla kaukolämpöverkkoon. Matalalämpöverkko liittyisi kaukolämpöverkon paluuputkeen lämmön siirtimellä, josta se saa lämpöenergiansa. Koska paluveden lämpötila ei ole riittävän korkea käyttöveden lämpötilaksi, matalalämpöverkon lämpötilaa priimataan eli nostetaan vaaditulle tasolle lämpöpumppukytkennällä, jossa lämpöpumpun höyrystin on

kaukolämmön paluujohdossa, ja lauhdutin on matalalämpöverkossa. Matalalämpöverkon lämmön riittävyys voidaan varmistaa lisäämällä kytkentä myös kaukolämmön menopotkeen, josta lämpöä otetaan kuitenkin vain tarvittaessa.



Kuva 24. Alueellinen matalalämpöverkko kytkettynä kaukolämpöverkon paluulinjaan

Matalalämpöverkossa voi matalamman lämmön lisäksi olla matalampi paine, jota säädetään erillisellä pumpulla. Kuitenkin paineenpitolinja pääverkkoon on tarpeellinen. Alhaisemman paineen ja lämpötilan vuoksi alueellinen matalalämpöverkko voidaan rakentaa muoviputkista. (Viholainen, Kuivala ja Fagerström 2018, 19) Alueelliset matalalämpöverkot soveltuvat erityisesti uusille asuinalueille, jossa uudet rakennukset ovat energiatehokkaita ja lämmön tarve on pieni. Jos alueellinen verkko voidaan rakentaa muoviputkista, alentaa se verkon investointikustannuksia.

4.8 Jakelun hyödyt

Lämpöpumpun avulla paluuedestä siirretty lämpöenergia menoveteen tai suoraan kiinteistöön lisää lämpötilaeroa meno ja paluuputken välillä. Kun lämpötilaero on suurempi, voidaan vähentää virtausta verkossa, joten myös painehäviöt vähenevät. Pöyryn tekemän tutkimuksen mukaan paluueden yhden asteen jäähtymä vähentää vesivirtaa 2,6 %, joka tarkoittaa 5,5 % vähennystä pumppauskustannuksissa. Jos sähkön hinta on 50 €/MWh, tarkoittaa se jäähditysenergialle arvoa 0,6 €/MWh. (Pöyry 2010, 13)

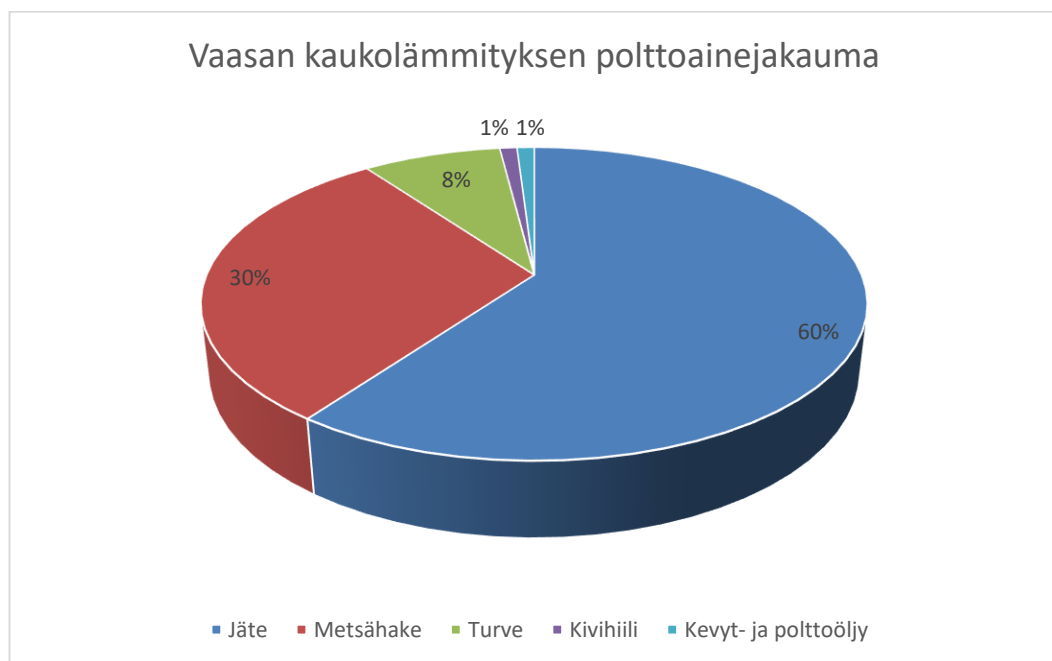
Jos lämpöpumpulla pumputaan lämpöenergiaa paluuedestä suoraan kiinteistöön, laskee paluueden lämpötila, ja siten myös lämpöhäviöt. Pöyryn tutkimuksen mukaan paluueden lämpöhäviöt pienenevät 0,8 % per alennettu Celsius-aste. Laskettuna keskimääräisellä 10 % lämpöhäviöllä kaukolämpöverkossa ja tuotantokustannuksen ollessa 35 €/MWh saadaan lämpöhäviöissä jäähditysenergialle arvoksi 0,4 €/MWh. Lämpöhäviöissä säästetyn energian määrä on kuitenkin erittäin riippuvainen paluuvettä jäähdyttävän kohteen sijainnista siten, että mitä kauempana kohde on tuotantolaitosta, sitä pidemmältä matkaa jäähdytyksellä on vaikutusta, ja siten säästö on suurempi. (Pöyry 2010,13-14)

4.9 Lämmön varastoinnin hyödyt

Kaukolämpöjärjestelmissä, joissa on käytössä paineeton lämpövarasto, voidaan 5 celsiusasteen paluulämpötilan alentamisella saavuttaa noin 10 % lisäys olemassa olevan varaston varastointikapasiteettiin koska lämpövaraston varastointikyky on suoraan riippuvainen meno- ja paluuesien lämpötilaerosta. (Pöyry 2010, 9)

5 PALUUVEDEN HYÖDYNTÄMINEN VAASAN ALUEEN KAUKOLÄMPÖJÄRJESTELMÄSSÄ

Vaasan alueen kaukolämpöjärjestelmässä on yli 3300 asiakasta. Verkoston pituus on 251 kilometriä ja lämpövoimalaitosten yhteisteho on 415 MW. 60 prosenttia tuotetusta lämmöstä tuotetaan jätteenpolttolaitoksella, jossa tuotetaan sekä sähköä että kaukolämpöä. 30 prosenttia lämmöstä tuotetaan metsähakkeella. Myös metsähakkeenpolttolaitos on yhdistetty sähkön- ja lämmöntuotantolaitos. Loput 9 prosenttia lämmöstä tuotetaan hiilellä, turpeella ja öljyllä pääasiassa huippu- ja varalämmön tarpeessa. Vaasan vuoden 2020 kaukolämmityksen polttoainejakauma on esitettyä kuvassa 25.



Kuva 25. Vaasan kaukolämmityksen polttoainejakauma

5.1 Paluueden käytöstä saatavat hyödyt Vaasan kaukolämpöverkossa

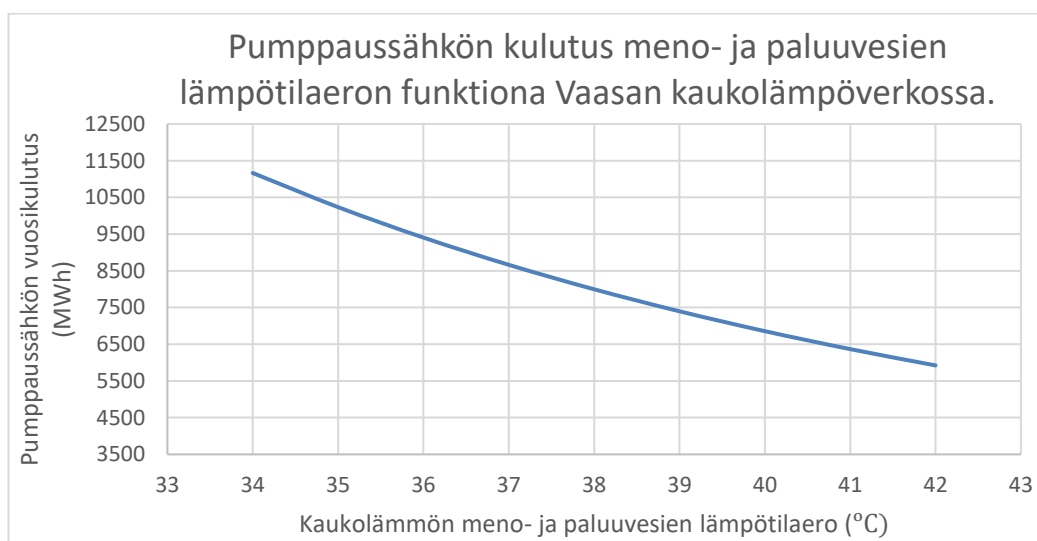
Vaasassa kaukolämpöjärjestelmän paluueden yhden asteen jäähtymiseen tarvittava energiamäärä on 34 388 MWh vuodessa laskettuna järjestelmän keskimääräisen vuotuisen yhteenlasketun virtaaman mukaan. Tässä kappaleessa määritetään paluueden hyödyntämisen johdosta saatavat hyödyt ja niiden arvo Vaasan Sähkölle. Tässä kappaleessa ilmoitetut energiahinnat eivät ole Vaasan Sähkö Oy:n hintoja, koska ne eivät ole julkista tietoa, joten jäähtymän arvo ja taloudelliset hyödyt ovat laskettu samoilla lämmön, polttoaineen ja sähkön hinnoilla kuin Pöyryn 2010 tutkimuksissa on käytettynä. Hinnat, joilla jäähtymän arvo on laskettu ovat lämpöenergia 35 €/MWh, polttoaine 25 €/MWh ja sähkö 50 €/MWh (Pöyry 2010).

Tässä luvussa esitetään laskennan tulokset järjestelmän pumppauksen ja lämpöhäviöiden osalta. Luvussa esitellään myös Mustasaassa sijaitsevan jätteenpolttolaitoksen saavat hyödyt paluueden hyötykäytöstä sekä vertailun vuoksi teoreettisen uuden metsähakkeenpolttolaitoksen saamat hyödyt. Vertailu on haluttu tehdä, koska jätteenpolttolaitoksella ei ole palamisilmankostutinta, ja tässä luvussa esitetyllä teoreettisella metsähakkeenpolttolaitoksella sellainen on.

5.1.1 Pumppaussähkö

Vaasan kaukolämpöjärjestelmän pumppaussähkön kulutus vuonna 2020 oli 8663 MWh. Kaukolämmön keskimääräinen lämpötilaero meno- ja paluuesiputkissa oli 37 astetta. Näillä arvoilla laskettaessa pumppaussähkön kulutus vähenee 7,7 % jos paluueden lämpötila laskee 1 celsiusasteen. 5 celsiusasteen paluueden lämpötilan aleneminen vähentää pumppaussähkön kulutusta jopa 31,6 %. Jäähtymä termi eli rahallinen säästö energiayksikköä kohti on pumppauksen osalta 0,92 €/MWh, jos sähkön arvo olisi 50 €/MWh. Pumppaussähkön kulutus kaukolämpöjärjestelmässä on riippuvainen meno- ja paluuesien välisestä

lämpötilaerosta, siten että lämpötilaeron kasvaessa pumppaussähkön kulutus vähenee. Kuva 26 osoittaa meno- ja paluuvesien välisen lämpötilaeron ja pumppaussähkön kulutuksen välisen suhteen. Kuvasta nähdään, että lämpötilaeron kasvaessa sen suhteellinen vaikutus pumppaussähkön kulutukseen vähenee, joten paluueden lämpötilan nousulla olisi suurempi vaikutus pumppaussähkön kulutukseen kuin sen laskulla.



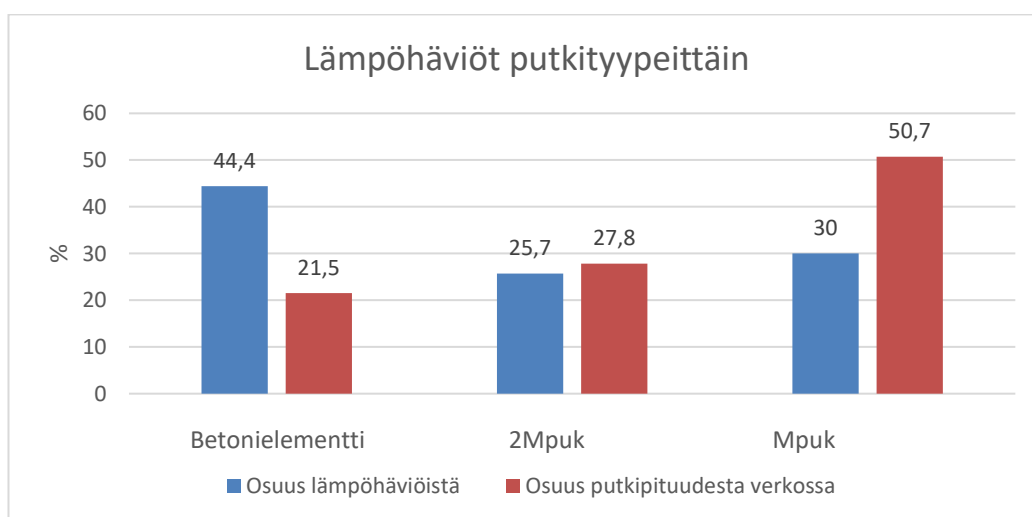
Kuva 26. Pumppaussähkön kulutus kaukolämmön meno- ja paluueden välisen lämpötilaeron funktiona

5.1.2 Lämpöhäviöt

Lämpöhäviöt Vaasan kaukolämpöjärjestelmässä ovat eri vuosina olleet välillä 55 - 63 GWh vuodessa laskettuna hankitun lämmön ja myydyn lämmön erotuksena. Tässä työssä tehdyn laskennan tuloksena saatiin lämpöhäviöksi 52 GWh. Työssä esitetyllä tavalla laskettu lämpöhäviö on pienempi, koska se ei ota huomioon vuotojen mukana hävinnyttä lämpöenergiaa eikä laitosten omakäyttölämpöä, joka luetaan häviöihin, ja koska suuri osa verkostosta on ollut asennettuna vuosikymmeniä, on niiden lämmöneristeiden lämmönjohtavuus hieman kasvanut. Myydyn ja tuotetun lämmön erotuksella saatava lämpöhäviön määrään aiheuttaa epätarkkuutta kaikkien järjestelmässä olevien mittareiden virhemarginaali. Työssä

esitetyllä laskentamenetelmällä epätarkkuutta aiheutuu ainakin tehdyistä oletuksista. Tehtyjä oletuksia ovat, että kaukolämpöjohtojen sijoitusvyvyys pysyy putkityypeittäin samana sekä maaperän lämmönjohtavuuden oletetaan pysyvän samana. Laskennassa ei ole otettu huomioon putkien vanhenemisen tuomaa vaikutusta eristeiden lämmönjohtavuuteen. Laskenta on tehty vuoden keskiarvo lämpötiloilla meno- ja paluuputkien sekä maaperän lämpötiloissa, jolla on myös epätarkkuutta aiheuttava vaikutus.

Vaasan kaukolämpöverkossa on 19 eri putkikokoa ja 12 erilaista kanavatyyppiä, joiden lämpöhäviöt tulisi kaikki laskea eri tavalla. Kanavatyyppit voidaan kuitenkin jakaa kolmeen päätyyppiin, jotka ovat betonielementtikanava, Mpuk ja 2Mpuk. Kyseiset kanavatyyppit ovat esitettynä kuvassa 5. Tässä työssä laskennan yksinkertaistamiseksi tuo jako on tehty. Tämän työn tarkoituksena ei ole tarkka lämpöhäviöiden määrittäminen, vaan tarkoituksena on selvittää lämpöhäviöiden suhteellisen pienentymisen jos kaukolämmön paluueden lämpötilaa lasketaan. Tällä tavalla tehty laskenta antaa riittävän tarkan tuloksen lämpöhäviöistä tämän työn tarkoitukseen. Kuva 27 esittää näiden kanavatyyppien suhteellisen osuuden verkosta, ja lämpöhäviöiden suhteellisen jakauman eri kanavatyypeille.



Kuva 27. Vaasan alueen kaukolämpöjärjestelmän kanavatyyppit ja niiden lämpöhäviöt prosenttiosuuksina verkostossa

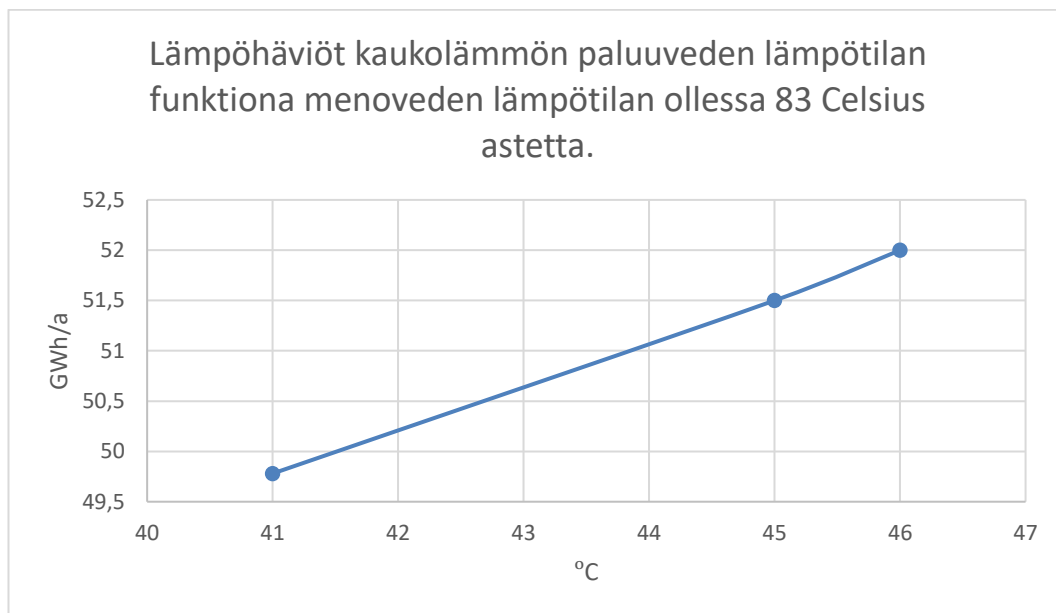
Laskenta suoritettiin laskemalla johtotyyppien lämpöhäviöt yksikössä Wattia per metri (W/m), jonka jälkeen kerrottiin kunkin johtotyypin verkostossa olevalla pituusyksiköllä. Taulukossa 2 on esitetty eri johtotyyppien lasketut lämpöhäviöt metriä kohden maaperän lämpötilan ollessa 6 celsiusastetta, menoveden lämpötilan ollessa celsiusastetta ja paluueden lämpötilan ollessa 46 celsiusastetta.

Taulukko 2. Lämpöhäviöt putkityypeittäin

Lämpöhäviöt [W/m]			
DN	Betoni	Mpuk	2Mpuk
20,0	20,1	10,2	13,1
25,0	23,2	10,8	15,2
32,0	25,3	10,6	16,6
40,0	28,1	12,0	18,5
50,0	30,4	13,4	20,1
65,0	34,1	13,3	22,6
80,0	36,1	14,2	23,9
100,0	37,5	14,1	24,9
125,0	41,7	16,0	27,8
150,0	45,8	18,9	30,6
200,0	48,2	19,9	32,0
250,0	56,7	22,7	38,0
300,0	64,1		43,2
400,0	64,4		43,2
500,0	80,8		55,0
600,0	96,2		66,1

Vuoden keskimääräiset lämpötilat ovat menovedessä 83 celsiusastetta ja paluuedessä 46 celsiusastetta. Olettaen menoveden lämpötilan pysyvän samana, ja laskemalla paluueden lämpötilaa yhden celsiusasteen, vähenee verkoston lämpöhäviöt 0,87 %. 5 celsiusasteen jäähtymä paluuedessä vähentää verkoston lämpöhäviöitä noin 4,3 %. Kuva 28 esittää paluueden lämpötilan vaikutuksen verkoston lämpöhäviöihin. Lämpöhäviöiden pienenemisen myötä säästynyt lämpöenergia on suuruudeltaan 1,4 % siitä

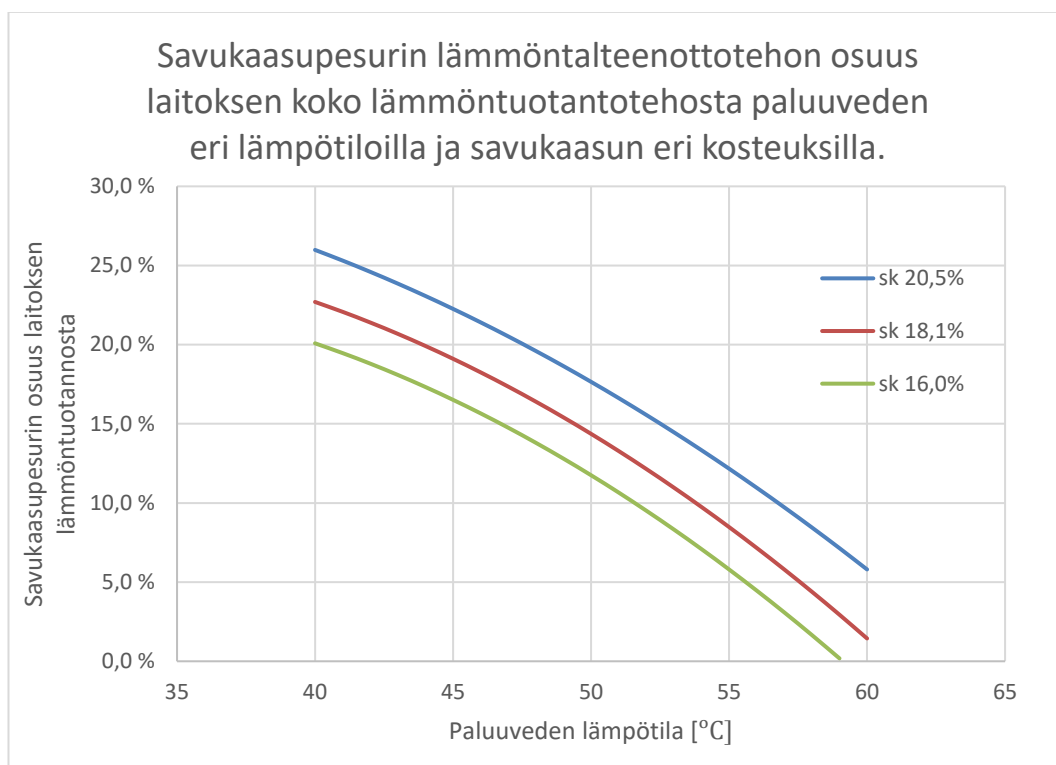
energiämäärästä, joka paluuedestä on otettu hyötykäyttöön. Näin lämpöhäviösäästöjen osalta jäähtymän arvo on 0,51 €/MWh jos lämpöenergian arvo olisi 35 €/MWh.



Kuva 28. Vaasan kaukolämpöverkoston lämpöhäviöt paluueden lämpötilan funktiona

5.1.3 Lämmön talteenotto savukaasupesurissa

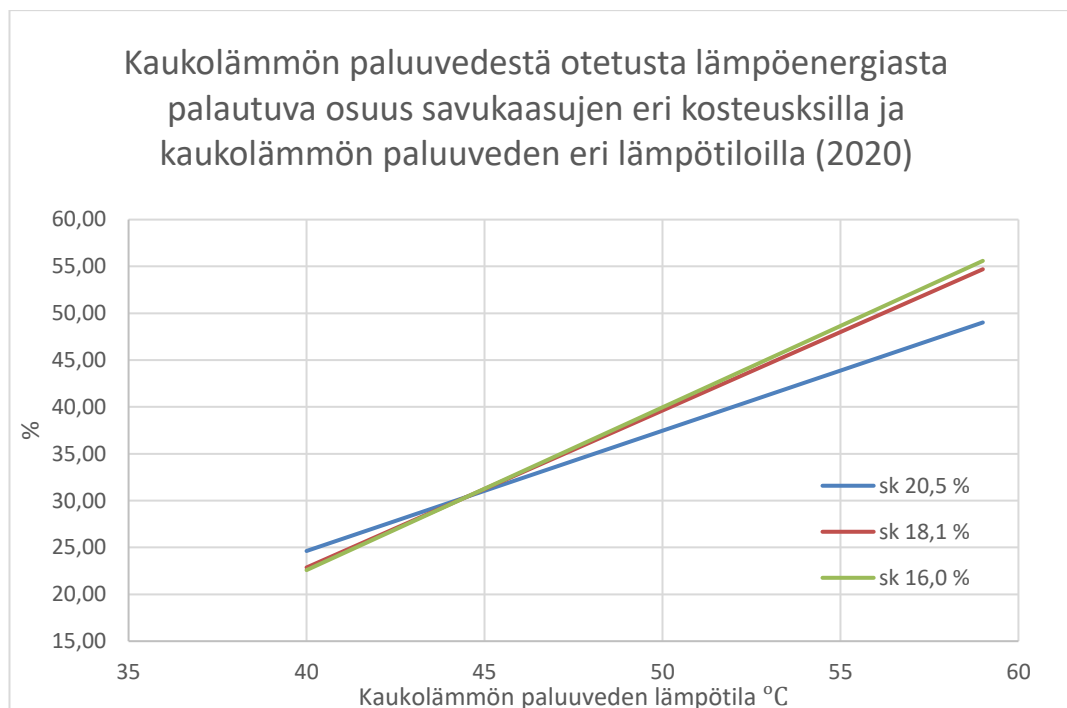
Mustasaaren jätteenpolttolaitoksella on kerätty dataa savukaasupesurista savukaasun eri kosteuksilla ja lämpötiloilla sekä kaukolämmön paluueden eri lämpötiloilla. Savukaasupesurin lämmöntalteenottoteho on riippuvainen juuri näistä tekijöistä. Savukaasujen kosteus vaihtelee noin 16 % ja 21 % välillä. Tässä työssä on valittu tutkia savukaasupesurin lämmön talteenottotehoa kolmella eri savukaasun kosteudella, jotka ovat 20,5 %, 18,1 % ja 16,0 %. Kuva 29 esittää jätteenpolttolaitoksen savukaasupesurin lämmön talteenottotehon näillä mainituilla savukaasun kosteuksilla ja kaukolämmön paluueden eri lämpötiloilla.



Kuva 29. Savukaasupesurin lämmöntalteenottoteho savukaasun eri kosteusprosentteilla ja kaukolämmön paluuveden lämpötiloilla

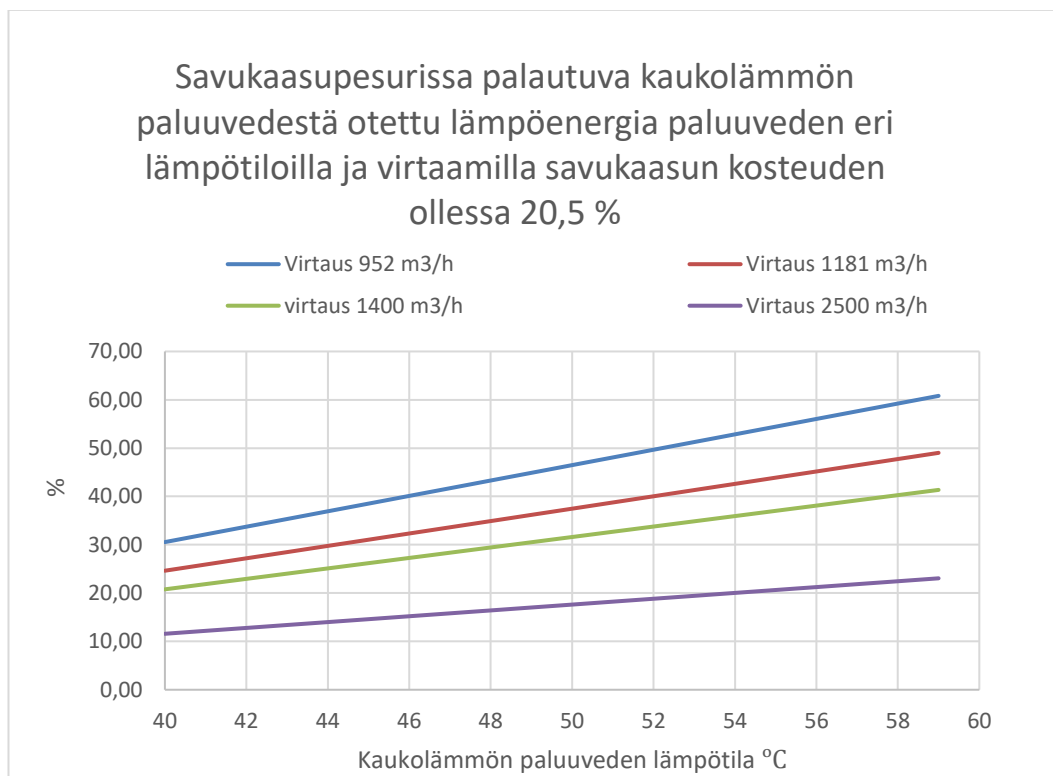
Kuten kuva 29 havainnollistaa, savukaasujen kosteus ja kaukolämmön paluuveden lämpötila vaikuttavat savukaasupesurin lämmön talteenottotehoon. Savukaasujen kosteus on riippuvainen polttoaineen kosteudesta, jonka tarkempi analysointi rajataan tämän työn ulkopuolelle. Kaukolämmön paluuveden lämpötila riippuu järjestelmän ajotavasta, asiakkaiden kaukolämpölaitteista kuten luvussa 3 kerrotaan, ja sitä voidaan alentaa luvussa 4 esitetyillä tavoilla. Kun luvussa 4 esitetyillä tavoilla hyödynnetään kaukolämmön paluuvettä, on sillä paluuveden lämpötilaa viilentävä vaikutus. Virtauksen määrästä, veden ominaislämpökapasiteetista ja ajasta riippuen paluuveden lämpötila laskee hyödynnettyä energiayksikköä kohden. Laskenut paluuveden lämpötila parantaa savukaasupesurin lämmön talteenottotehoa, ja näin osa käytetystä lämpöenergiasta palautuu ”ilmaiseksi” savukaasupesurissa. Kuva 30 havainnollistaa vuonna 2020 kertyneen datan perusteella, kuinka paljon

käytetystä paluueden energiasta palautuu savukaasupesurissa kaukolämmön paluueden lämpötiloilla ja savukaasujen eri kosteusprosentteilla.



Kuva 30. Savukaasupesurissa palautuva osuus hyödynnetystä paluueden lämpöenergiasta

Kuvasta 30 nähdään, että mitä korkeampi lämpötila paluuedessä on ennen paluueden lämmön hyötykäyttöä, sitä suurempi osuus hyödynnetystä lämmöstä palautuu savukaasupesurissa. On todettu, että paluueden lämpötilan lasku saa savukaasupesurin lämmön talteenottotehon parantumaan. Energiämäärä, joka vaaditaan paluueden lämpötilan laskemiseen jonkin halutun verran, on riippuvainen virtauksen määrästä. Tästä johtuen virtauksella on olennainen vaikutus siihen, kuinka suuri osa paluuedestä otetusta lämpöenergiasta palautuu savukaasupesurissa. Kuva 31 esittää virtauksen vaikutuksen lämpöenergian palautumiseen paluueden eri lämpötiloilla.



Kuva 31. Savukaasupesurissa palautuva kaukolämmön paluvedestä otettu lämpöenergia paluueden eri lämpötiloilla ja virtaamilla savukaasun kosteuden ollessa 20,5%

Koska sääolosuhteet Suomessa vaihtelevat vuodenajan mukaan, ja kaukolämpöjärjestelmän ajotapaa ajetaan ulkolämpötilan mukaan, on savukaasupesurin lämmön talteenotto laskettu erikseen jokaiselle kalenterikuukaudelle. Kesällä jätteenpolttolaitoksen tuotantokaasiteetti ylittää kaukolämpöverkon tarpeen, jolloin osa lämmöstä lauhdutetaan ilmaan. Vaasassa käyttöön otettu lämpövarasto on vähentänyt ilmaan lauhdutettavan energian määrää. Myös talvella joudutaan lauhduttamaan hieman energiaa, jotta lauhdutin ei pääse jäätymään, ja siten hajoamaan.

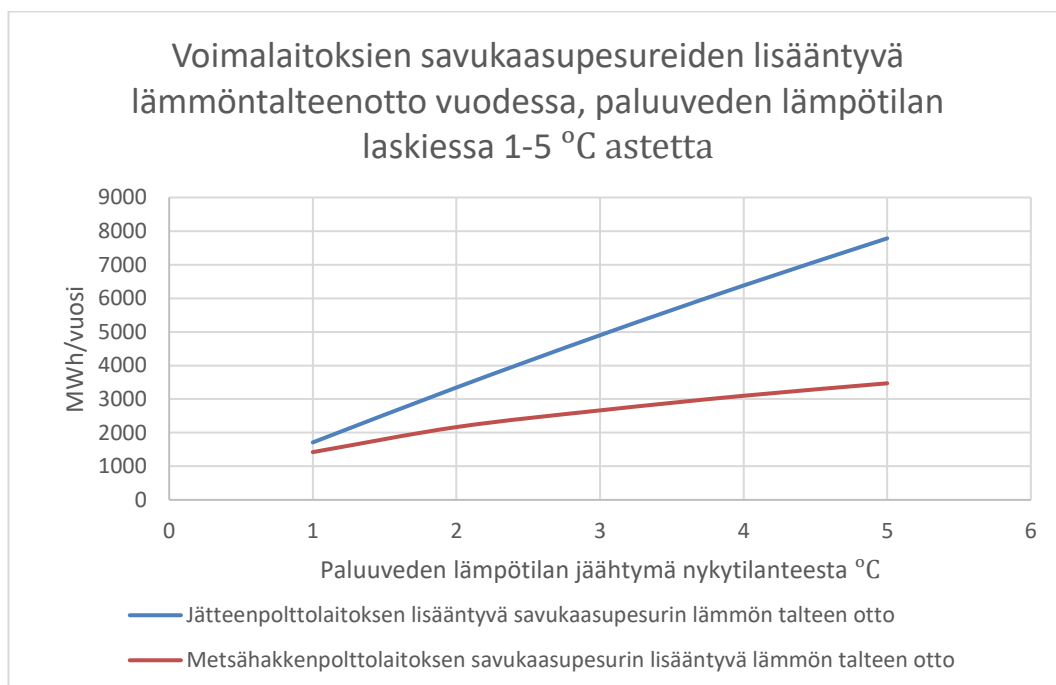
Silloin kun ilmaan lauhdutetaan enemmän lämpötehoa kuin savukaasupesuri pystyy talteen ottamaan, ei savukaasupesurin lämmön talteenottoa kannata käyttää. Myöskin on huomioitava, että jos hukkaan lauhdutettu teho on yhtä paljon tai enemmän suurempi, kuin savukaasupesurissa kaukolämmön paluueden viilentämisellä lisääntynyt teho, ei savukaasupesurin tehon lisääntymisestä ole hyötyä. Tästä johtuen lämmön talteenotossa hyötyä saavutetaan kuuden tai seitsemän kuukauden ajan vuodessa riippuen kevään ja syksyn lämpötiloista, sekä siitä kuinka monta astetta paluueden lämpötilaa saadaan jäähtymään paluueden hyötykäytöllä. Joten jos oletetaan että lämmön talteenotolla saavutetaan hyötyjä 6 kuukauden ajan vuodesta, ja lämmön arvoksi oletetaan 35 €/MWh, on jäähtymän arvo lämmön talteenoton osalta 5,43 €/MWh.

Jos paluueden hyödyntäminen toteutetaan järjestelmässä jossain muualla kuin voimalaitoksella lämpöpumppuliitännällä, on paluueden lämpöä hyödyntävän kohteen sijainnilla verkostossa ratkaiseva merkitys saatavaan hyötyyn lämmön talteenotossa. Vaasassa on lämpöä talteen ottava savukaasupesuri vain jätteenpolttolaitoksella.

Vaasassa jätteenolttolaitoksella tuotetaan kaikki kaukolämpö niin kauan kuin sen kapasiteetti riittää. Kun ulkoilmat kylmenevät, lämmön tarve luonnollisesti kasvaa, ja syntyy tarve metsähakkeen polttolaitokselle. Mitä kylmempi on ulkolämpötila, sitä suuremmalla teholla metsähakkeella tuotetaan kaukolämpöä. Kun molemmat laitokset tuottavat samaan aikaan lämpöä, muuttuvat virtaukset ja niiden suunnat kaukolämpöverkossa sen mukaan, miten lämmöntuotanto jakautuu näiden voimalaitosten välillä. Joten jätteenpolttolaitoksen savukaasupesurin lämmön talteenotolla saavutetun hyödyn määrä on sitä suurempi, mitä useammin paluuedestä otettu lämpöteho otetaan jätteenpolttolaitokselle virtaavasta vedestä.

Tutkitaan tilannetta, jossa verkostossa olisi teoreettinen 85 MW lämmöntuotantokapasiteetillinen metsähakkeen polttolaitos, jossa on savukaasupesuri palamisilmankostuttimella. Kuten kuvassa 16 esitettiin, on

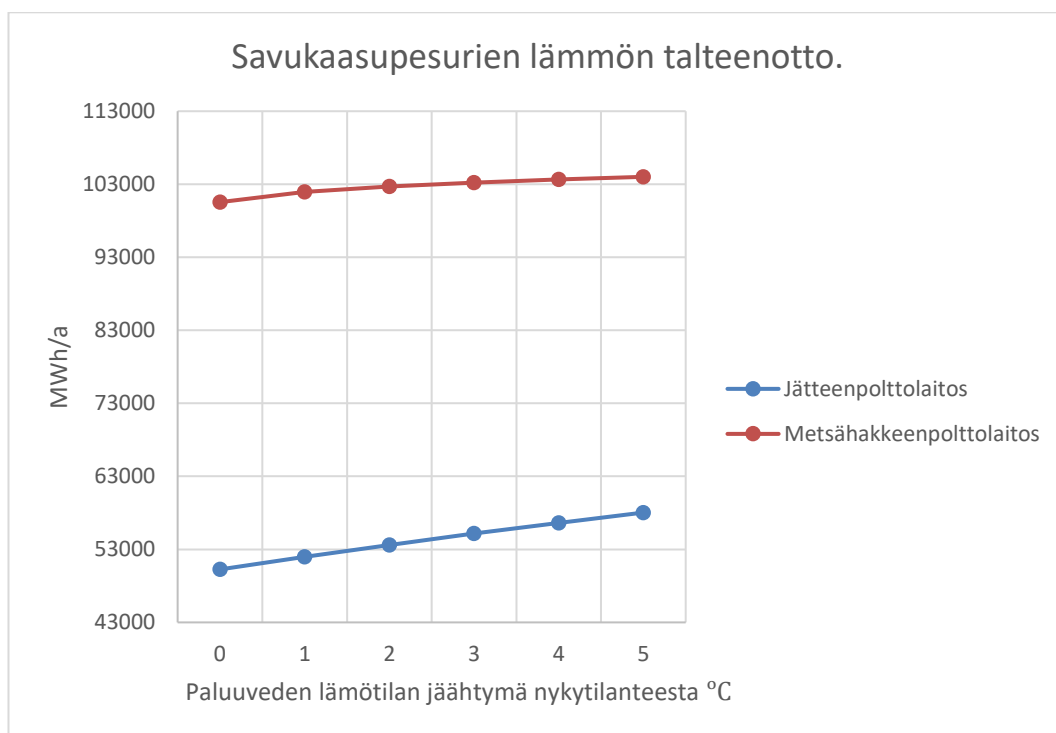
savukaasupesurin lämmön talteenotto teho merkittävästi parempi palamisilmankostuttimen kanssa. Palamisilmankostuttimella savukaasujen kosteus saadaan säädettyä optimaaliselle tasolle, ja verkoston virtaukset ja lämpötilat ovat jo tiedossa, joten voidaan laskemalla arvioida tällaisen savukaasupesurin lämmön talteenotto tehon ja sen parantumisen paluueden lämpötilan laskiessa. Kuvassa 32 on esitetty jätteenpolttolaitoksen savukaasupesurin ja teoreettisen metsähakkeenpolttolaitoksen savukaasupesurin lisääntynyt lämmöntalteenotto kyky energiayksikköinä kaukolämmön paluueden lämpötilan laskiessa.



Kuva 32. Savukaasupesureiden lisääntyvä lämmön talteenotto

Jätteenpolttolaitoksen olleessa ensisijainen lämmöntuottaja, Vaasassa metsähakkeenpolttolaitosta ajetaan tarpeen mukaan, joten sen teho vaihtelee, toisin kuin jätteenpolttolaitoksella, jota ajetaan koko ajan täydellä teholla. Kuvassa 32 on päätetty esittää metsähakkeen polttolaitoksen savukaasupesurin lämmön talteenotto ajotilanteessa, jossa voimalaitosta ajetaan siten, että polttoaineen

syöttöteho on 85 MW. Kuvasta 32 havaitaan, että paluueden lämpötilan laskulla on suurempi vaikutus jätteenpolttolaitoksen savukaasupesuriin. Johtuen metsähakkeenpolttolaitoksen suuremmasta tehosta, ja sen savukaasupesurin yhteyteen asennettavasta palamisilmankostuttimesta, sen savukaasupesurin lämmön talteenotto on silti merkittävästi jätteenpolttolaitosta parempi. Kuva 33 esittää tilanteen, jossa on huomioituna savukaasupesurien lämmön talteenotto ennen paluueden lämpötilan laskua, ja paluueden lämpötilan laskun tuoma vaikutus. Savukaasupesureita on syytä verrata keskenään, koska paluuvettä verkostossa hyödyntävät ratkaisut laskevat vain toiselle voimalaitokselle virtaavan paluueden lämpötilaa. Savukaasupesureiden vertaaminen toisiinsa tuo arvokasta tietoa lämpöyhtiölle, kun paluuvettä hyödyntävien ratkaisujen sijaintia verkostossa suunnitellaan.

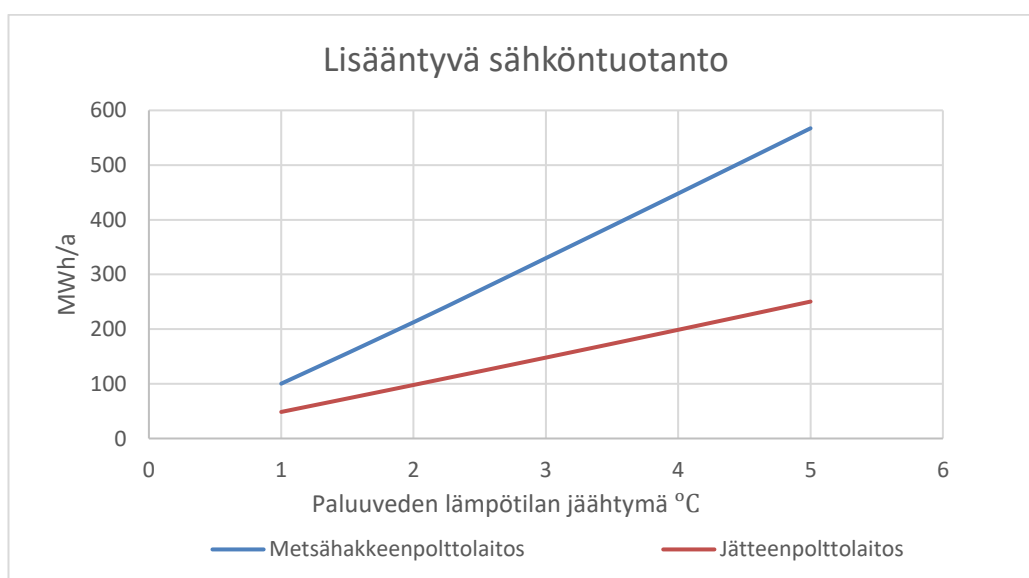


Kuva 33. Savukaasupesureiden lämmön talteen otto

5.1.4 Sähköntuotannon lisääntyminen

Kuten luvussa 3 kerrottiin, 1 celsiusasteen lasku paluueden lämpötilassa nostaa sähkön ja lämmön yhteistuotantolaitoksen sähköntuotantoa 0,1 %. Jätteenpolttolaitoksen sähköntuotanto teho on 15 MW. Tyyillisesti 85 MW lämpöä tuottavalla CHP laitoksella sähköntuotannon teho on noin 29 MW, joten teoreettisen metsähakkeenpolttolaitoksen sähköntuotannon tehoksi on valittu 29 MW.

Molemmilla laitoksilla on lämpöä talteen ottava savukaasupesuri, joten osa paluuedestä otetusta lämpöenergiasta palautuu paluuveteen savukaasupesurissa ennen kattilan lämmönvaihtimia siten, että jos savukaasupesurissa paluuedestä otetusta lämpöenergiasta palautuu 30 %, ja paluueden lämpötila on laskenut 1 celsiusasteen, on lämpötila vastapaineessa enää 0,7 celsiusastetta matalampi, ja sähköntuotanto lisääntyy silloin 0,07 %. Kuva 34 esittää lisääntyvän sähköntuotannon molemmilla laitoksilla jos kaukolämmön paluueden lämpötila laskee 1 - 5 °C astetta ennen savukaasupesuria.

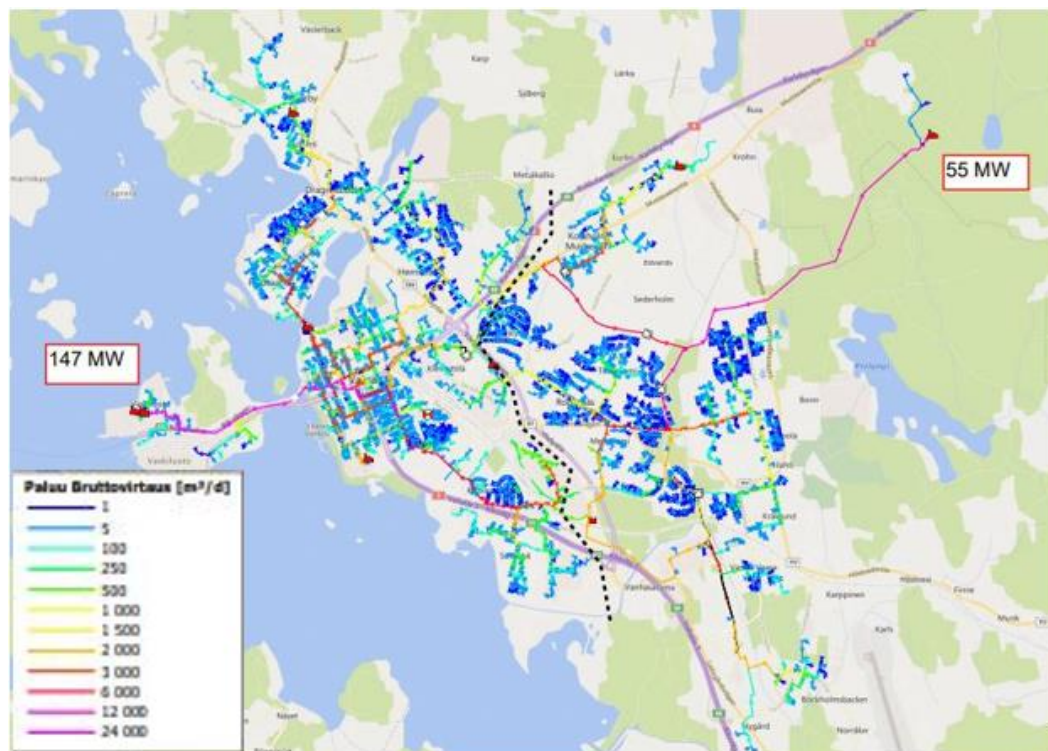


Kuva 34. Lisääntyvä sähköntuotanto voimalaitoksilla

Metsähakkeenpolttolaitoksen sähköntuotantoteho on suurempi kuin jätteenpolttolaitoksen, joten myös lisääntyvä osuus on suurempi. Lisäksi johtuen palamisilman kostuttimesta, metsähakkeenpolttolaitoksen savukaasupesurin lämmön talteenottoteho ei kasva yhtä paljon paluueden lämpötilan ollessa 41 - 46 °C, kuin jätteenpolttolaitoksella, jossa ei ole palamisilman kostutinta, joten paluueden lämpötilan jäähtymä vaikuttaa metsähakkeenpolttolaitoksella enemmän vastapaineeseen, ja sähköntuotanto lisääntyy siellä myös suhteellisesti enemmän.

5.1.5 Virtaussuuntien vaikutus

Virtaussuunnat ja niiden suuruudet verkostossa erilaisissa ajotilanteissa ovat selvitetty Fluidit Heat-nimisellä simulointiohjelmalla. Kuva 35 esittää tilanteen, jossa jätteenpolttolaitos tuottaa 55 MW ja nykyinen metsähakkeenpolttolaitos 147 MW lämpötehoa. Kuvan halki kulkeva musta katkoviiva jakaa verkon siten, että oikealla puolella oleva verkon paluuvesi virtaa jätteenpolttolaitokselle ja vasen metsähakkeenpolttolaitokselle. Mitä lämpimämpi on ulkoilma, sitä vähemmän kaukolämpöä kulutetaan, joten sitä vähemmän metsähakkeella tuotetaan lämpöä, ja sitä suuremman alueen virtaukset kulkevat jätteenpolttolaitokselle, jossa kesäisin Vaasan kaikki kaukolämpö tuotetaan. Paluueden energiaa hyödyntävien ratkaisujen sijainti verkossa on saatavien hyötyjen kannalta tärkeää, koska paluueden hyödyntäminen laskee sen lämpötilaa vain paluuvettä hyödyntävän ratkaisun ja voimalaitoksen väliltä, joten hyödyt pumppaukselle ja lämpöhäviölle muodostuvat vain siltä väliltä verkostossa, ja savukaasupesurin sekä sähköntuotannon vaikutukset tulevat vain sille laitokselle johon paluuvesi virtaa.



Kuva 35. Vaasan kaukolämpöverkon virtaukset tilanteessa, jossa jätteenpolttolaitos tuottaa 55 MW ja metsähakkeenpolttolaitos 147 MW

Paluueden hyödyntämispaikkoja valittaessa on huomioitava virtauksen riittävyys, koska paluuedellä lämmitettävä kohde vaatii saman lämpötehon saavuttamiseksi arviolta 3,5 kertaa enemmän virtausta kuin menovedellä lämmitettävä kohde. Arvio perustuu kaavassa 1 esitettyyn kaukolämpötehon laskentayhtälöön, taulukossa 1 esitettyyn lämmönsiirtimien mitoituksiin ja paluueden menovettä matalampaan lämpötilaan. Jotta verkkoon voidaan liittää paluuvettä hyödyntäviä ratkaisuja, on virtauksen riittävyys varmistettava. Vaasan kaukolämpöverkossa on useita silmukoita, ja tuotantolaitokset sijaitsevat verkoston eri puolilla, joten virtauksien suunnat verkostossa vaihtelevat verkoston ajotavan mukaan. Paluuvettä hyödyntävissä ratkaisuisa on tästä syystä tärkeä välttää luvussa neljä kuvailtu ”hullun kierto”. Vaasan Sähköllä on käytössä Fluidit Heat-niminen simulointiohjelma, josta virtauksien suuruudet ovat nähtävissä

kuvan 35 osoittamalla tavalla, jossa kaukolämpöputkien värit kuvassa kertovat bruttopaluvirtauksen suuruuden yksikössä m^3/d eli kuutiota päivässä.

5.1.6 Polttoaineen säästö

Ratkaisut joissa lämpöpumpulla siirretään lämpöenergiaa kaukolämpöverkon paluuedestä menoveteen voimalaitoksella, suoraan kiinteistöön tai alueelliseen matalalämpöverkkoon, säästävät polttoainetta lämpöpumpun käyttämän sähkön verran, koska lämpöpumpun käyttämä sähkö muuttuu lämmöksi prosessissa. Säästyneen polttoaineen määrä riippuu luonnollisesti siitä, kuinka paljon paluueden lämpötilaa halutaan laskea lämpöpumpulla, ja minkälainen lämpökerroin (COP) lämpöpumpulle saadaan. Koska COP on riippuvainen muun muassa lämpötilaerosta lämpöpumpun höyrystimen ja lauhduttimen välillä siten, että mitä pienempi lämpötilaero on, sitä parempi COP lämpöpumpulle on saatavissa. Mitä pienempi COP arvo on, sitä enemmän lämpöpumppu käyttää sähköä saman lämpöenergian siirtämiseksi, ja sitä enemmän polttoainetta säästyy. Polttoaineen säästö tällä tavalla ei ole kuitenkaan tavoiteltava asia, koska sähkö oletetaan lähtökohtaisesti arvokkaammaksi kuin kaukolämmön polttoaine.

Jos kaukolämmön paluueden lämpötila on $46\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja menolämpötila $83\text{ }^{\circ}\text{C}$, lämpöpumpun teoreettiseksi lämpökertoimeksi saadaan 9,6. Koska lämpöpumput eivät koskaan pysty tuottamaan teoreettista lämpökerrointa, prosessissa tapahtuvat häviöt pienentävät lämpökerrointa noin 40 %, joka tarkoittaa, että todellinen lämpökerroin on noin 5,8. Se tarkoittaa, että 1 MWh lämpöenergian siirtämiseksi paluuedestä menoveteen kuluttaa noin 0,17 MWh sähköä, joka muuttuu myös lämpöenergiaksi.

Lämpöpumpun COP kerroin saadaan paremmaksi luvussa 5 esitettyssä ratkaisussa, jossa kaukolämmön paluueden lämpöenergiaa hyödynnetään alueellisella matalalämpöverkolla, ja matalalämpöverkon lämpötilaa priimataan

lämpöpumpulla. Siinä ratkaisussa lämpöpumpun lauhdutin puolelle tuotettaisiin 83 celsiusasteen sijaan 70 celsiusasteen lämpöistä vettä. Kyseisessä kytkennässä teoreettiseksi lämpökertoimeksi saadaan 14,3, ja jos lämpöpumpun hyötysuhde on 60 %, olisi todellinen COP 8,6.

5.1.7 Lämpövarasto

Lämpövaraston hyödynnettävissä oleva kapasiteetti on riippuvainen matalimmasta mahdollisesta järjestelmään ajettavasta menoveden lämpötilasta sekä paluuveden lämpötilasta. Eli lämpövaraston varastointi kapasiteetti on suoraan verrannollinen meno- ja paluuvesien lämpötilaerosta. Käytettävissä oleva kapasiteetti voidaan laskea jakamalla lämpövarasto metrin korkuisiin kerroksiin ja laskemalla jokaisen kerroksen tilavuus kuutioina. Tämän jälkeen voidaan laskea lämpövaraston käytettävissä oleva kapasiteetti, siten että yhden kerroksen käytettävissä oleva energiamäärä voidaan laskea alla näkyvällä kaavalla 33. Sama lasku toistetaan jokaiselle kerrokselle, jonka lämpötila on korkeampi kuin matalin sallittu kaukolämmön menoveden lämpötila. Lopuksi lasketaan yhteen kerroksien varastointikapasiteetit.

$$\emptyset = (T_1 - T_2) * c * V * \rho \quad (33)$$

missä

\emptyset on kerroksen käytettävissä oleva varastointikapasiteetti [kJ]

T_1 on kerroksen lämpötila [K]

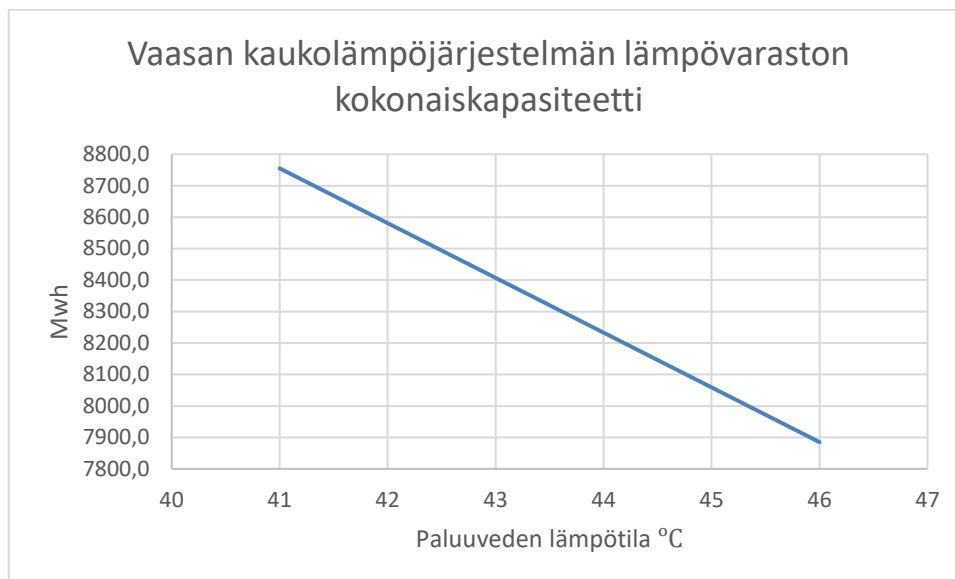
T_2 on kaukolämmön paluuveden lämpötila [K]

c on veden ominaislämpökapasiteetti [kJ/K*kg]

V on kerroksen tilavuus [m³]

ρ on veden tiheys [kg/m³]

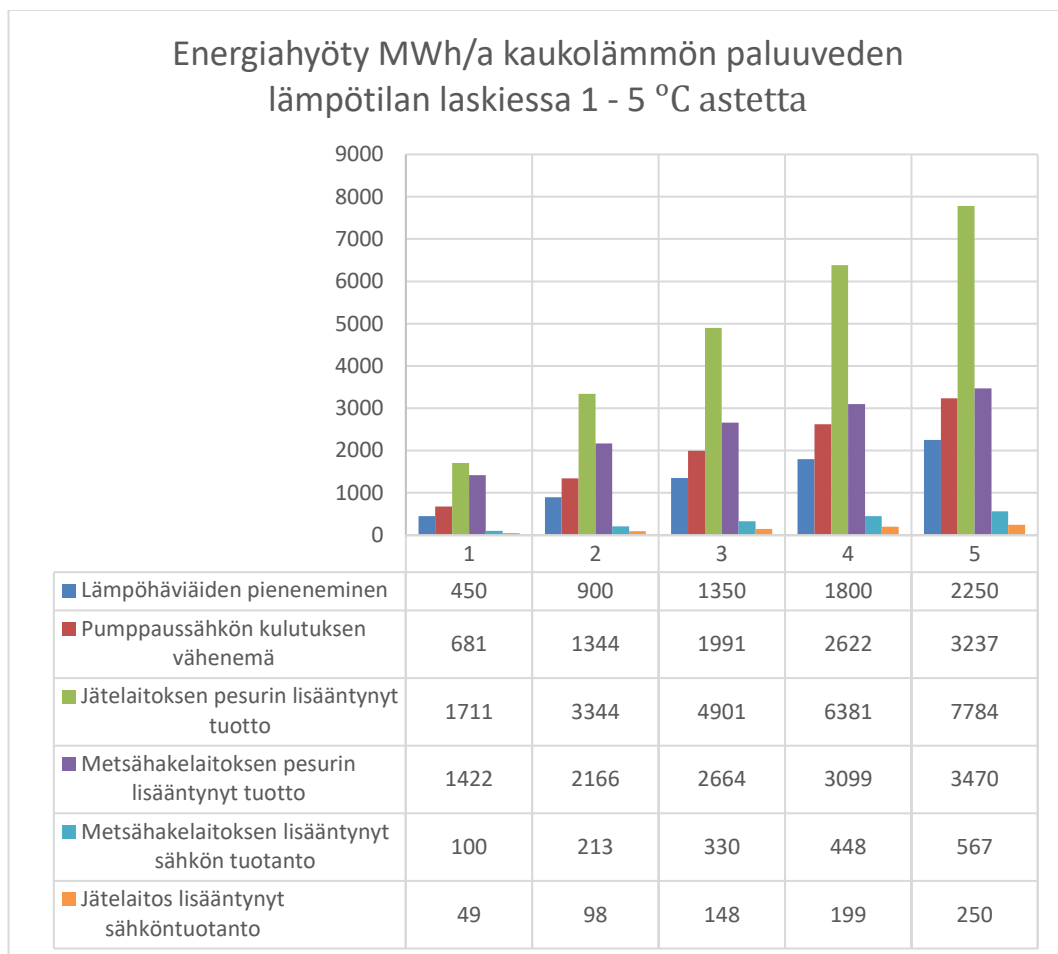
Vaasan kaukolämpöjärjestelmässä on 150 000 m³ kokoinen lämpövarasto. Varaston käytettävissä oleva kapasiteetti paluueden eri lämpötiloilla on esitettyä kuvassa 36.



Kuva 36. Lämpövaraston hyödynnettävissä oleva kapasiteetti

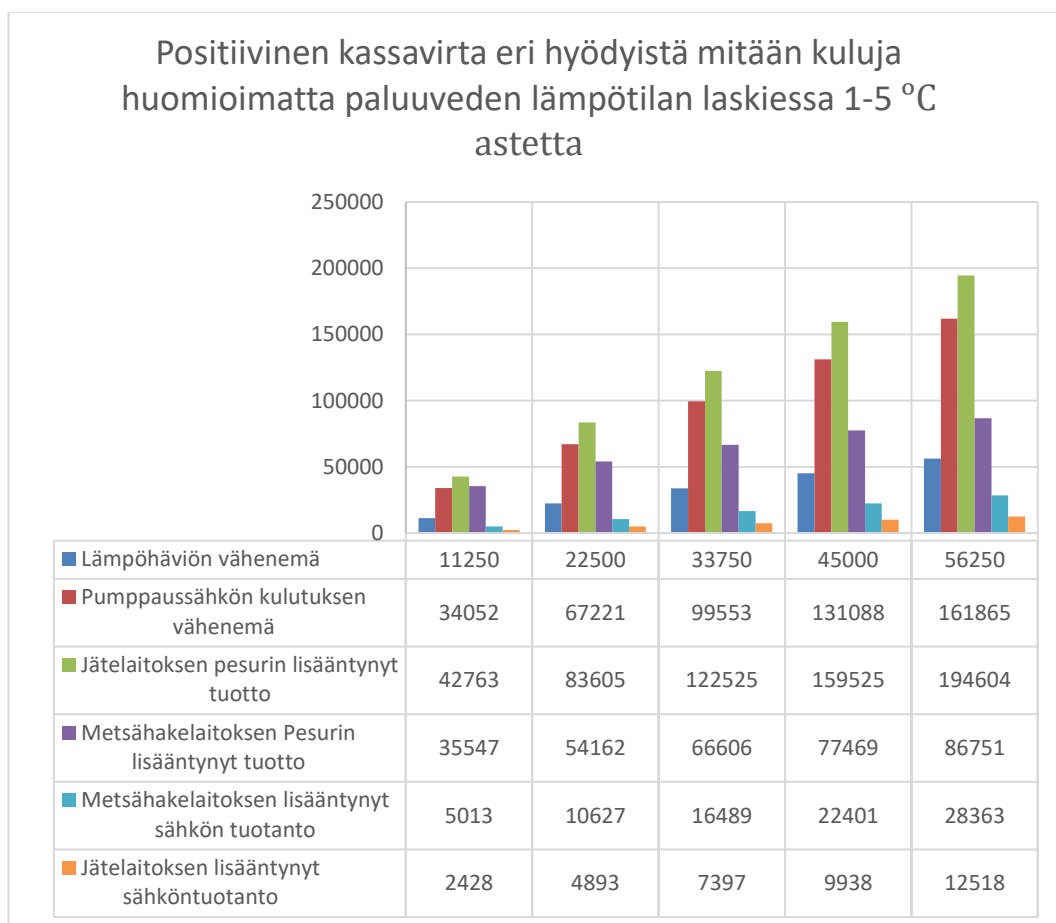
5.1.8 Yhteenveto hyödyistä

Kaukolämmön paluueden lämpötilan laskusta on järjestelmälle monia hyötyjä. Kuvassa 37 on esitettyä paluueden lämpötilan laskiessa 1 – 5 celsiusastetta vuoden aikana kertyvät hyödyt energiayksikkönä. Hyödyt ovat eriteltyä sen mukaan, mistä kaukolämpöjärjestelmän osasta ne saadaan. Kuvasta nähdään, että paluuvettä hyödyntäviä ratkaisuja kannattaa sijoittaa verkossa siten, että mahdollisimman suuri osa hyödyistä kohdistuisi jätteenpolttolaitokselle.



Kuva 37. Yhteenveto paluueden lämpötilan laskusta saatavista hyödyistä

Energiamäärät kertomalla energiahinnoilla saadaan määritettyä paluueden lämpötilan laskusta saatavat hyödyt rahallisesti. Pöyryn 2010 raportin esimerkki energiahintoja käyttämällä lasketut taloudelliset hyödyt paluueden lämpötilan laskiessa 1 – 5 celsiusastetta ovat esitettynä kuvassa 38 (Pöyry 2010). Kuvasta nähdään, että pumppaussähkön kulutuksen vähenemä on rahallisesti merkityksellisempi kuin energiayksikössä.



Kuva 38. Paluueden lämpötilan laskemisesta saatavat taloudelliset hyödyt

Kun paluueden lämpötilan laskusta saatavat taloudelliset hyödyt ovat määritetty, voidaan määrittää paluueden omakustannehinta lämpöyhtiölle. Koska Vaasassa hyödyt ovat riippuvaisia siitä, kummalle voimalaitokselle paluuesi virtaa, on molemmille voimalaitoksille virtaaville paluuesille laskettu omakustannehinta erikseen sekä keskiarvoinen omakustannehinta. Kesällä paluueden hyödyntäminen ei ole kannattavaa, joten paluueden omakustannehinta on kesällä sama kuin menoveden omakustannehinta.

5.2 Paluuvettä hyödyntävät ratkaisut

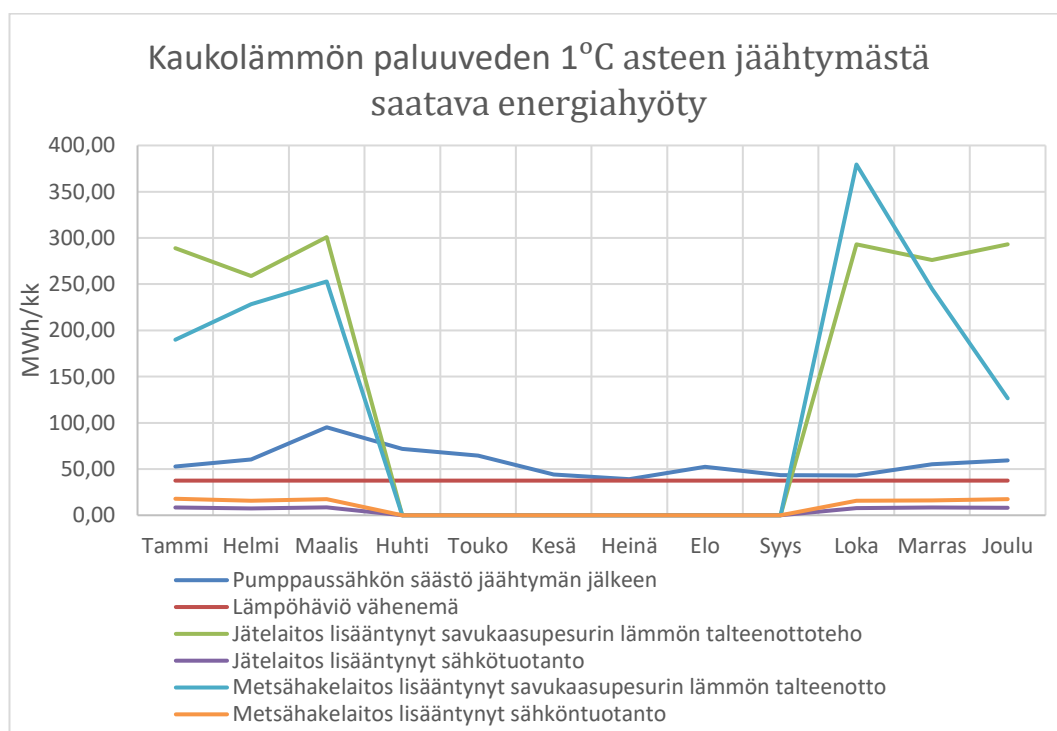
5.2.1 Kiinteistön lämmittäminen kaukolämmön paluuedellä

Ratkaisussa, jossa paluueden lämpöenergiaa hyödynnettäisiin suoraan kiinteistöjen lämmitykseen edellyttää kalliimpaa laiteinvestointia asiakkaalta, koska tavallisten kaukolämpölaitteiden lisäksi asiakas tarvitsee lämpöpumpun paluueden lämpötilan nostamiseksi eli priimaamiseksi riittävälle tasolle. Jotta asiakkaalle kyseinen ratkaisu olisi mielekäs, pitää paluueden lämpötilan laskusta saatu rahallinen hyöty jakaa asiakkaan kanssa, eli kaukolämmön käyttökustannuksen tulisi laskea, johon ratkaisuna olisi luvussa 3 esitetty uudistettu kaukolämpötariffi. Uusi edullisempi kaukolämmön käyttöhintaa parantaisi kaukolämmön asemaa hintakilpailussa muihin lämmitysmuotoihin verrattuna.

Lämpöpumpuinvestoinnin kiinteistöihin voi tehdä myös lämpöyhtiö, jolloin lämpöä voi myydä asiakkaalle samaan hintaan paluuedestä kuin menovedestä, ja ratkaisun hyödyt tulevat silloin lämpöyhtiölle kokonaan. Jos kiinteistössä on lattialämmitys, on kaukolämmön paluueden lämpötila riittävän korkea huoneilojen lämmittämiseen, ja ainoastaan käyttöveden lämpötila pitää lämpöpumpulla nostaa vähintään 70 celsiusasteen lämpötilaan. Kiinteistöjen lämmönkulutuksesta noin 20 % on lämpimän käyttöveden kulutusta, joten lattialämmitteisen kiinteistön lämmittäminen paluuedellä voidaan toteuttaa 80 % pienemmällä lämpöpumpulla kuin patterilämmitteinen kiinteistö.

Kuva 39 esittää ratkaisusta saatavat hyödyt lämpö- ja sähköenergiana kuukausittain. Kuvassa on eritelty, hyödyt riippuen virtaako paluuvesi jätteen- vai metsähakkeenpolttolaitokselle. Lasketut paluueden lämpötila vähentää verkoston painehäviöitä, joten pumppauksen tarve verkostossa vähenee, joten sähkön kulutus vähenee. Matalampi paluueden lämpötila vähentää verkoston lämpöhäviöitä. Savukaasupesurin lämmön talteenottoteho paranee matalammilla kaukolämmön paluueden lämpötilatasoilla, josta ratkaisun suurin hyöty

muodostuu. Lisääntyneestä lämmön talteenotosta ei kuitenkaan ole hyötyä kesäaikana, koska lämmön tuotantoa on muutenkin enemmän kuin kulutusta. Vastapainesähköntuotanto lisääntyy paluuveden lämpötilan laskiessa 0,1 % per laskenut celsiusaste, mutta koska savukaasupesurissa osa lämmöstä palautuu paluuveteen ennen lämmönvaihtimia, savukaasupesuri vähentää sähköntuotannon lisääntymistä.

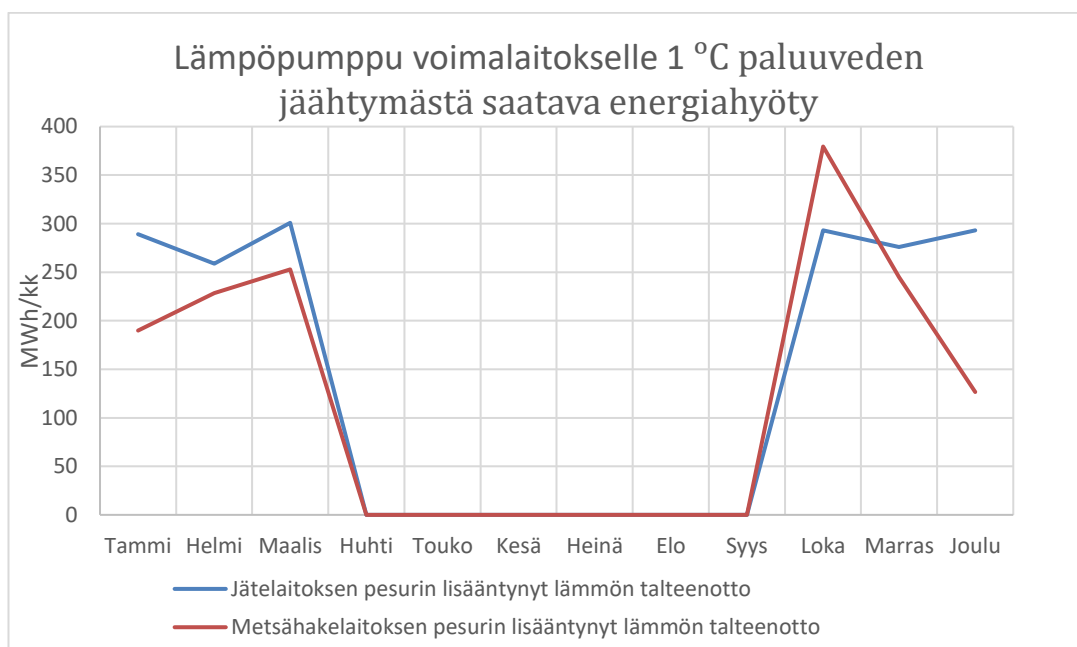


Kuva 39. Kiinteistöjen lämmittämisen paluuedellä tuovat hyödyt kaukolämpöjärjestelmälle

5.2.2 Lämpöpumppu voimalaitokselle savukaasupesurin yhteyteen

Ratkaisu jossa lämpöpumppu sijoitetaan voimalaitokselle siten, että kaukolämmön paluvedestä siirretään lämpöenergiaa paluvedestä menoveteen on luonnollisesti kaukolämpöyhtiön investointi, joten sen tuomat hyödyt tulevat myös kokonaisuudessaan yhtiölle. Koska ratkaisussa paluuv veden lämpötila laskee vasta juuri ennen savukaasupesuria, ei sillä ole vaikutusta verkoston lämpö- ja

painehäviöihin, joten säästöjä ei niistä pääse tulemaan. Jos lämpöpumpun höyrystin sijoitetaan paluovesiputkeen juuri ennen savukaasupesuria, ja lauhdutin sijoitetaan savukaasupesurin ja kattilan väliin, ei ratkaisu lisää myöskään laitoksen sähköntuotantoa. Lämpöpumpun lauhdutin voidaan sijoittaa voimalaitoksella myös kaukolämmön menovesiputkeen vasta kattilan jälkeen, jolloin laitoksen sähköntuotanto lisääntyy, mutta silloin lämpöpumpulle saadaan huonompi COP-lämpökerroin, ja lämpöpumpun sähkönkulutus lisääntyy. Lämpöpumpun käyttämä sähkö muuttuu lämpöenergiaksi kaukolämpöverkkoon, joka säästää laitoksen polttoainekuluja. Ratkaisun hyöty perustuu täysin parantuneeseen savukaasupesurin lämmön talteenottotehoon, joka voidaan lämpöpumpun avulla optimoida halutulle tasolle. Kesällä lämpöpumppua ei kannata käyttää, koska lisälämmölle ei kesäaikana ole tarvetta, ja lämpöpumppu käyttää sähköä, josta tulee kustannuksia yhtiölle. Kuva 40 esittää lämpöpumpun sijoittamisen voimalaitoksille tuoman parantuneen lämmön talteenoton kuukausittain energiayksikkönä tilanteessa, jossa lämpöpumpulla viilennetään paluueden lämpötilaa 1 celsiusasteen verran.



Kuva 40. Lämpöpumpun sijoittaminen voimalaitokselle

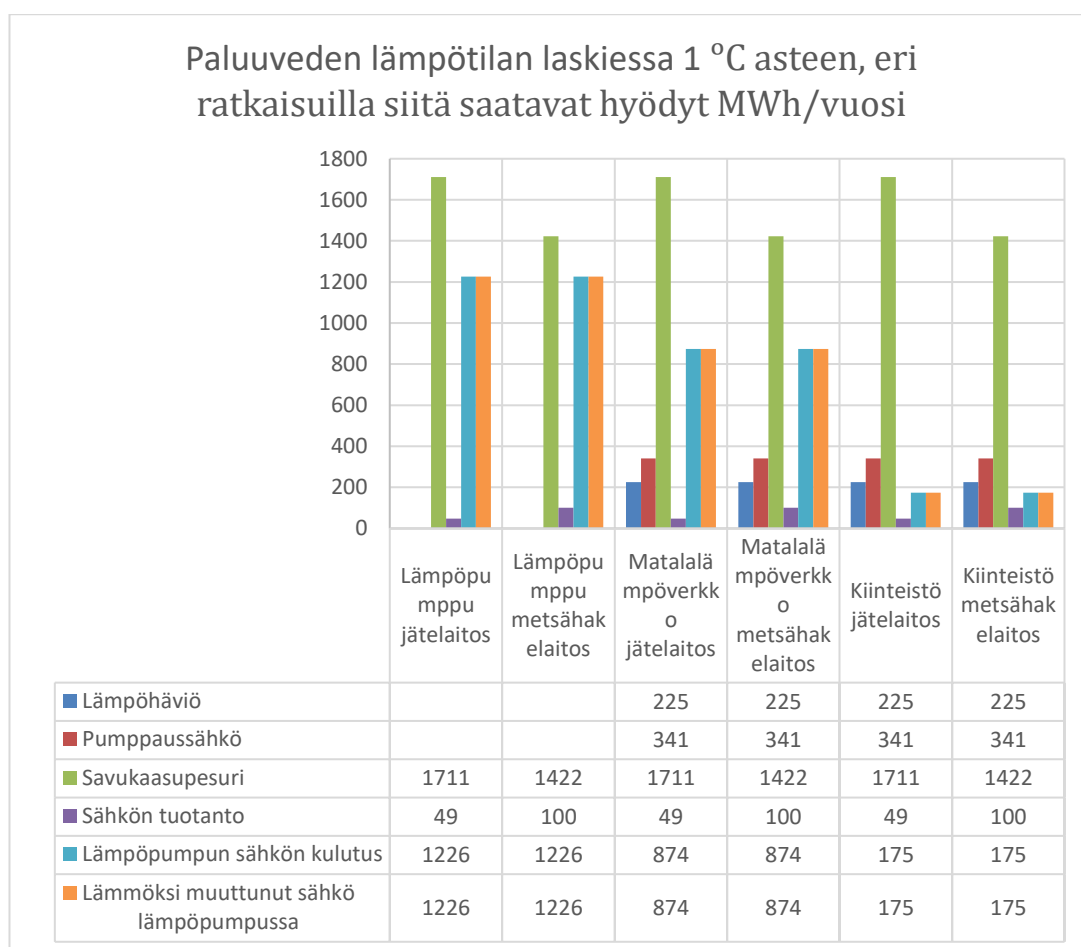
5.2.3 Paluueden hyödyntäminen alueelliseen matalalämpöverkkoon

Ratkaisu jossa kaukolämmön paluueden lämpöenergiaa hyödynnetään alueelliseen matalalämpöverkkoon, lämpöenerginen hyöty koostuu pienentyneistä verkoston lämpöhäviöistä, savukaasupesurin parantuneesta lämmöntalteenottotehosta ja lämpöpumpun käyttämän sähkön lämmöksi muuttumisen aiheuttavasta polttoainesäästöstä. Savukaasupesurin lisääntyneestä lämmön talteenottotehosta ei ole hyötyä kesällä myöskään tässä ratkaisussa. Kesällä alueellinen matalalämpöverkko kannattaa pitää lämpimänä kaukolämmön menovedellä, koska paluueden lämpötilan priimaamiseen lämpöpumpulla matalalämpöverkon vaatimalle tasolle kuluttaa enemmän sähköä kuin paluueden hyödyntämisestä kesällä saavutettaisiin hyötyjä. Mikäli samalla lämpöpumpulla tuotettaisiin alueellista jäähdytystä, olisi tilanne arvioitava erikseen. Sähkön kulutus on tässä ratkaisussa pienempää kuin voimalaitokselle sijoitettavassa lämpöpumpussa johtuen lämpöpumpun paremmasta lämpökertoimesta. Kaukolämmön jakelun pumppauksen tarve vähenee meno- ja paluueden lämpötilaeron kasvamisen johdosta vähentyvien painehäviöiden ansiosta, ja näin pumppaussähkön kulutus vähenee. Jos ei huomioida lämpöpumpun sähkön kulutusta, joka kuitenkin on tapauskohtainen, pätee tähän ratkaisuun samat järjestelmän energiahyödyt kuin kiinteistön lämmittämiseen paluuedellä, jotka ovat esitettyinä kuvassa 39.

5.2.4 Yhteenveto ratkaisuista

Tarkasteltaessa vuoden aikana kertyviä energiahyötyjä tässä työssä tutkituilla ratkaisuilla, todetaan että savukaasupesuri tuo suurimman eron jätteen- ja metsähakkeenpolttolaitosten välille. Ero kiinteistön ja alueellisen matalalämpöverkon välille muodostuu lämpöpumpun sähkön kulutuksesta. Tässä vertailussa kiinteistön ja alueellisen matalalämpöverkon vaikutukset verkoston lämpöhäviöihin ja pumppaussähkön kulutukseen ovat samanlaiset.

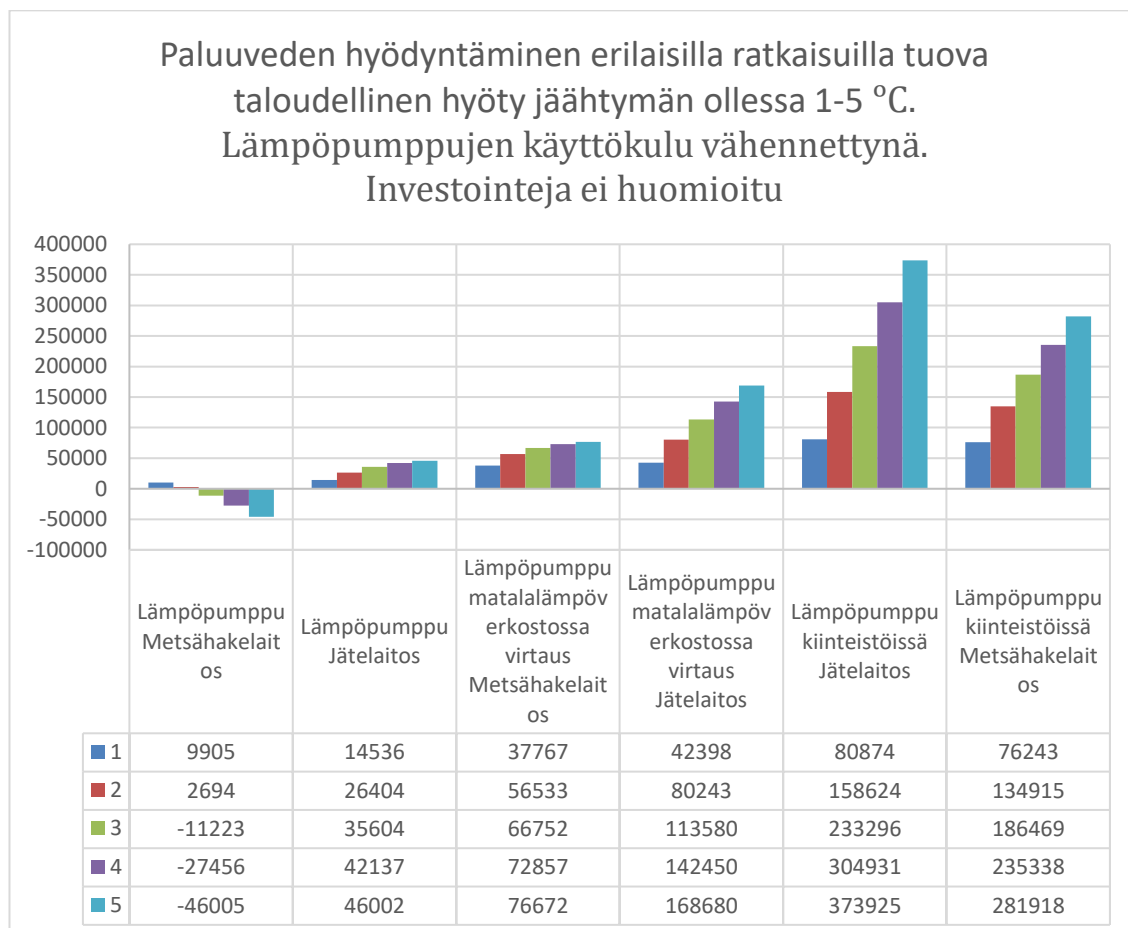
Todellisuudessa vaikutus pumppaukseen ja lämpöhäviöihin on riippuvainen paluuvettä hyödyntävän ratkaisun sijainnista verkostossa. Jos paluuvettä hyödynnetään voimalaitoksella, jää kyseiset hyödyt kokonaan saamatta. Kuvassa 41 on esitetty 1 celsiusasteen paluuveden jäähtymästä saatavat hyödyt esitettynä siten, että hyödyt ovat jaettu käytössä olevan ratkaisun mukaan sekä mistä osasta järjestelmää hyöty saadaan. Lisäksi kuvasta nähdään ratkaisuihin tarvittavien lämpöpumppujen sähkön kulutus.



Kuva 41. Yhteenveto paluuvettä hyödyntävistä ratkaisuista

Tutkittaessa paluuveden jäähtymään johtavien ratkaisujen taloudellista kannattavuutta, kaikki ratkaisut lukuunottamatta lämpöpumppua metsähakelaitokselle osoittautuvat kannattavaksi. Kuvassa 4 on esitetty

yhteenveto ratkaisujen taloudellisista hyödyistä käyttäen Pöyryn 2010 raportin esimerkkihintoja (Pöyry 2010). Vertailussa kuitenkin verkkoon asennettavien lämpöpumppujen sähkön käyttökustannus on normaali kuluttajan sähkön hinta 80 €/MWh.



Kuva 42. Yhteenveto ratkaisujen taloudellisesta kannattavuudesta

Vertailu on tehty perustuen vuoden 2020 kerättyyn dataan. Vertailussa on huomioitu kaikki työssä käsitellyt hyödyt ja lämpöpumppujen sähkön kulutus sekä vuodenaikojen vaihtelun aiheuttama vaihteleva kaukolämpöjärjestelmän ajotapa. Lisäksi on tehty oletukset, että kesän lämpiminä kuukausina kun paluueden hyödyntäminen aiheuttaisi enemmän kuluja kuin hyötyjä, ei paluuvettä hyödynnetä, ja ratkaisu jossa paluulämpöä käytetään suoraan kiinteistöön on

oletettu, että kiinteistössä on lattialämmitys, ja vain käyttöveden lämpötilan nostoon tarvitaan lämpöpumppu, joten kiinteistöjen lämmitys paluuedellä kuluttaa vain 20 % siitä sähköstä, joka tarvittaisiin patterilämmitteisen kiinteistön lämmitykseen. Patterilämmitteisen kiinteistön taloudellinen hyöty tässä tarkastelussa olisi saman suuruinen kuin hyöty alueellisesta matalalämpöverkosta. Tarvittavien investointien kuluja ei ole huomioituna tässä tarkastelussa, koska ne ovat aina tapauskohtaisia. Ratkaisujen taloudelliseen kannattavuuteen vaikuttaa investointien ja energiamäärien hyötyjen lisäksi olennaisesti energiahinnat. Tässä työssä on tulokset esitetty siten, että energia on saman hintaista molemmilla Vaasassa olevilla voimalaitoksilla.

Lämpöpumpun sijoittaminen metsähakkeenpolttolaitoksen savukaasupesurin yhteyteen ei ole taloudellisesti kannattavaa, koska savukaasupesurin lämmön talteenotto tehostuu niin paljon palamisilmankostuttimen vaikutuksesta, että kaukolämmön paluueden lämpötilan lasku ei sitä enää merkittävästi lisää. Lämpöpumpun kuluttama sähkö on niin paljon arvokkaampaa kuin pieneksi jäävä lämpöenergian lisääntyminen, että kokonaisvaikutus jää negatiiviseksi. Vaikka 1 celsiusasteen paluueden lasku tuokin kyseisessä ratkaisussa positiivisen kassavirran, niin se jää kuitenkin niin pieneksi, että investointi kyseiseen ratkaisuun ei ole kannattava. Taloudellisesti kannattivimmaksi osoittautui kiinteistön lämmittäminen kaukolämmön paluueden lämpöenergialla, koska siinä ratkaisussa järjestelmä saa kaikki työssä esitetyt hyödyt, ja ratkaisussa tarvittavan lämpöpumpun sähkön kulutus on merkittävästi vähäisempää kuin muissa esiteltyissä ratkaisuissa.

6 JOHTOPÄÄTÖS JA POHDINTA

6.1 Johtopäätös

Alueellinen matalalämpöverkko osoittautui kannattavaksi ratkaisuksi, mutta se edellyttää verkostoinvestointeja, joita ei ole kannattava tehdä ellei kaukolämpöverkkoa muutenkin laajennettaisi. Jos kaukolämpöverkkoa laajennetaan, ja alueellinen matalalämpöverkko rakennetaan muoviputkista, tulee verkon investoinnista edullisempi kuin perinteisen kaukolämpöverkon rakentaminen. Ratkaisu on siis sopiva esimerkiksi uusille asuinalueille. Alueellisen matalalämpöverkon käyttöönotto mahdollistaa järjestelmälle kaikki työssä esitetyt hyödyt.

Lämpöenergian hyödyntäminen paluuedestä kiinteistöön olisi parhaiten tuottava ratkaisu lämpöyhtiölle, koska sillä saavutetaan kaikki työssä esitetyt hyödyt järjestelmälle, ja sen vaatiman lämpöpumpun sähkön kulutus on 80 % pienempi kuin matalalämpöverkkoratkaisussa. Tämä vaatii kuitenkin lattialämmitteisen kiinteistön. Tällaisia kiinteistöjä rakennetaan nykyisin yhä enemmän. Jos kiinteistössä on tavallinen patterilämmitys, on siitä saatavat hyödyt yhtiölle yhtä suuret kuin alueellisesta matalalämpöverkosta. Jotta paluueden lämpötila saadaan laskemaan 1 celsiusasteen, vaatii se Vaasan kaukolämpöjärjestelmään 60 paluuvettä hyödyntävää kerrostaloa.

Jos asiakas tekee itse investoinnin kiinteistönsä tulevaan käyttöväetä priimaavaan lämpöpumppuun, tulisi paluueden lämpöenergiaa myydä kyseisille asiakkaille edullisempaan hintaan, jotta investoinnin tekevä asiakas saisi osuuden sen tuomista hyödyistä. Taloudellisen hyödyn jako asiakkaille vaatisi uuden termin mukaan ottamisen kaukolämpötariiffiin. Uuden tariffin käyttöönotto vaatisi siirtymäajan, ja ratkaisua ei voitaisi ottaa käyttöön ainakaan heti. Ratkaisu parantaisi kaukolämmön asemaa hintakilpailussa muihin lämmitysratkaisuihin

verrattuna, mutta Vaasassa kaukolämmön hinta on muutenkin edullisimmasta päästä Suomessa, joten hintakilpailua ei välttämättä kannata priorisoida tärkeimmäksi tekijäksi Vaasassa ratkaisun käyttöönottoa päätettäessä.

Lämpöpumpun sijoittaminen voimalaitokselle kytkennällä, jossa paluueden lämpötilaa lasketaan halutulle tasolle ennen savukaasupesuria siirtämällä lämpöenergia kaukolämmön paluuedestä menoveteen tuottaa hyötyä vain parantuneena savukaasupesurin lämmön talteenottotehona. Savukaasupesurin lämmön talteenottotehon parantumisesta on hyötyä vain puolet vuodesta, mutta ratkaisu osoittautui silti kannattavaksi jätteenpolttolaitoksella, mutta metsähakkeenpolttolaitoksella, jossa paluueden lämpötilan alentaminen ei lisää merkittävästi savukaasupesurin lämmön talteenottotehoa, ei ratkaisu ole taloudellisesti kannattavaa työssä esitetyillä energiahinnoilla, johtuen suuresta polttoaineen ja sähkön hintaerosta.

Ratkaisujen taloudellisen kannattavuuden suuruus ja vertautuminen toisiinsa ovat erittäin riippuvaisia sähkön, polttoaineiden ja verkostossa olevan lämpöenergian hinnasta. Lisäksi on huomioitava, että jos järjestelmässä lämmön myynti ja tuotto ovat eri yhtiöiden liiketoimintaa, on lämmön myyjän ja tuottajan välisestä sopimuksesta kiinni, että miten taloudellinen hyöty jakaantuu niiden kesken. Paluueden omakustannehinta on korkeampi kesällä, koska silloin sen hyödyntäminen ei tuo taloudellista hyötyä yhtä paljon kuin talvella. Kaukolämmön paluuvettä ei tästä syystä kannata kesällä hyödyntää.

Suurin hyöty paluueden lämpöenergian hyödyntämisestä muodostuu savukaasupesurin parantuneesta lämmön talteenottotehosta. Savukaasupesurin lämmön talteenottotehoon ja sen parantumiseen vaikuttavia tekijöitä ovat savukaasujen kosteus, kaukolämmön paluueden lämpötila ja virtaus. Savukaasupesurin tuoma hyöty olisi järjestelmän virtauksien ja lämpötilojen vuoksi kesällä suurempi kuin talvella, mutta kesällä siitä ei ole hyötyä kaukolämpöjärjestelmälle, koska lämpöä joudutaan jo muutenkin lauhduttamaan ilmaan kesäisin. Lämpövarasto kuitenkin vähentää lauhdutettavan energian

tarvetta. Koska paluueden matalampi lämpötila lisää lämpövaraston kapasiteettia, pidentää se myös aikaa jolloin savukaasupesurin parantuneesta lämmön talteenotosta on hyötyä.

Kaikki ratkaisut osoittautuivat kannattaviksi, eivätkä ole toisiaan poissulkevia. On kuitenkin huomioitava, että jos paluueden lämpöenergiaa hyödynnetään monessa paikassa, on varmistettava, että jokaiseen kohteeseen on saatavilla riittävästi energiaa kaukolämpöjärjestelmän kaikissa ajotilanteissa. Toinen huomioitava asia on savukaasupesurin tehon logaritminen kuvaaja, eli paluueden lämpötilan laskiessa, tietyssä pisteessä lämmön talteenoton paraneminen alkaa hidastumaan, ja paluueden hyödyntämisestä tulee kannattamatonta kun paluueden lämpötilan laskemisen kustannuksesta tulee suurempi kun saadun hyödyn arvosta.

Lämpöhäviöt ovat Vaasan kaukolämpöjärjestelmässä pienemmät kuin muissa Suomen kaupungeissa keskimäärin. Vanhoilla betonielementtikanaavilla on suhteessa huomattavan suuri osuus Vaasan verkoston lämpöhäviöistä, ja saneerauksen tarpeen tullessa on kannattavaa korvata ne Mpuk- tai 2Mpuk-kanavatyypeillä. Myös lämpöhäviöiden pieneneminen paluueden lämpötilan laskiessa käyttäytyy logaritmisesti siten että mitä enemmän paluueden lämpötilaa laskee, sitä pienemmäksi lämpöhäviöiden pientyminen muuttuu laskenutta Celsius astetta kohden.

Paluueden lämpötilan laskiessa, lämpötilaero kaukolämmön meno- ja paluueden välillä kasvaa, jonka seurauksena verkoston painehäviöt pienenevät. Pienemmät painehäviöt vähentävät pumppauksen tarvetta, ja säästöjä syntyy sähkökulutuksessa. Kuten savukaasupesurin lämmön talteenotossa ja lämpöhäviöissä, myös pumppauksen tarve käyttäytyy logaritmisesti siten, että mitä enemmän paluueden lämpötilaa muuttaa, sitä pienempi suhteellinen muutos tapahtuu pumppauksen tarpeelle.

Hyötyjen määrittämiseen on niin monta erillistä muuttujaa, ja laskettaessa on tehty melko paljon oletuksia, niin saatuja tuloksia ei voi pitää täysin tarkkoina. Vuodet eivät ole myöskään kopioita toisistaan, joten vaikutukset ovat joka vuosi hieman eri suuruiset. Kaikki olennaisimmat tekijät ovat huomioitu, ja työn tulokset ovat riittävän tarkat työn tarkoitukseen.

6.2 Pohdinta

Opinnäytetyön tavoite oli määrittää kaukolämmön paluuveden lämpötilan laskemisella saavutettavat hyödyt. Oletettavia hyötyjä olivat savukaasupesurin lämmön talteenottotehon paraneminen, vastapainesähkötuotannon rakennesuhteen paraneminen, lämpöhäviöiden väheneminen, pumppaussähkön kulutuksen väheneminen, hukkalämpöjen parempi hyödyntäminen, sekä paluuveden arvon määrittäminen. Aihe ja tavoitteet todettiin erittäin laajaksi kokonaisuudeksi, joten työtä rajattiin siten, että kaikkia hyötyjä ei laskettu, vaan osa sisällytettiin työhön referoiden. Työtä tehdessä havaitsin merkittävän lisähyödyn oletettavien hyötyjen lisäksi, joka on lämpövaraston kapasiteetin suureneminen.

Työssä referoitiin luotettavia kotimaisia ja kansainvälisiä lähteitä tietoperustaksi, joista tehtiin johtopäätöksiä ja laskuja, joilla työssä edettiin kohti tavoitteita. Pilottihankkeeseen ei työssä ollut mahdollisuutta, joten työhön konfiguroitiin laskentamalli, joka verifioitiin vertaamalla laskennan tuloksia mitattuihin arvoihin. Laskentamalliin lisättiin paluuvettä hyödyntäviä ratkaisuja, jotka laskevat paluuveden lämpötilaa, ja laskemalla selvitettiin saavutettuja hyötyjä savukaasupesurin lämmön talteenottotehon paranemisen, lämpöhäviöiden pienenemisen ja pumppaussähkön kulutuksen vähenemisen osalta. Sähkötuotannon lisääntyminen vastapainevoimalaitoksessa otettiin hyötyihin mukaan referoiden Pöyryn tekemää tutkimusta. Näillä menetelmillä saatiin paluuveden lämpötilan laskemisesta aiheutuvat hyödyt energiamäärinä.

Kertomalla energiamäärät sähkön, lämmön ja polttoaineen arvoilla, saatiin selvitettyä myös rahallinen hyöty, ja rahallinen hyöty vähennettynä energian tuotantokustannuksesta häviöt huomioituna määritettiin arvo paluvedelle.

Opinnäytetyö vastasi erinomaisesti tavoitteisiinsa. Parannettavaa olisi kuitenkin ainakin siinä, että vastapainesähköntuotannon hyödyn olisi voinut myös itse laskea voimalaitoksen höyryn massavirtojen ja entalpioiden avulla, mutta niitä tietoja ei ollut saatavissa tähän työhön, ja muutenkin laaja työ olisi laajentunut entisestään. Vastapainesähköntuotannon muuttumista kaukolämmön paluueden lämpötilan laskiessa olisi kuitenkin mielekästä tutkia jatkossa tarkemmin. Paluueden lämpötilan lasku mahdollistaa paremman lämpökertoimen saavuttamisen lämpöpumppuun matalalämpöisiä hukkalämpöjä hyödynnettäessä, mutta sen tutkiminen rajattiin tässä työssä ulkopuolelle, vaikka liittyy ehdottomasti aiheeseen, ja kannattaa tutkia tulevaisuudessa. Pois rajautuneiden tutkimuskohteiden vastapainoksi työhön otettiin mukaan arvokas lisähyöty, eli lämpövaraston kapasiteetin suureneminen.

Paluueden lämpöenergian hyödyntämistä haluttiin tutkia kolmella erilaisella ratkaisulla, jotka ovat lämpöenergian siirto paluuedestä menoveteen voimalaitoksella lämpöpumppukytkennällä, kiinteistöjen lämmittäminen paluueden lämpöenergialla ja alueellisen matalalämpöverkon lämmittäminen paluueden lämpöenergialla. Työssä tutkittiin kaikki kolme ratkaisua, kuvattiin niiden toimintaperiaate, ja määritettiin hyödyt jokaiselle ratkaisulle erikseen. Voi todeta, että näihin tavoitteisiin päästiin erinomaisesti.

Työn laskentamalli ei varmasti anna tarkkoja tuloksia, johtuen oletuksista, joita laskennassa on tehty. Työn varsinainen tavoite oli määrittää, ja koota hyödyt dokumentille, eikä syventyä yhteen hyötyyn ja päästä mahdollisimman tarkkaan lopputulokseen. Tarkempiin laskennan tuloksiin olisi mahdollista päästä käyttämällä simulointiohjelmaa, mutta tämän työn tavoitteiden kannalta se ei ollut olennaista.

Laskentamallissa lämpötilan on oletettu laskevan tasaisesti koko verkostossa, joka olisi edellytys, että lämpöhäviöiden pientyminen ja pumppaussähkön kulutuksen vähenemistä koskevat laskut olisivat tarkasti paikkansa pitäviä. Näin ei kuitenkaan todellisuudessa ole, vaan lämpötila laskee paluulämpöä hyödyntävän ratkaisun ja voimalaitoksen väliseltä putkiosuudelta, joten todelliset säästöt lämpöhäviöissä ja pumppaussähkössä riippuvat paluuvettä hyödyntävien kohteiden sijoittelusta järjestelmässä.

Sijoittelussa on lisäksi olennaista huomioida, mihin voimalaitokseen paluuvesi virtaa. Jos paluuvesi, jota on hyödynnetty virtaa voimalaitokselle, jossa ei ole lämpöä talteen ottavaa savukaasupesuria, jää hyöty lisääntyneestä lämmön talteenotosta saamatta, ja lisää polttamisen tarvetta voimalaitoksella saman lämpötehon tuottamiseksi, mutta lisää laitoksen sähköntuotantoa laitoksen rakennesuhteen parantumisen johdosta. Eri laitoksilla olevat savukaasupesurit tuovat eri suuruisen hyödyn alentuneesta paluueden lämpötilasta. Työssä todettiin paluuedestä hyödynnetystä lämpöenergiasta savukaasupesurissa palautuvan osuuden olevan riippuvainen sähkön ja kaukolämmön yhteistuotantolaitoksen tehosta, paluueden virtauksen suuruudesta, ja lämpötilasta sekä savukaasujen lämpötilasta ja kosteudesta.

Työssä esitettiin palamisilmankostuttimen vaikutus teoriassa savukaasupesurin lämmön talteenottotehoon, ja arvioitiin sen vaikutus teoreettisen metsähakkeenpolttolaitoksen savukaasupesuriin. Todettiin, että palamisilmankostuttimesta saadaan merkittävä lisähyöty savukaasupesurin lämmön talteenotolle, mutta vähentää paluueden lämpötilan laskusta saatavaa hyötyä savukaasupesurissa.

Koska paluueden lämpötilan laskeminen alentaa verkoston painehäviöitä, mahdollistaa se järjestelmän ajamisen matalammalla menoveden lämpötilalla. Menoveden lämpötilan laskulla on varmasti monia hyötyjä kaukolämpöjärjestelmälle, joka mahdollistaa uuden optimoinnin järjestelmän ajotavalle, ja kokonaishäviöiden optimoinnille.

Kolmesta tutkitusta ratkaisusta kiinteistöjen lämmitys paluuedellä osoittautui tuovan suurimman positiivisen vuosittaisen kassavirran. Työssä ei tutkittu investointikustannuksia, mutta jo yhden Celsius-asteen lämpötilan laskuun tarvittaisiin paljon kiinteistöjä, joka tarkoittaisi paljon lämpöpumppuja, joten investointikulu olisi merkittävä.

Alueellinen matalalämpöverkko osittautui myös kannattavaksi, mutta ratkaisu jossa pitää investoida uuteen verkkoon, lämmönsiirtimiin ja lämpöpumppuun, vaatii varmasti suurimman investoinnin. Alueellisen matalalämpöverkon käyttöönotto vaatiikin uuden asuinalueen mukaan tulemisen järjestelmään, että se kannattaa. Tulevaisuudessa kaukolämpöverkon laajentamista ajatellen kannattaa harkita alueellisen matalalämpöverkon käyttöönottoa.

Työn aihe on erittäin ajankohtainen, koska työ kehittää kaukolämpöjärjestelmän energiatehokkuutta ja taloudellista kannattavuutta. Molemmat ominaisuudet ovat erittäin tärkeitä, koska maalämpö ja muut lämpöpumppuratkaisut, jotka ovat kaukolämmön kilpailijoita, yleistyessään muuttuvat edullisemmiksi. Lisäksi kaukolämmöllä on merkittävä rooli Suomen energiapolitiikassa, jolla pyritään tehokkaampiin ja ympäristöystävällisempiin ratkaisuihin. Kaikki ratkaisuilla säästynyt energia vähentää polttamisen tarvetta voimalaitoksilla, ja tukee Suomen ilmastotavoitteita. Minulla itsellä opinnäytetyön tekijällä on vahva usko, että työssä tutkittuja ratkaisuja tullaan näkemään kaukolämpöjärjestelmissä tulevaisuudessa.

Työssä määritettiin arvo paluuedelle, josta on hyötyä Vaasan Sähkölle tulevaisuudessa, kun kaukolämpöverkkoon liitetään paluuvettä hyödyntäviä ratkaisuja. Kun paluueden arvo on tiedossa, voidaan hinnoitella paluueden käyttö sekä arvioida paluuvettä hyödyntävien ratkaisujen investointien kannattavuutta. Työ antoi arvokasta tietoa Vaasan Sähkölle siitä, minkälaisia paluuvettä hyödyntäviä ratkaisuja on kaikkein kannattavinta toteuttaa.

Työ kehitti aiheen ja alan lisäksi myös opinnäytetyön tekijää, joka on varmasti myös osa jokaisen opinnäytetyön tavoitteita. Työtä tehdessä opin paljon etenkin tiedonhausta, tutkivan työn tekemisestä ja totta kai itse aiheesta. Energiatekniikan insinööriopiskelijalle aihe oli erinomainen, koska siinä tutkittiin sähkön- ja lämmöntuotantoa, lämmön jakelua, häviöitä, energiatehokkuutta, lämpöpumppuja ja taloudellisia vaikutuksia, joten työssä pääsi hyödyntämään laajasti opinnoissa opittuja taitoja.

LÄHTEET

Abdullah, M. 2012. Applied Energy, An Introduction. First Edition. Boca Raton, Florida, United States. Taylor & Francis Group.

Afry 2020. Raportti, Kaukolämpöasiakkaiden mitoituslämpötilan laskeminen. Viitattu 15.12.2020
https://energia.fi/files/5289/Kaukolampoasiakkaiden_mitoituslampotilan_laskeminen_101013094-Loppuraportti_AFRY.pdf

Anttonen, K. 2011, Kaukolämpöverkon paluuvien hyödyntäminen lämmityksessä. Diplomityö. LUT-yliopisto.

Branson, S. 2010. Heat Exchangers Types, Design, and Applications. New York. Nova Science Publishers Inc.

Dincer, I. & Kanoglu, M. 2010. Refrigeration Systems and Applications. Second Edition. West Sussex, United Kingdom. John Wiley & Sons Ltd.

Gicquel, R. 2011. Energy Systems, A New Approach to Engineering Thermodynamics, With access to the Thermoptim™ Software. First Edition. Boca Raton, Florida, United States. Taylor & Francis Group.

Industrial heat pumps. Viitattu 04.01.2021. https://industrialheatpumps.nl/en/how_it_works/

Jedfelt, D. Eteläaho, R. Korhonen, T. 2013. Power Engineering International, A high water mark for efficiency. Viitattu 20.02.2021.
<https://www.powerengineeringint.com/decentralized-energy/district-energy/a-high-water-mark-for-efficiency/>

Koskelainen, L. Saarela, L. Sipilä, K. Kaukolämmön käsikirja energiateollisuus 2006, Helsinki, Kirjapaino Libris Oy.

Energiateollisuus 2011. Kaukolämmön pumppausjärjestelyt – Suositus L10/2011. Helsinki. Energiateollisuus ry. Viitattu 26.12.2020.
https://energia.fi/files/673/SuositusL10_2011_Pumppaus.pdf

Energiateollisuus 2014. Teho ja vesivirta kaukolämmön maksuperusteina. Suositus K15/2014. Viitattu 03.01.2021
https://energia.fi/files/586/Teho_ja_vesivirta_SuositusK15_2014.pdf

Energiateollisuus 2019. Kaukolämpö 2018. Viitattu 12.01.2021.
<https://www.slideshare.net/energiateollisuus/kaukolmp-2018>

Energiateollisuus 2020. Energiavuosi 2019 Kaukolämpö. Viitattu 21.01.2021.
https://energia.fi/files/4402/Energiavuosi2019_Kaukolampo_MEDIAKUVAT_20200120.pdf

Energiateollisuus, kaukolämpöverkot. Viitattu 18.12.2020.
<https://energia.fi/energiasta/energiaverkot/kaukolampoverkot>

Eskola, L. Jokisalo, J. & Sirén, K. 2012. Lämpöpumppujen energialaskenta opas, Aalto-yliopistosta. Viitattu 02.02.2021. https://ym.fi/documents/1410903/38439968/Lampopumppujen-energiaskentaopas-3.10.2012-10A732A6_EA2F_45F9_869C_6F909138CB26-30757.pdf/1d053cd5-1865-e174-6424-841fac831c48/Lampopumppujen-energiaskentaopas-3.10.2012-10A732A6_EA2F_45F9_869C_6F909138CB26-30757.pdf?t=1603260214849

Gadd, H. & Werner, S. 2014. Achieving low return temperatures from district heating substations. Applied Energy. 136. 59-67.
<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0306261914009696?token=1FD06413882FAD89263FC3A2FCD6349EABB81BD61C22B007685458E9CAF0EDDCD66A252873AF94014A23A8F6F322C377>

Hillamo, H. 2019. Energiateollisuus ry, Menoveden lämpötilaoptimointi [PowerPoint esitys]. Viitattu 04.02.2021

HSY:n verkkokurssi. Viitattu 13.12.2020.
<https://koutsi.hsy.fi/courses/energiaekspertti/lessons/lammitys-2/topic/lammitysmuodot-3/>

Jalovaara J, Aho J, Hietämäki E & Hyytiä H, 2003, Paras käytettävissä oleva tekniikka (BAT) 5-50 MW:n polttolaitoksissa Suomessa, Vammala, Vammalan Kirjapaino Oy.

Järvenreuna, J. 2014. Savukaasupesuri parantaa lämpöyhtiön kannattavuutta. Promaint kunnossapidon ja tuotannon erikoislehti. Viitattu 18.12.2020.
<https://promaintlehti.fi/Tuotantotehokkuuden-kehittaminen/Savukaasupesuri-parantaa-lampoyhtion-kannattavuutta>

Mäkelä, V. & Tuunanen, J. 2015. Suomalainen kaukolämmitys. Mikkeli. Mikkelin ammattikorkeakoulu.

Pöyry 2010. Kaukolämpöjärjestelmän paluuvien hyväksikäyttö

kiinteistöjen lämmityksessä. Viitattu 01.02.2021. <https://docplayer.fi/1158112-Energiateollisuus-ry.html>

Pöyry 2016. Energiateollisuuden ympäristöpooli, Selvitys polttolaitosten savukaasupesureiden jätevesien ja lietteiden laadusta, hyötykäytöstä ja siihen

liittyvästä luvituksesta, Raportti. Viitattu 27.12.2020.

https://energia.fi/files/1442/Savukaasupesurit_raportti_201216.pdf

Pöyry 2018. Älykäs kaupunkienergia, Raportti Energiateollisuus Ry:lle. Viitattu 29.12.2020.

https://energia.fi/files/2862/Alykas_kaupunkienergia_LOPPURAPORTTI_20180614.pdf

Thinglink 2015. Tabletkoulu FY2: Lauhdevoimala. Viitattu 04.03.2021.

<https://www.thinglink.com/scene/633970247069597698>

Tampereen Sähkölaitos, Kaukolämpö Oy. Rakentajan opas, ohjeita kiinteistön liittämiseksi kaukolämpöön. Viitattu 04.03.2021 <https://docplayer.fi/2902236-Rakentajan-opas-ohjeita-kiinteiston-liittämiseksi-kaukolampoon.html>

Viholainen, J. Kuivala, J-P. & Fagerström, O. 2018. Lämmitys- ja jäähdytysverkot tulevaisuuden Savilahdessa – selvitystyö. Viitattu 01.03.2021. http://www.savilahti.com/sites/www.savilahti.fi/files/PDF/SmaRa/2018-03-21-sev_loppuraportti.pdf

Wiltshire, R. 2016. Advanced district heating and cooling (DHC) systems. Amsterdam. Woodhead Publishing, Elsevier.