



Teollisuuden hukkalämmön hyödyntäminen kaukolämmön tuotannossa

Case: Loimua Oy:n kaukolämmitys

Santeri Jaakonsaari

Opinnäytetyö, AMK

Toukokuu 2022

Tekniikan ala

Insinööri (AMK), energia- ja ympäristötekniikka

Jaakonsaari, Santeri

Teollisuuden hukkalämmön hyödyntäminen kaukolämmön tuotannossa. Case: Loimua Oy:n kaukolämmitys

Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Toukokuu 2022, 65 sivua.

Tekniikan ala. Energia- ja ympäristötekniikan tutkinto-ohjelma. Opinnäytetyö AMK.

Julkaisun kieli: suomi

Verkkojulkaisulupa myönnetty: kyllä

Tiivistelmä

Ilmastonmuutoksen ehkäiseminen vaatii vihreän energian ratkaisuja ja päästöjen minimoimista. Kaukolämmön tuotanto on keskitettyä tuotantoa, jonka päästöihin on kustannustehokasta vaikuttaa. Yksi keino on kaksisuuntaisen kaukolämmön toimintamallin hyödyntäminen. Opinnäytetyön toimeksiantajana toimi Loimua Oy. Opinnäytetyön tehtävänä oli tutkia teollisuuskohteen kasvatettavan hukkalämpötehon hyödyntämistä Hämeenlinnan kaukolämmityksessä. Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää teknilliset vaatimukset ja tarvittavat muutokset 5 ja 10 MW:n hukkalämpötehojen hyödyntämiselle.

Opinnäytetyön tutkimustyö toteutettiin tapaus- ja kehittämistutkimuksena, sisältäen niin laadullisia kuin määrällisiä tutkimusotteita. Tapaustutkimuksessa kartoitettiin ymmärrystä kaukolämmityksestä, kaksisuuntaisesta kaukolämmöstä, Hämeenlinnan nykyisestä kaukolämmön tuotannosta ja siinä hukkalämmön hyödyntämisen vaatimuksista. Tapaustutkimus pohjusti kehittämistutkimusta, jossa tutkittiin vaadittavien muutosten tekemistä Hämeenlinnan lämmöntuotantoon, jotta tutkittavat hukkalämpötehot saataisiin hyödynnettyä.

Tuloksina saatiin vaadittavat teoreettiset virtaukset, pumppaustehot ja putkikoot hukkalämpötehojen siirtämiseen. Työssä tuotettiin teollisuuskohteeseen periaatteellinen kytkentä kaukolämpöverkkoon, joka mahdollistaa kohteen toimimisen tilanteensa mukaan kaukolämpöasiakkaana tai lämmöntuottajana. Muita tuloksia olivat arviot hukkalämmön vaikutuksista nykyiseen Hämeenlinnan kaukolämmön tuotantoon ja tehtävien muutosten kustannusarviot.

Hukkalämpötehojen hyödyntäminen vaatisi investointeja, joista 10 MW:n kustannukset olisivat moninkertaisia. Molempien tutkittavien hukkalämpötehojen hyödyntäminen tulisi johtamaan Vanajan voimalaitoksen kesäaikaiseen kattilan katkoajamiseen ja kaukolämpöakun aktiiviseen hyödyntämiseen. Molemmat hukkalämpötehot keventäisivät niin Vanajan voimalaitoksen kuin Hämeenlinnan huippulaitosten kuormaa, mikä johtaisi kaasun/öljyn sekä biopolttoaineen polton vähenemiseen. Polttamisen vähentämisen myötä pienenisivät hiukkaspäästöt. Taloudellisesta näkökulmasta Loimua Oy säästäisi lämmöntuotannon kustannuksissa ja teollisuuskohte kasvattaisi lämmönmyyntiään.

Avainsanat (asiasanat)

Hukkalämpö, kaksisuuntainen kaukolämpö, kaukolämmitys, ympäristöystävällisyys

Muut tiedot (salassa pidettävät liitteet)

Jaakonsaari, Santeri

Utilization of industrial waste heat in production of district heat. Case: Loimua Oy's district heating

Jyväskylä: JAMK University of Applied Sciences, May 2022, 65 pages.

Engineering and technology. Degree Programme in Energy and Environmental Technology. Bachelor's thesis.

Permission for web publication: Yes

Language of publication: Finnish

Abstract

Green energy solutions and emission reductions are required to counteract climate change. Production of district heating is centralized production, and it is cost-effective to influence its emissions. One solution would be to utilize a model of two-way district heating. The thesis was commissioned by Loimua Oy. The assignment for the thesis was to study potential future use of a growing industrial complex's waste heat in Hämeenlinna's district heating. The objective of the thesis was to determine the technical requirements and necessary changes for the utilization of 5 and 10 MW of waste heat.

The research work of the thesis was executed as a case- and development research that contained qualitative and quantitative methods. The purpose of the case research was to gain knowledge of district heating, two-way district heating, the current state of district heating in Hämeenlinna and the requirements for utilizing waste heat thermal power in it. The case research laid the groundwork for development research, which focused on studying the required changes in heat production in Hämeenlinna so that the 5 and 10 MW of waste heat could be utilized.

The obtained results included the required theoretical flows, pumping powers and pipe sizes to transfer waste heat powers. The thesis process yielded a principal state of district heat grid connection which enables the object to be used either as a consumer of district heat or as a heat power producer. Other results included assessments of the impact on Hämeenlinna's current district heat production and the estimated costs for investments.

To utilize the 5 and 10 MW of waste heat would require investments, which would be substantially greater for the 10 MW power. Utilizing either 5 or 10 MW of waste heat would lead to operating the Vanaja power plant boiler intermittently and the active use of a district heating battery in summertime. Both waste heat powers would reduce heat production from both Vanaja power plant and the boiler plants in Hämeenlinna, which would reduce the burning of gas/oil and biofuel. With reduced burning, the emissions would also decrease. From an economical point of view, Loimua Oy would cut the expenses of district heat production and the company that owns the industrial complex would see an increase in their sales of thermal power.

Keywords/tags (subjects)

Waste heat, two-way district heating, district heating, friendliness to the environment

Miscellaneous (Confidential information)

Sisältö

1	Johdanto	4
1.1	Opinnäytetyön tausta ja tarkoitus	4
1.2	Loimua Oy ja aiheen valinta	5
2	Tutkimusasetelma	6
2.1	Tavoitteet ja tutkimuskysymykset	6
2.2	Tutkimusmenetelmät	7
2.3	Aineisto.....	8
2.4	Tutkimuksen rajaaminen.....	9
2.5	Tutkimuksen eettisyys.....	10
3	Kaukolämpö	10
3.1	Kaukolämpö yleisesti.....	10
3.2	Kaukolämmön tuotanto	11
3.3	Ylijäämälämpö kaksisuuntaisessa kaukolämmössä	13
3.4	Kaukolämmön asiakaskytkentä.....	16
3.5	Lämmönsiirtimet	18
3.6	Kaukolämpöjohdot.....	21
3.7	Kaukolämpöjohdon putkikoon mitoitus	23
3.8	Pumppaus.....	28
4	Käikälän hukkalämmön hyödyntäminen	32
4.1	Lähtötilanteen kartoittaminen.....	32
4.2	Asiakaskytkennän mallintaminen	36
4.3	Virtauksien mitoittaminen	38
4.4	Putkikoon mitoittaminen	39
4.5	Pumpputyypin valinta ja mitoittaminen	42
4.6	Hukkalämmön vaikutus kaukolämmöntuotantoon	42
4.7	Kustannusten arviointi	46
5	Johtopäätökset	48
6	Pohdinta	51
6.1	Tavoitteiden saavuttaminen	51
6.2	Luotettavuus	53
6.3	Opinnäytetyön hyödyntäminen ja kehittäminen.....	54

Lähteet	56
Liitteet	61
Liite 1. Kaukolämpöputkien painehäviölaskentatulosten taulukot	61
Liite 2. Lämmön ja huippulaitosten tuotanto 01.12.2020 – 28.02.2021	62
Liite 3. Lämmön ja huippulaitosten tuotanto 01.03.2021 – 31.05.2021	63
Liite 4. Lämmön ja huippulaitosten tuotanto 01.06.2021 – 31.08.2021	64
Liite 5. Lämmön ja huippulaitosten tuotanto 01.09.2021 – 30.11.2021	65
Kuviot	
Kuvio 1. Kaksiputkijärjestelmän periaatekuva	11
Kuvio 2. Tuotetun kaukolämmön energian lähteet 2021	12
Kuvio 3. Hukkalämpöjen talteenotto ja lämpöpumppujen lämpö	13
Kuvio 4. Ylijäämälämmön määritelmä	14
Kuvio 5. Ylijäämälämmön käyttö lämpötilatasoittain	15
Kuvio 6. Esimerkkikytkentä 4: Välisyöttökytkentä lisätyllä ilmanvaihtosiirtimellä	17
Kuvio 7. Esimerkkikytkentä 11: kaksisuuntainen kytkentä (periaate)	18
Kuvio 8. Tiivisteellisen levylämmönsiirtimen toimintaperiaate	19
Kuvio 9. Suoraputkilämmönsiirtimen toimintaperiaate	20
Kuvio 10. Nykyisin käytössä olevat johtorakenteet Mpuk ja 2Mpuk	22
Kuvio 11. Betonikanavajohto (E) ja muovisuojakuorijohto liikkuvien teräsputkin (Fiskars)	23
Kuvio 12. Pumpputyypien toiminta-alue tilavuusvirran ja nostokorkeuden suhteen	29
Kuvio 13. Karttakuva Käikälän alue rajattuna oranssilla	33
Kuvio 14. Tuotantojakauma 1.4.2017–31.3.2018	35
Kuvio 15. Hämeenlinnan kaukolämpöverkko taustakartalla	36
Kuvio 16. Teollisuuskohteen kaksisuuntainen kaukolämpökytkentä	37
Kuvio 17. Kuvakaappaus Logstor Calculator:n näkymästä	40
Kuvio 18. Laitoksien syöttöteho- ja vaikutusalueet	44
Kuvio 19. Lämmöntuotannon tavoitteellinen ajojärjestys ja jakauma 2025	50
Taulukot	
Taulukko 1. Suositeltavat virtausnopeudet kullekin putken nimelliskoolle (PSK 2401)	25
Taulukko 2. Hämeenlinnan kaukolämpölaitokset	34
Taulukko 3. Massa- ja tilavuusvirtojen maksimi- ja minimiarvot 5 ja 10 MW:n tehoilla	39
Taulukko 4. Pumpun tuottama paine-ero ja pumppaustehot	42

Taulukko 5. Hukkalämpötehoilla korvattavissa oleva huippulaitosten tuotanto.....	46
Taulukko 6. Kustannusarviot 5 MW:n ja 10 MW:n järjestelmille	47

1 Johdanto

1.1 Opinnäytetyön tausta ja tarkoitus

Globaalit ja Suomen ilmastotavoitteet ajavat entistä tiukempia ympäristöpäästöjen rajoituksia, mikä ohjaa energiasektoria hiilineutraalisimpiin ja energiatehokkaampiin ratkaisuihin. Suuri kehityspotentiaali löytyy kaukolämmityksestä sen ollessa yleisin lämmitysmuoto Suomessa. Energiantuotantolaitoksissa lämpöä tuotetaan pääosin polttoaineita polttamalla. Yhtenä keinona vähentää tätä polttamista on hyödyntää teollisuuden hukkalämpövirtoja lämmöntuotannossa eli toteuttaa kaksisuuntaista kaukolämpöä. Vuosittain noin 37 % teollisuuden energiankäytöstä ajautuu ympäristöön hyödyntämättä hukkalämpönä. Opinnäytetyössä tutkittiin tapauskohtaista tilannetta liittämään sekä siirtää teollisuuden hukkalämpöä kaukolämpöverkkoon, ja sen vaikutusta paikallisen kaukolämmön tuotantoon.

Toimeksiantajana opinnäytetyölle toimi Loimua Oy ja tutkimuskohde sijaitsee Hämeenlinnassa. Opinnäytetyö pohjustaa esiselvityksen tavoin Loimua Oy:n ja heidän teollisuusasiakkaansa yhteistä tulevaisuuden hanketta. Asiakastietojen ollessa salaisia ei teollisuusasiakkaan nimeä eikä tarkkaa sijaintia voitu julkistaa. Kyseinen teollisuuskohte ostaa kaukolämpöä vain poikkeuksellisissa tapauksissa, koska kohteessa on entuudestaan omaa lämmöntuotantoa. Teollisuuskohte myy Loimualle hukkalämpöään, joka on tällä hetkellä kuitenkin vähäistä. Teollisuusasiakkaan onkin tarkoitus kasvattaa tulevaisuudessa hukkalämmön myyntitehoaan. Teollisuuskohteen tuotanto (hukkalämpö) tulee toteutuessaan olemaan niin sanotusti pohjakuormaa, joka on aina käytössä maksimisopimustehollaan seisokkiajat poissuljettuna (Hämeenlinnan kaukolämpöverkoston Kehittämissuunnitelma 2018, 20). Opinnäytetyössä oli tarkoitus tutkia edellytyksiä myyntitehon kasvattamiselle.

Tavoitteina opinnäytetyössä oli selvittää vaatimukset kasvatettavan lämpötehon hyödyntämiselle ja sen seuraukset. Tehtävinä työssä oli mallintaa kaksisuuntainen asiakaskytkentä, laskea tarvittavat virtaukset lämpötehon siirtämiseksi ja määrittää vähimmäisputkikoko tehoa siirtävälle virtaukselle. Työssä tuli myös arvioida kustannuksia muutoksille ja nykyistä suuremman hukkalämpötehon siirron vaikutusta verkkoon sekä kaukolämmöntuotantoon. Työstä ja tuloksista tuotettiin lopuksi raportti Loimua Oy:lle.

1.2 Loimua Oy ja aiheen valinta

Suomalainen Loimua Oy on energiayhtiönä erikoistunut kaukolämmön, sähkön ja maakaasun tuottamiseen ja jakeluun. Tuotteina yhtiö myy kaukolämpö-, maakaasu-, hybridi-, maalämpö- ja jäähdytysratkaisuja. Lisäksi Loimua tarjoaa asiakkailleen energiantuotannon kokonaispalvelua, valvonta- ja etäohjauspalveluita sekä lämpökatselmuksia. (Loimuan esite n.d.; Loimua 2021.)

Aiemmin yritys toimi nimellä Elenia Lämpö Oy, osana Elenia-konsernia tytäryhtiönä. Elenia myi kesällä 2019 kaukolämpöliiketoimintansa kansainvälisille rahastoille Aberdeen Standard Investment-sille, DIF Capital Partnersille sekä LPPI Infrastructure Investments LP:lle. Uusi yritys jatkoi toimintaansa tammikuussa 2020 Loimua Oy:nä. (Elenia Lämpö on nyt Loimua 2019.) Loimua palvelee asiakkaitaan Hämeessä, Keski-Suomessa, Pohjois-Pohjanmaalla ja Heinolassa, ja yrityksen pääkonttori toimii Hämeenlinnassa ja muut toimipisteet sijaitsevat Jyväskylässä, Heinolassa sekä Oulaisessa (Loimua 2021).

Loimualla oli tarjottava useampi toimeksiantovaihtoehtoa, joista päädyin valitsemaan teollisuuden hukkalämmön hyödyntämisen. Pyrkimykseni oli tuottaa opinnäytetyö todelliseen työelämän projektiin liittyen ja tarjottu toimeksianto perustui lähitulevaisuudessa tapahtuvaan hankkeeseen. Aiheen valintaan sisältyi myös muitakin seikkoja. Globaalin ilmastotilanteen huomioiden aihe on hyvinkin ajankohtainen ajatellen ympäristöpäästöjä ja tavoitteita niiden vähentämiseen. Hankkeella, johon opinnäytetyö perustuu, on myös ennen kaikkea taloudellinen merkitys niin Loimualle kuin teollisuuskohteelle. Hankkeen valmistumisen myötä teollisuuskohteelle tuottaa lisää lämmön myyntiä Loimuan samalla säästäessä ostettavan polttoaineen kustannuksissa. Opinnäytetyö perustuu projektina kaksisuuntaiseen kaukolämpöön, joka on kaukolämpöliiketoiminnassa yleisesti kasvussa. Opinnäytetyö ei ole yleistävä ratkaisumalli toteuttaa kaksisuuntaista kaukolämpöä, mutta sen prosessia sekä tuloksia voidaan mahdollisesti hyödyntää ja soveltaa alan vastaavissa projekteissa.

2 Tutkimusasetelma

2.1 Tavoitteet ja tutkimuskysymykset

Toimeksiantajayrityksen intressinä yhdessä teollisuuskohteen kanssa on hyödyntää tuotantoprosessista syntyvä hukkalämpö. Toimeksiantaja antoi tutkittavaksi kaksi skenaariota: hukkalämpötehon olevan 5 MW ja 10 MW. Tarkoituksena oli selvittää, miten kyseiset tehot saataisiin hyödynnettyä. Kaukolämpöä siirretään verkon ja sen liitäntöjen välityksellä. Tarkoituksena oli mallintaa kaukolämpökytkentä, jolla teollisuuskohte voi sekä ostaa että myydä lämpöä. Itse lämmönsiirron osalta tuli selvittää vaadittavat virtaukset, pumppaukset ja putkikoot. Nykyiseen kaukolämmön tuotantoon nähden hukkalämpö on ”ylimääräistä” energiaa. Tämä johti tarkastelemaan vaikutusta nykyisten tuotantolaitosten ajamiseen uuden lämmönlähteen myötä. Edellä esiteltyjen vaatimusten selvitystyön rinnalla tuli kartoittaa muutoksien ja urakointien tuomat kustannukset. Työlle muodostui näin selvitystavoitteiksi:

- Teollisuuskohteen liitäntä Hämeenlinnan kaukolämpöverkkoon.
- Tekniset vaatimukset siirrettäville lämpötehoille kaukolämpöverkossa.
- Hukkalämpötehojen vaikutus kaukolämmön tuotantoon.
- Muutosten tuomat kustannukset.

Tavoitteiden pohjalta työssä hyödynnettiin seuraavia tutkimuskysymyksiä:

1. Kuinka kaukolämmitys toimii ja mitkä ovat sen teknisiä reunaehtoja?
2. Kuinka kaksisuuntainen kaukolämpö toimii ja mitkä ovat sen teknisiä reunaehtoja?
3. Mitä esimerkkikytkentöjä on olemassa kaukolämpöliitännöistä ja voiko niitä soveltaa?
4. Kuinka kaksisuuntaisen kaukolämpökytkennän tulisi toimia?
5. Kuinka suuret kaukolämpövesivirtaukset skenaarioiden lämpötehot vaativat?
6. Kuinka suuri putkikoko vaaditaan virtausten kuljettamiseen ja kuinka se määritellään?
7. Kuinka suuren pumppaustehon ja paineen pumpun on kyettävä tuottamaan sekä mikä pumpputyyppeä tulee valita?
8. Kuinka hukkalämpö vaikuttaa Vanajan voimalaitoksen ajamiseen?
9. Kuinka hukkalämpö vaikuttaa muiden Hämeenlinnan lämpökeskusten ajamiseen?
10. Kuinka paljon kaukolämpökytkennän laitteet tulevat maksamaan?
11. Kuinka paljon kaukolämpökytkennän urakointityö tulee maksamaan?
12. Kuinka paljon kaukolämpöverkon putkijohdon suurennustyö tulee kustantamaan?

2.2 Tutkimusmenetelmät

Työ toteutettiin tapaus- ja kehittämistutkimuksena. Tapaus- eikä kehittämistutkimus kumpikaan ole varsinainen tutkimusmenetelmä, vaan enemmänkin tutkimusstrateginen lähestymistapa. Ne ovat monimenetelmällisiä, eli käyttävät niin kvalitatiivisia kuin kvantitatiivisia tutkimusmenetelmiä. (Ikkunoita tutkimusmetodeihin I 2010, 190–214.)

Case- eli tapaustutkimuksen tarkoitus on kasvattaa ymmärrystä ja tietämystä tutkittavasta ilmiöstä, eli tapauksesta. Sillä ei kuitenkaan pyritä yleistävään tietoon, mutta tutkimuksen kokonaisuutta ja tuloksia voidaan mahdollisesti hyödyntää ja soveltaa muualla. Tapaustutkimuksessa teoria ja käytäntö ovat vuorovaikutuksessa keskenään (abduktio). Tutkimuksessa tutkijan rooli on ulkopuolinen osallistuja ja tutkimuskysymykset ovat lähinnä avoimia kysymyksiä. Tuloksina tutkimus tuottaa niin kuvailevaa tekstiä kuin numerollista dataa. Käytännössä tapaustutkimus etenee alkutilanteen kartoittamisella, jossa havaitaan ja määritellään tutkimusongelma. Ongelmaan etsitään ja tuotetaan ratkaisuehdotuksia, joita lopuksi arvioidaan. Arvioinnin jälkeen yksi tai useampi ratkaisu mahdollisesti valitaan. (Ikkunoita tutkimusmetodeihin I 2010, 190–213.)

Kehittämistutkimuksella tutkitaan tutkimuskohteen kehittämistä ja/tai toiminnan muuttamista (Ikkunoita tutkimusmetodeihin I 2010, 214). Tapaustutkimus sopiikin hyvin pohjustukseksi kehittämistutkimukselle. Kun tapaustutkimuksessa tarkoitus on ymmärtää toimintaa, on kehittämistutkimuksessa tarkoitus muuttaa sitä. Myös kehittämistutkimuksessa teorian ja käytännön suhde on abduktio ja tutkijan rooli ulkopuolinen osallistuja. Kehittämistutkimuksen kulku on hyvin samankaltainen kuin tapaustutkimuksessa, mutta myös tuoda valitut ratkaisut testaukseen ja kokeiluun. Testauksen ja/tai kokeilun jälkeen tuloksia arvioidaan. Kehittämistutkimuksen tulokset voivat olla sekä kuvailevaa tekstiä että määrällisiä lukuja. (Ikkunoita tutkimusmetodeihin I 2010, 215–227.)

Tutkimuksissa hyödynnettiin laadullisia, eli kvalitatiivisia, ja määrällisiä, eli kvantitatiivisia tutkimusmenetelmiä. Kvalitatiivisella tutkimuksella on tarkoituksena hakea ymmärrystä kohteesta. Laadullinen tutkimus vastaa kuvaileviin kysymyksiin, kuten: miksi, miten, millainen? Tutkimuksen otanta on yleensä pieni ja harkittu, eikä sen tarkoitus ole selvittää määriä. Kvalitatiivisessa tutkimuksessa aineistoa koostetaan henkilökohtaisista-, syvä- ja ryhmähaastatteluista, osallistuvasta havainnoinnista sekä valmiina olevista aineistoista ja dokumenteista. (Heikkilä 2014.)

Kvantitatiivisella tutkimuksella selvitetään lukumääriin pohjautuvia kysymyksiä. Näin ollen tutkimuksessa on käytettävä laajempaa, mutta edustavaa otantaa. Tutkimus kuvaa numeerisesti asioita ja yleensä selvittää lisäksi näiden välisiä riippuvuuksia. Tutkimuksella yleensä onnistutaan määrällisesti selvittämään olemassa oleva tilanne, muttei selittämään syy-suhteita. Kvantitatiivinen tutkimus vastaa määrällisiin kysymyksiin, kuten: mikä, paljonko, missä, miksi ja kuinka usein? Määrällisessä tutkimuksessa aineistoa kerätään tyypillisesti lomake- ja internet-kyselyillä, strukturoiduilla ja puhelinhaastatteluilla, systemaattisella havainnoinnilla ja kokeellisilla tutkimuksilla. (Heikkilä 2014.)

Toimeksiannon tavoitteiden selvittämisessä on kyse nimenomaan hukkalämmön hyödyntämisen vaatimusten ja edellytyksien tunteminen kyseisessä kohteessa. Tähän lisäten tuli myös selvittää, mitä muutoksia nykyiseen järjestelmään tulisi tehdä, että hukkalämpötehot saadaan käyttöön. Tavoitteet ja tutkimuskysymykset edellyttivät niin laadullisia kuin määrällisiä aineistoja ja tuloksia. Näin ollen tapaus- ja kehittämistutkimusta voitiin pitää validina lähestymistapana tutkimuskohdetta kohtaan. Tavoitteiden ja tutkimuskysymysten ollessa määritetty, aloitettiin työn toteutus aineiston keruulla ja tietoperustan luomisella. Työ eteni tapaustutkimuksen kulun mukaan ja saatettiin loppuun kehittämistutkimuksella, kummastakin tutkimuksesta omat tuloksensa kirjatun. Työssä tuotettiin lähtötietojen ja tietoperustan pohjalta laskelmia ja analyysejä, joista johdettiin tulokset ja johtopäätökset.

2.3 Aineisto

Tietoperustan lähdeaineiston koostamisessa pyrittiin käyttämään mahdollisimman paljon tekniikan alan kirjallisuutta. Pää tavoitteena oli hyödyntää alkuperäislähteitä varmistaen tiedon oikeellisuuden ja luotettavuuden. Materiaalia koostettiin niin painetuista kuin sähköisistä lähteistä. Painettuja tietoa haettiin Jyväskylän ammattikorkeakoulun ja kaupungin kirjastoista. Työssä hyödynnettyt painetut lähdekirjallisuudet olivat pitkälti koostettua tietoa eikä niinkään alkuperäistietoa, mutta niitä olivat tuottaneet tekniikan alan toimijat ja ammattilaiset. Näin ollen niitä voitiin pitää luotettavina. Tietoperustan sähköinen aineisto haettiin vapaalla internet-haulla, ja lähteinä käytettiin pääosin tekniikan alan toimijoiden tutkimuksia, raportteja ja ohjeita; näin varmistaen niiden luotettavuuden. Tutkimuksessa pyrittiin ei ainoastaan hyödyntämään soveltuvaa, mutta myös

mahdollisimman uutta tietoa. Osa lähdemateriaaleista ovat yli 10 vuotta vanhoja. Kuitenkin kyseisten lähteiden tieto on luonteeltaan sellaista, ettei se menetä merkitystään ajansaatossa, kuten muun muassa fysikaaliset tai laskennalliset seikat.

Muu tutkimustyöhön vaadittu aineisto haettiin toimeksiantajan kautta. Toimeksiantaja toimitti tutkimuskohteeseen liittyvää ajankohtaista sähköistä aineistoa, kuten raportteja ja laskentoja. Lisäksi tutkimustyöhön koostettiin materiaalia toimeksiantajayrityksen henkilökunnan kanssa käydystä keskusteluista ja haastatteluista. Toimeksiantajan toimittamien materiaalien ja lähdeaineistojen pohjalta tuotettiin laskentoja ja sanallisia analyyskejä.

2.4 Tutkimuksen rajaaminen

Kyseessä ei ole yleistävä tutkimus teollisuuden hukkalämmön hyödyntämisestä, vaan aihepiiriä koskettavasta tapauksesta. Näin ollen kaukolämmitystä ja kaksisuuntaista kaukolämpöä tutkittiin ja käsiteltiin vain siltä osin kuin se oli kontekstin ja kohteen ymmärtämisen kannalta relevanttia ja tarpeellista. Ylijäämälämmön muuta hyödyntämistä kuin kaukolämpönä ei tutkittu. Tutkimuksessa kaukolämpöä käsiteltiin lähtökohtaisesti teollisuuden näkökulmasta. Työn tarkoituksena ei ollut selvittää yksityiskohtaisella tasolla laite- tai järjestelmätekniikkaa, jolloin työssä keskityttiin tekniikan osalta vain sen toiminnalliseen osuuteen. Tarkempi fysikaalisten ilmiöiden selittäminen ja matemaattisten mallien tutkiminen jäi toimeksiannon ulkopuolelle. Tutkimuksessa tutkittiin ja hyödynnettiin ainoastaan niitä laskentamenetelmiä, jotka olivat selvitystavoitteiden ratkaisun kannalta oleellisia. Polttoaineen ja hukkalämmön sopimushintojen ollessa salaisia, ei työssä voitu tutkia rahallista nettosäästöä tai takaisinmaksuaikaa toteutuneelle hankkeelle. Näin ollen tutkimuksessa tuotettiin vain arvio kustannuksista hankkeen toteuttamiseksi. Toteutuneen hankkeen laskennallinen ilmastopäästötarkastelu ei myöskään sisältynyt tavoitteisiin.

Teollisuuskohteen oltuaan opinnäytetyöprosessin ulkopuolella, ei kytkennästä ollut mahdollista luoda tarkkaa putkitus- ja instrumentointikaaviota (PI-kuva), ja näin ollen kytkennän mallintamisessa riitti periaatteellinen taso. Työssä ei ollut käytössä ammattitason laskenta- ja simulointiohjelmiä, jolloin tarkempi verkostollinen laskenta rajattiin työn ulkopuolelle. Verkoston osalta mitoitettiin siis vain teoreettisesti tehon siirtämisen edellyttämät virtaukset, putkikoko kitkapainehäviön

mukaan sekä pumppaustehot ja -paine. Hukkalämmön vaikutusta nykyiseen tuotantoon selvitetiin analysoimalla lämmöntuotantodataa, jota oli tutkintahetkellä saatavilla. Tarkoituksena ei ollut siis luoda uutta valmista laitosten ajotapamallia hukkalämmön rinnalla.

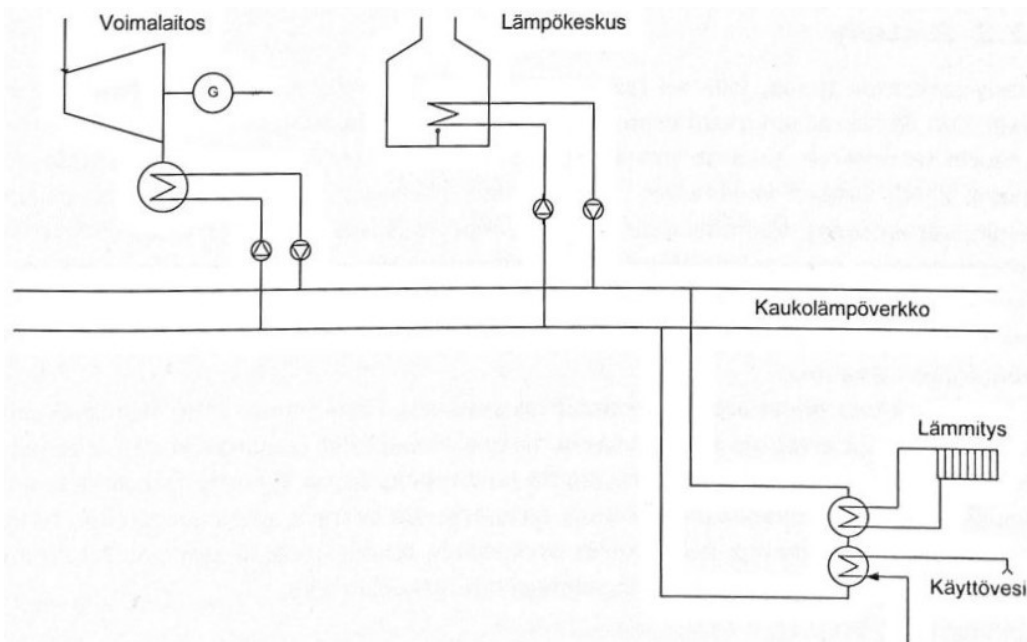
2.5 Tutkimuksen eettisyys

Opinnäytetyössä noudatettiin Jyväskylän ammattikorkeakoulun eettisiä periaatteita ja hyvää tieteellistä käytäntöä. Opinnäytetyön raportointi toteutettiin Jyväskylän ammattikorkeakoulun opinnäytetyö- ja raportointiohjeiden mukaan. Raportissa esiintyvä muiden tekemä työ ja sen arvo tunnustetaan. Opinnäytetyö tuotettiin vastuullisesti eikä se vaatinut tutkimuslupaa tai salassapitosopimusta. Raportissa ei tuoda ilmi muun muassa rekisterillisesti tai organisaatiollisesti arkaluontoisia tietoja, eikä asiakas- ja yhteistyösopimuksia julki. Tutkimustyössä toimittiin eettisiä periaatteita noudattaen puolueettomasti. Aihe tuki kaukolämpöalaa koskettavia kestävän kehityksen periaatteita. Työssä tutkittiin lämmöntuotannossa polttamisen korvaamista teollisuuden hukkalämmöllä, jolla on vaikutusta ilmastopäästöihin. Opinnäytetyössä oli tarkoitus tuottaa materiaalia ja tuloksia, joilla voitaisiin edistää energia-alaa.

3 Kaukolämpö

3.1 Kaukolämpö yleisesti

Kaukolämmityksellä tuotetaan keskitetysti rakennusten sekä käyttöveden lämmittämiseen tarvittava lämpöenergia, jonka jakelu suoritetaan kaukolämpöverkon välityksellä asiakaskiinteistöille (ks kuvio 1). Lämpö voidaan tuottaa keskitettynä useammassa kuin yhdessä kohteessa ja jakaa verkossa kiertävässä siirtoaineessa, jona toimii vesi tai höyry, joista jälkimmäinen on harvinaisempi. Kaukolämmityksen asiakaskiinteistöjä ovat asuintalot, kuten kerros- ja pientalot, liike- ja teollisuusrakennukset sekä julkiset kiinteistöt. Suomen yleisin lämmitysmuoto onkin kaukolämpö. Tulevaisuuden päästötavoitteiden kannalta kaukolämmityksellä on vahva asema, sillä päästöjen rajoittaminen on kustannustehokkaampaa keskitetyssä kuin hajautetussa lämmöntuotannossa. (Kaukolämmön käsikirja 2006, 25–26.)



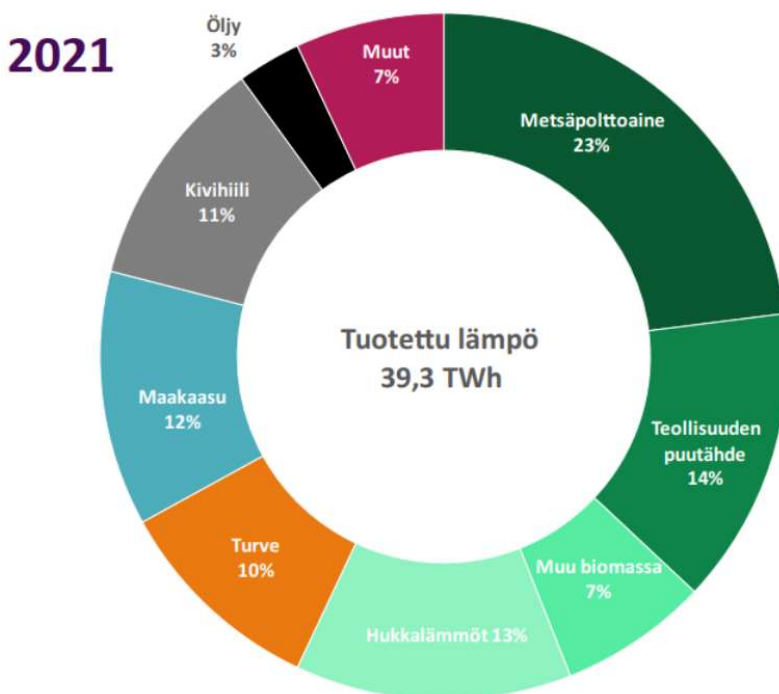
Kuvio 1. Kaksiputkijärjestelmän periaatekuva (Kaukolämmön käsikirja 2006, 43)

Kaukolämpöverkot ovat kaksiputkisia suljettuja järjestelmiä, jotka sisältävät meno- ja paluuputket. Lämmönjakokeskuksella yhdistetään asiakkaat kaukolämpöverkkoon. Kiertävä kaukolämpövesi saapuu menoputkessa asiakaskiinteistön lämmönjakokeskukseen, luovuttaa lämpöenergiaa kuluttajille lämmönsiirtimien välityksellä ja lähtee tuotantolaitokselle uudelleen lämmitykseen paluuputkessa. Suomen kaukolämpöjohdot mitoitetaan maks. 120 °C:seen, mutta tavallisesti ulkolämpötilasta riippuen kaukolämpöveden lämpötila vaihtelee menoputkessa 65–115 °C ja paluuputkessa 40–60 °C. Verkoston suurin sallittu käyttöpainne on 10–16 bar (1,0–1,6 MPa) ja matalalämpöverkostoissa 4–10 bar (0,4–1 MPa). Verkossa kiertävä kaukolämpövesi on käsiteltyä vettä mekaanisten epäpuhtauksien ja putken sisäpuolisen korroosion estämiseksi sekä hapen poistamiseksi. Mahdollisten vuotojen paikantamiseksi kaukolämpövesi on usein myös värjätty vihertäväksi väriaineella, jolla ei ole terveydelle eikä ympäristölle vaaraa aiheuttavaa vaikutusta. (Kaukolämpöverkkoja yli 15 000 km n.d.; Kaukolämmön käsikirja 2006, 66; Mäkelä & Tuunanen 2015, 56.)

3.2 Kaukolämmön tuotanto

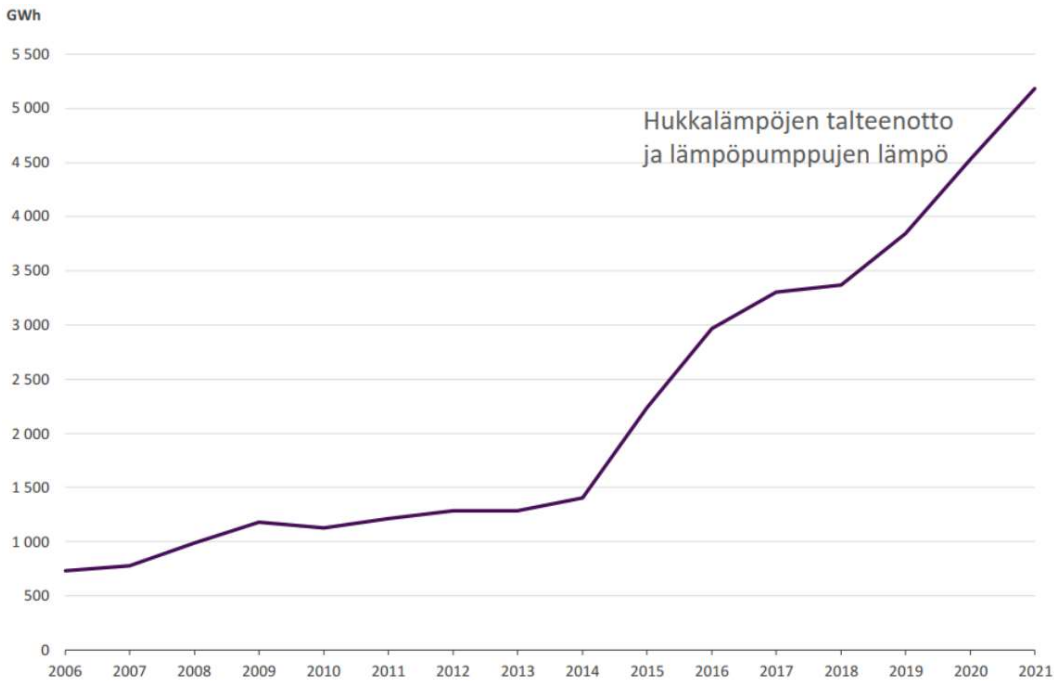
Kaukolämpöä tuotetaan pääosin polttolaitoksissa, yhteistuotantona sähkön kanssa (CHP = Combined Heat and Power) tai pelkästään lämpönä. Kaukolämpöverkkoon on liitetty useampia tuotantolaitoksia, kuten huippu- ja varalämpökeskuksia. Näin saadaan joustoa vaihtelevan lämmöntar-

peen tuottamiseen sekä varakapasiteettia huolto- ja häiriötilanteiden varalle. Polttoaineina lämmöntuotannossa käytetään muun muassa kivihiiltä, maakaasua, turvetta, jätettä, öljyä, puuta tai muuta biomassaa. (Kaukolämpö tuotetaan lähellä asiakasta n.d., Mäkelä & Tuunanen 2015, 12–17.) Vuonna 2021 kaukolämpöä tuotettiin 39,3 TWh:n edestä (ks. kuvio 2) (Energiavuosi 2021 Kaukolämpö 2022). Aiemmin mainitun turpeen energiakäytön on hallitusohjelman mukaan määrä vähintään puolittua 2030 mennessä, kuitenkin säilyen huoltovarmuuspolttoaineena (Puoliväliriihen toimenpiteet vastaavat turvealan murrokseen 2021). Kivihiili polttoaineena sähkön- tai lämmöntuotannossa kielletään alkaen 1.5.2029 (Kivihiilen energiakäytön vuonna 2029 kieltävä laki voimaan huhtikuun alussa 2019).



Kuvio 2. Tuotetun kaukolämmön energian lähteet 2021 (Energiavuosi 2021 Kaukolämpö 2022, 5)

Kaukolämpöä tuotetaan myös teollisten prosessien kautta. Kuvion 2 hukkalämmöillä tarkoitetaan muuten hyödyntämättä jäävää energiaa, esimerkiksi lämmöntalteenottoa jätevedestä ja savukaasuista. (Energiavuosi 2021 Kaukolämpö 2022, 5). Vuonna 2010 YIT:n mukaan vuosittain noin 37 % teollisuuden energiankäytöstä ajautuu ympäristöön hyödyntämättä hukkalämpönä. Tästä vuosittaisesta teollisuuden ylijäämälämmöstä on taloudellisesti hyödynnettävissä 4 TWh. (Tuotannon hukkalämpöhyödyksi 2013.) Vuodesta 2010 hukkalämmön hyödyntäminen onkin yli kolminkertaisesti kaukolämmön tuotannossa (ks. kuvio 3) (Energiavuosi 2021 Kaukolämpö 2022, 9).



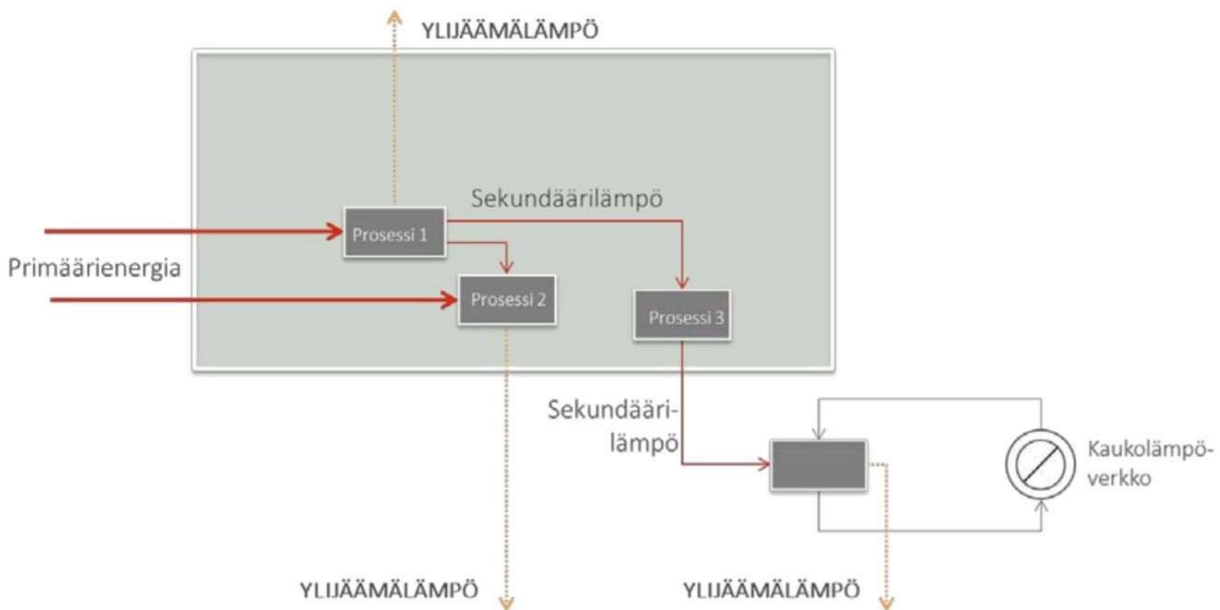
Kuvio 3. Hukkalämpöjen talteenotto ja lämpöpumppujen lämpö (Energiavuosi 2021 Kaukolämpö 2022, 9)

3.3 Ylijäämlämpö kaksisuuntaisessa kaukolämmössä

Kaksisuuntaisella kaukolämmöllä tarkoitetaan toimintamallia, joka mahdollistaa asiakkaiden tai kolmansien osapuolien myymään omaa lämmöntuotantoaan tai ylijäämlämpöään kaukolämpöyrittäjälle (Tulevaisuuden asiakasratkaisut n.d.; Kaksisuuntaisen kaukolämmön liiketoimintamallit 2016, 5). Ylijäämlämpö määritellään energiavirraksi, joka poistuu hyödyntämättä tuotantolaitoksen ulkopuolelle ja sitä kutsutaan myös hukka- ja jätelämmöksi. Ylijäämlämpöä syntyy primääri- ja sekundäärienergian käytöstä prosessissa (ks. kuvio 4). (Heikkilä & Kiuru 2014.)

Primäärienergia on siis tuotantolaitoksen ulkopuolelta prosessiin tuotua energiaa, kuten sähköä tai polttoainetta, jolla tuotetaan sekundäärienergiaa, esimerkiksi lämpöä. Esimerkkinä kiinteän polttoaineen kattila, jossa poltetaan biopolttoainetta tuottaen lämpöä. Tässä, kattilaan tuotu polttoaine on primäärienergiaa ja sillä tuotettu lämpö on sekundäärienergiaa. Ylijäämlämpöä syntyy

kattilan läpi lämpövuodossa sekä ulosvirtauksissa laitoksen ulkopuolelle muun muassa savukaasujen ja jäähtytyksen lauhdelämmön mukana.

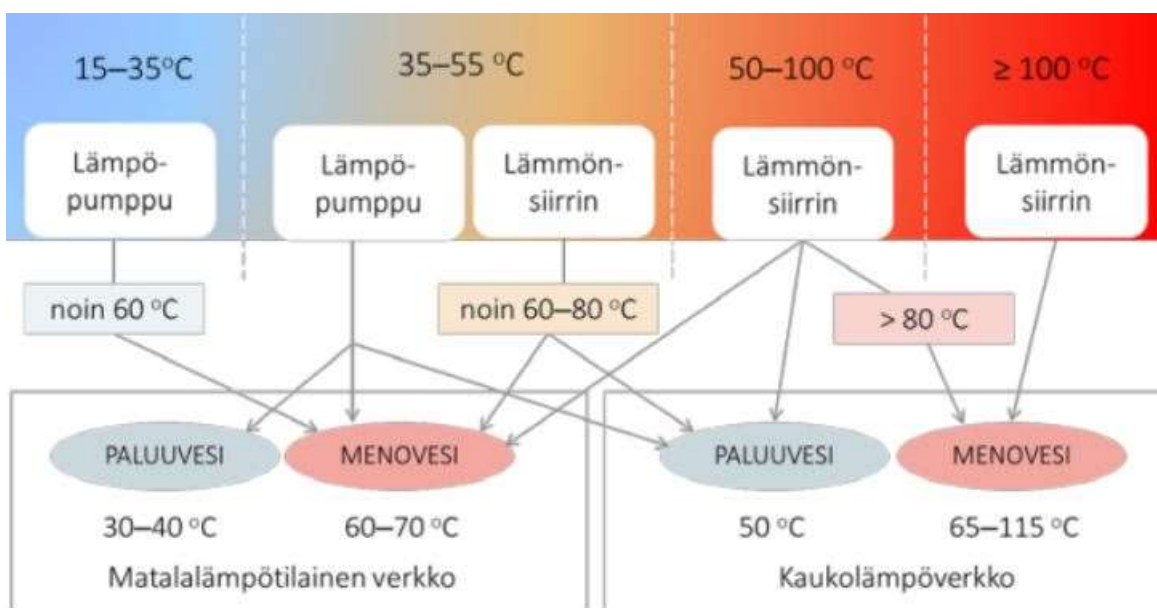


Kuvio 4. Ylijäämälämmön määritelmä (Heikkilä & Kiuru 2014, 10)

Pääperiaatteena on, että teollisuudessa syntyvä ylijäämälämpö hyödynnetään tehokkaimmin, kun se käytetään suoraan itse sen syntyprosessissa, jolloin jätelämmön tuotto ja sen käyttö tapahtuvat samanaikaisesti. Näin saadaan siis vähennettyä primäärienergian tarvetta. Ylijäämälämmön toiseksi tehokkain käyttö tapahtuu samassa kiinteistössä sekundäärienergiana. Edellä mainittujen vaiheiden jälkeen on kannattavaa selvittää jäljelle jääneen lämpötehon hyödyntämisen mahdollisuudet sekundäärienergiana teollisuuskokonaisuuden ulkopuolella. Ylijäämälämmön hyödyntäminen ei ole kuitenkaan ongelmallista. Haasteita tuovat lämmöntalteenottolaitteiston seurannaisvaikutukset sekä tuotanto- ja kulutusvaihteluiden eriaikaisuus, sillä hukkalämpöä syntyy teollisuuslaitosten oman tuotannon mukaan. Kaukolämpöyhtiön osalta viimeisin edellä mainittu seikka asettaa edellytykseksi tilanteeseen soveltuvaa korvaavan lämmöntuotantokapasiteetin ylläpitämisestä kaukolämpöverkossa. (Kaukolämmön käsikirja 2006, 28; Perttula 2000, 79.)

Teollisuudessa ylijäämälämpöä syntyy hyvin erilaisista prosesseista ja erilaisissa muodoissa. Näin ollen ylijäämälämmön hyödyntämistä tarkastellaan aina yksilöllisesti ja tapauskohtaisesti. Ylijää-

mälämmön hyödyntämisen mahdollisuudet riippuvat muun muassa lämpötilatasosta, lämpöteho-
virran (entalpia) suuruudesta, lämpövirran väliaineesta ja faasista (esimerkiksi kaasu/höyry ja
neste) sekä väliaineen puhtaudesta ja kemiallisista ominaisuuksista. Jos jokin edellä mainituista
tekijöistä on epäsuotuisa, lämmön hyödyntäminen voi osoittautua kannattamattomaksi tai jopa
mahdottomaksi. Mikäli hukkalämmön hyödyntäminen katsotaan mahdolliseksi, voidaan seuraavaksi
kartoittaa tekniset seikat sen myymiselle. Myynnin osalta tulee selvittää hukkalämmön lähde
ja sen lämpötilatasot, huipputeho, energiamäärä, ostajan lämmöntarve ja -vastaanottokyky, toimi-
tusvarmuus, pysyvyys ja rajoitteet. Lämmönjakeluun liittyen on kartoitettava virtaamat, lämpötila-
ja painetasot. Hukkalämmön myynti paikalliselle energiayhtiöille kaukolämpönä edellyttää kauko-
lämpöverkon olemassaoloa tai sellaisen rakentamista tuotantolaitokselle. Hukkalämmön lämpötila-
lasta riippuu, voidaanko sitä siirtää suoraan verkkoon lämmönsiirtimen välityksellä vai vaaditaanko
lämpöpumppu nostamaan ensin sen lämpötilaa. Tähän vaikuttaa myös, minkä tyyppiseen verk-
koon hukkalämpöä ollaan siirtämässä (ks. kuvio 5). (Heikkilä & Kiuru 2014, 10–21.)



Kuvio 5. Ylijäämälämmön käyttö lämpötilatasoittain (Heikkilä & Kiuru 2014, 13)

Asiakkaan liittäessä verkkoon hukkalämpölähteen, on se sama kuin energiayhtiön lisätessä siihen uuden tuotantoyksikön. Ensisijaisesti hukkalämpö syötetään kaukolämmön menoputkeen, mutta myös paluuputkeen syöttäminen on mahdollista, jos hyöty on suurempi kuin haitta. Paluuputkeen syöttö heikentää verkon hyötysuhdetta lämpöhäviöiden kasvaessa ja tuotantolaitoksilla mahdolli-

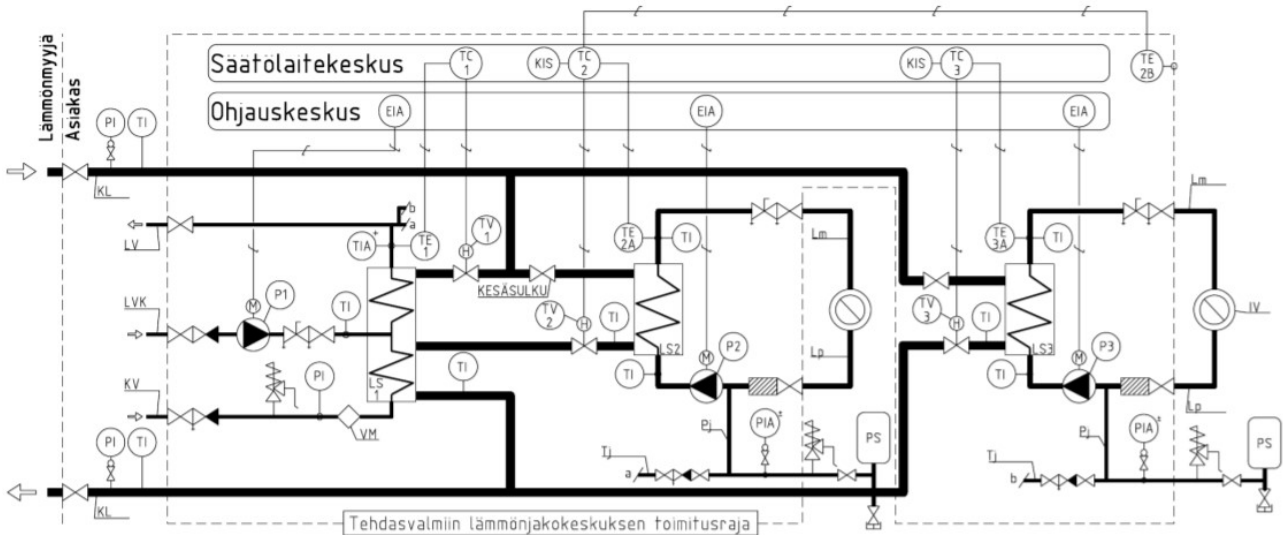
simman alhaisesta paluueden lämpötilasta hyötyvää tuotantoa. Paluuputkeen syöttö voi olla kuitenkin kannattavaa, jos hukkalämpö on riittävän edullista ja/tai paluuputkeen on liitetty paluueden lämpöä hyödyntävää kulutusta. Hukkalämmön toimittajan on kuitenkin varauduttava kaukolämpöverkon häiriötilanteeseen, jolloin riittävän nopea reagointi ja tilapäinen lämmön toisaalle ohjaus on mahdollista. (Sirola & Tiitinen 2018, 2–5.)

Hukkalämpölähteitä liittäessä kaukolämpöverkkoon tulee huomioida sen tekniset kriteerit ja reunaehdot. Hukkalämmön lämpötila ei saa ylittää 120 °C, eikä se ei saa olla liian matalalämpöistä verkossa kiertävään kaukolämpövedeen nähden. Kaukolämpöverkon menoputken vesi on lämpötilaltaan 75–115 °C ja matalalämpötilaverkossa 65–90 °C sekä paluuputkessa 40–60 °C. Syötettävän hukkalämmön lämpötila tulisivin vähintään olla sen syöttöpisteessä vallitsevan kaukolämpöveden lämpötila, mikä rajaa syötettävän lämmön määrää. (Sirola & Tiitinen 2018, 2–3.) Kaukolämpöverkon tyyppillinen mitoituspaine 16 bar (joissakin verkoissa 10 bar) asettaa maksimirajan syöttölämpöenergiaa kuljettavan virtauksen paineelle (matalalämpöverkostoissa 4–10 bar). Meno- ja paluuputken välinen paine-ero voi olla jopa yli 10 bar, mutta pienemmissä ja väljemmissä verkoissa mitoituspaine-ero on usein 5,5–6 bar. Kriittisille asiakkaille on kuitenkin taattava vähintään meno- ja paluupuolen paine-eroksi 0,6 bar kytkentäpisteessä. Jotta ylipäätään verkkoon voidaan syöttää hukkalämpöenergiaa, on sitä kuljettavan virtauksen paineen voitettava syöttöpisteessä valitseva verkoston paine. (Sirola & Tiitinen 2018, 3; Kaukolämpöverkon pumppausjärjestelyt 2011, 1.) Hukkalämpöjen liittämiseen verkkoon liittyy muitakin teknisiä ohjeistuksia, kuten kaukolämpöverkon rakenneseikat ja järjestelmän optimointi, kytkentä, mittaus sekä turvallisuusasiat (ks. Sirola & Tiitinen 2018).

3.4 Kaukolämmön asiakaskytkentä

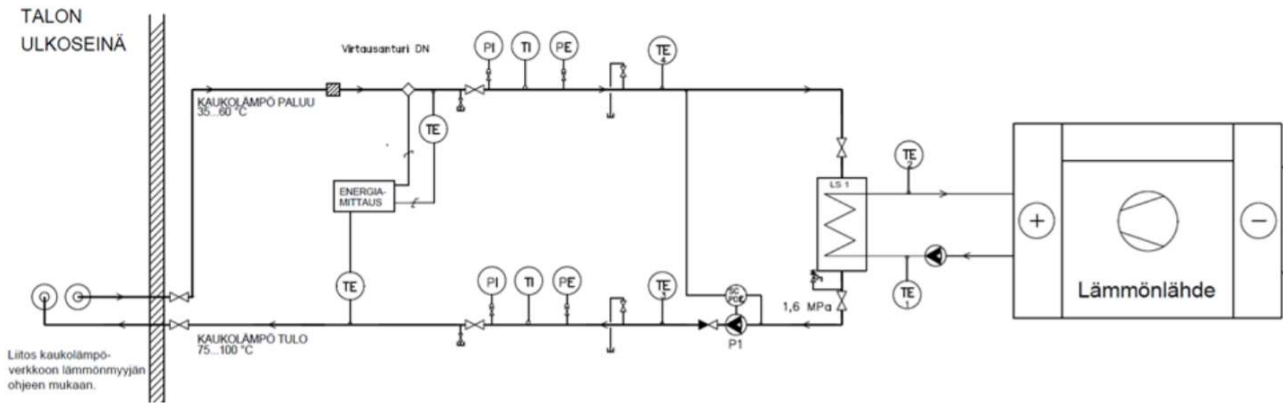
Kaukolämmityksen liittymisjohto päättyy lämmönjakohuoneessa asiakaslaitteisiin, joihin luetaan kuuluvan mittaus- ja lämmönjakokeskus. Mittauskeskus on lämmönmyyjän omaisuutta, ja lämmönmyyjä vastaa sen hankinnasta ja huoltamisesta. Keskus pitää sisällään lämpömäärän laskijalaitteen kytkettynä meno- ja paluueden lämpötila-antureihin sekä virtausanturiin. Asiakas saa kaukolämpönsä käyttöön lämmönjakokeskuksesta (ks. kuvio 6), joka sisältää muun muassa lämmönsiirtimet, pumput ja säätöautomaatiikan. Lämmönjakokeskuksen omistaa asiakas ja asiakas vastaa sen huollosta. Lämmönsiirtimiä keskuksessa on tavanomaisesti vähintään kaksi; huonetilo-

jen ja lämpimän käyttöveden lämmitykseen kullekin omansa. Muille mahdollisille lämmityskoh-
teille, kuten ilmastoinnille tai ilmanvaihdolle, asennetaan oma lämmönsiirtimensä ja säätölait-
teensa. (Mäkelä & Tuunanen 2015, 18–19.)



Kuvio 6. Esimerkkikytkentä 4: Välisyöttökytkentä lisättyllä ilmanvaihtosiirtimellä (Rakennusten
kaukolämmitys 2020, 89)

Kuviossa 7 on esitetty esimerkkikytkentä, jolla asiakas voi siirtää lämpöenergiansa
kaukolämpöverkkoon. Kytkennän pumppu P1 saa käyntiluvan lämmönlähteen menolämpötilan
ylittäessä asetusarvon. Pumpun pyörimisnopeutta ohjataan taajuusmuuntajalla ja paine-
erosäädön (paluu- ja menopuolen paine-ero) avulla. Pumppu P1 pysähtyy, kun piiristä ei pystytä
pumppaamaan riittävän korkealämpötilaista vettä verkon menojohtoon. Verkkoon siirrettävän
energian määrää mitataan energiamittarilla, johon on kytketty paluu- ja menopuolen lämpötilojen
ja virtausmittauksen anturitiedot. (Rakennusten kaukolämmitys 2020, 98.)



Kuvio 7. Esimerkkikytkentä 11: kaksisuuntainen kytkentä (periaate) (Rakennusten kaukolämmitys 2020, 98)

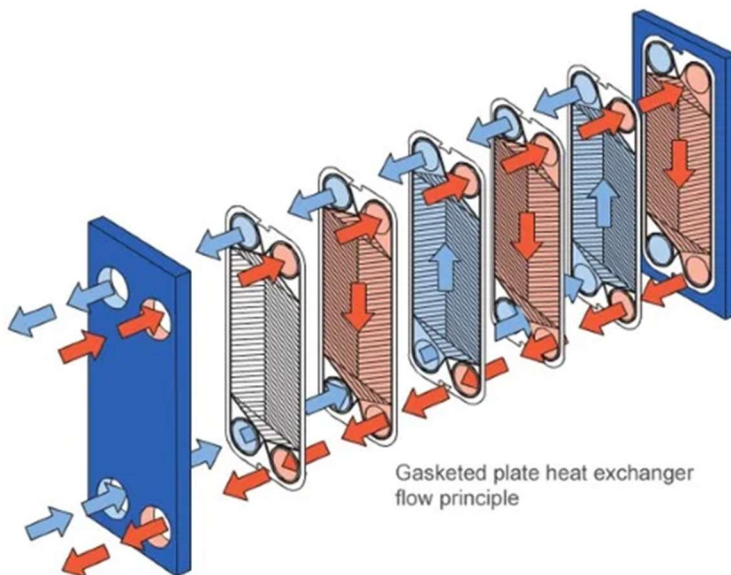
3.5 Lämmönsiirtimet

Laitteena lämmönsiirrin, toisin sanoen lämmönvaihdin, siirtää lämpöenergiaa kuumemmasta virtasta kylmempään (CHEM-A1120 Virtaustekniikka ja lämmönsiirto 2019, 59). Kaukolämmityksen lämmönsiirrintyyppinä on useita ja ne poikkeavat toisistaan lämpöteknisiltä ominaisuuksiltaan, joihin vaikuttaa lämmönsiirtopinta-ala sekä siirtimen pituus. Tavallisesti lämmönsiirtimet toimivat vastavirtaperiaatteella lämmönsiirron maksimoimiseksi. (Mäkelä & Tuunanen 2015, 68–69.) Karkeasti kaukolämmityskäytössä olevat lämmönsiirtimet voidaan rakenteellisesti jakaa kahteen ryhmään (Çengel & Ghajar 2015, 650–653; Mäkelä & Tuunanen 2015, 70–72):

- levylämmönsiirtimet
- putkilämmönsiirtimet

Kahtena yleisimpänä levylämmönsiirrintyyppinä kaukolämmön parissa voidaan pitää juotettuja ja tiivisteellisiä levylämmönsiirtimiä (ks. kuvio 8). Rakennusten lämmönjakokeskuksessa käytetään tänä päivänä yleisemmin juotettuja levylämmönsiirtimiä kaukolämmityskäytössä. Juotettu levylämmönsiirrin koostuu kuparilevyillä yhteen juotetuista lämmönsiirtolevyistä, joiden lukumäärä ja kuviointi vaihtelee mitoitusasteen ja -lämpötilojen mukaan. Lämmönsiirrintyyppinä tämä on kestävä, kevyt ja omaa suuren tehoalueen kompaktissa koossa, mutta haittapuolenaan sen pieni vesitilavuus tuo mahdollisia säätöongelmia. (Mäkelä & Tuunanen 2015, 70.)

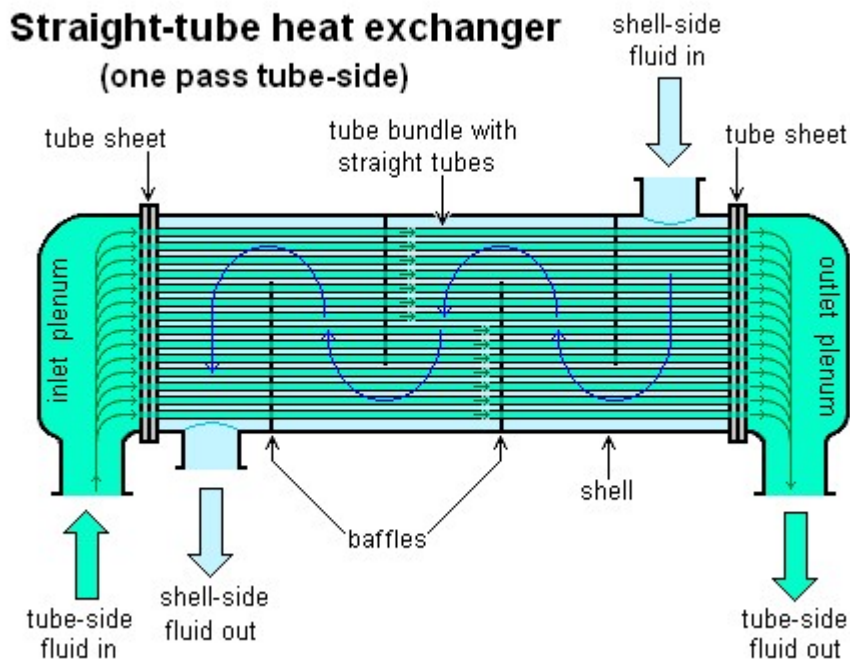
Tiivisteellinen levylämmönsiirrin koostuu päätylevyjen väliin kiristystangoilla ja pulteilla pakaksi puristetuista tiivisteellisistä lämmönsiirrinlevyistä, joissa on profiloitu kuviointi ja virtausaukot virtaaville mediaaneille (Mäkelä & Tuunanen 2015, 71; Tiivisteelliset levylämmönsiirtimet n.d., 3). Käyttökohteena voimalaitoksissa ja muussa teollisuudessa kyseinen lämmönsiirrin soveltuu lämmitys-, jäähdytys-, höyrystys- ja lauhdutustehtäviin. Etuna tiivisteelliselle lämmönsiirtimelle on mahdollisuus avata sen levypakka ja poistaa tai lisätä levyjä. Se omaa myös tehokkaan lämmönsiirron kokoonsa nähden. (Tiivisteellinen levylämmönsiirrin n.d.; Tiivisteelliset levylämmönsiirtimet n.d.) Lämmönsiirrin vaatii säännöllistä tiivisteiden vaihtoa, sillä tiivisteillä on ominaisuutena menettää elastisuutta (Mäkelä & Tuunanen 2015, 71).



Kuvio 8. Tiivisteellisen levylämmönsiirtimen toimintaperiaate (Alfa Laval n.d.)

Putkilämmönsiirrintä on suoraputkisena ja kierukkana (Mäkelä & Tuunanen 2015, 72). Suoraputkilämmönsiirrin (ks. kuvio 9) on laajalti käytetty lämmönsiirrintyyppi teollisuudessa, sillä se on käytöpaineltaan ja -lämpötilaltaan laaja-alaisin. Kyseinen lämmönsiirrintyyppi koostuu pääosin putkipaketista putkilevyineen ja sitä ympäröivästä vaipasta eli ulkokuoresta. (CHEM-A1120 Virtaustekniikka ja lämmönsiirto 2019, 60; Çengel & Ghajar 2015, 652.) 1960- ja 1970-luvuilla yleisesti käytettyä suoraputkilämmönsiirrintä ei enää asenneta kaukolämmityskäyttöön. Niiden ollessa raskaita ja vaatiessa huomattavasti tilaa, niitä ei myöskään ole paljoa asiakkailta enää käytössä. Lisäksi ne omaavat heikomman jäädäytyskyvyn verraten aiemmin mainittuihin levylämmönsiirtimiin (Mäkelä & Tuunanen 2015, 72; Çengel & Ghajar 2015, 652). Kierukkalämmönsiirrin on rakenteeltaan

teräsputki, jonka sisäpuolelle on asennettuna kupariputkikierukka. Kupariputki on altis veden epäpuhtauksille ja happamalle pH-arvolle. Lisäksi kriittisen virtausnopeuden 1,0 m/s ylittyminen aiheuttaa eroosiorosioosiota. Juotettujen levylämmönsiirtimien tultua markkinoille, on kierukka-lämmönsiirrinten asentaminen lähes loppunut kaukolämmityksessä, mutta niitä on edelleen käytössä asiakkailta. (Mäkelä & Tuunanen 2015, 72.)



Kuvio 9. Suoraputkilämmönsiirtimen toimintaperiaate (H Padleckas 2006, [CC BY-SA 3.0](#))

Lämmönsiirtimen mitoitus tehdään vastaamaan tarvittavaa hetkellistä huipputehoa pyrkien mahdollisimman tehokkaaseen kaukolämpöveden jäähdytykseen. Lämmitysteho tulee olemaan sama laskettaessa ensiö- tai toisiopuolen kautta. Laskennassa käytetään kunkin piirin omien virtaamien (massa- tai tilavuusvirta) ominaislämpökapasiteetteja ja lämpötilatasoja. (Kaukolämmön käsikirja 2006, 71; Mäkelä & Tuunanen 2015, 69.) Asiakkaan myydessä hukkalämpöään idea on periaatteessa sama, mutta päinvastoin, jossa myyntilämpöteho pyritään siirtämään mahdollisimman tehokkaasti lämmitettävään kaukolämpövedeen. Lämmönsiirtimen teho saadaan ratkaistua kaavalla 1 (Mäkelä & Tuunanen 2015, 69).

$$\Phi = c_p \cdot \dot{m} \cdot \Delta T = c_p \cdot \rho \cdot q_v \cdot \Delta T = c_p \cdot \rho \cdot q_v \cdot (T_m - T_p) \quad (1)$$

missä:

Φ = lämmönsiirtimen lämpöteho (kW)

c_p = veden ominaislämpökapasiteetti (kJ/kg · K)

\dot{m} = massavirta (kg/s)

ρ = veden tiheys (kg/m³)

q_v = veden tilavuusvirta (m³/s)

ΔT = meno- ja paluulämpötilojen erotus (°C tai K)

T_m = ensiö-/toisiopuolen menoveden lämpötila (°C tai K)

T_p = ensiö-/toisiopuolen paluuveden lämpötila (°C tai K)

3.6 Kaukolämpöjohdot

Kaukolämmön jakeluverkostoon sisältyvät siirtojohdot, runkojohdot sekä liittymisjohdot, eli talojohdot. Suomalaisessa kaukolämmityksessä lämpöenergia siirretään kaksiputkijärjestelmällä ja käytetyt kaukolämpöjohdot ryhmitellään kanavarakenteensa mukaan. Kaukolämpöjohtoina käytetään tehdasvalmiita kaukolämpöelementtejä, jotka koostuvat virtausputkesta, lämpöeristeestä ja suojakuoaresta. Virtausputken tavallisin materiaali on teräs. Nykyisin lähes yksinomaan käytetään kiinnivaahdotetun johtojärjestelmän johtotyyppiä. Kaukolämpöjohtojen käytetyt nimilyhenteet muovisuojakuorirakenteisille putkille ovat: Mpuk, 2Mpuk, Mpul, 2Mpul, Mpe, Mmv ja 2Mmv. (Kaukolämmön käsikirja 2006, 137–138; Mäkelä & Tuunanen 2015, 50.) Nimilyhenteiden kirjainten merkitys muovisuojakuorirakenteisille putkille ovat:

M = eristys- tai johtoelementin tavanomainen polyeteenimuovinen ulkokuori

pu = polyuretaanivaahdotettu

pe = vaahdotettu polyeteeni

mv = mineraalivilla

k = putket kiinni eristyksessä

l = putket liikkuvat

Betonikanavarakenteisille: Emv, Epu, Wmv, Tmv, Ymv, Pkb, joissa:

E = kokoelementtikanava

W = kolmitukinen elementtikanava

T = työpaikalla valettava suorakulmainen kanava

Y = yläelementtikanava, jossa työpaikalla valettava alaosa

P = puolielementtikanava, jossa työpaikalla valettava pohjalaatta

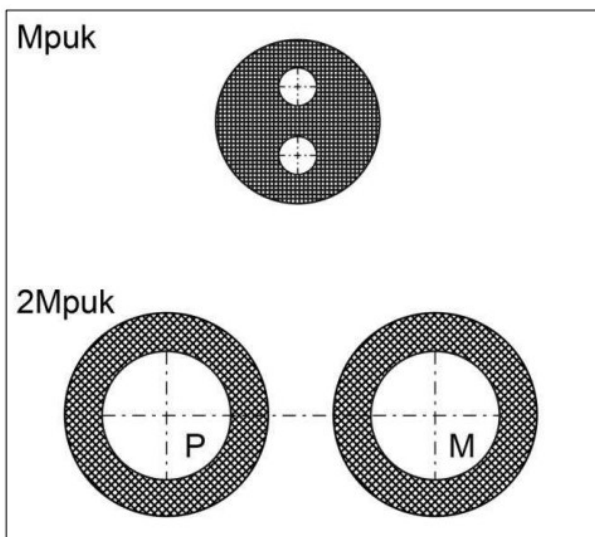
mv = mineraalivilla

pu = polyuretaanivahto

kb = kevytbetoni

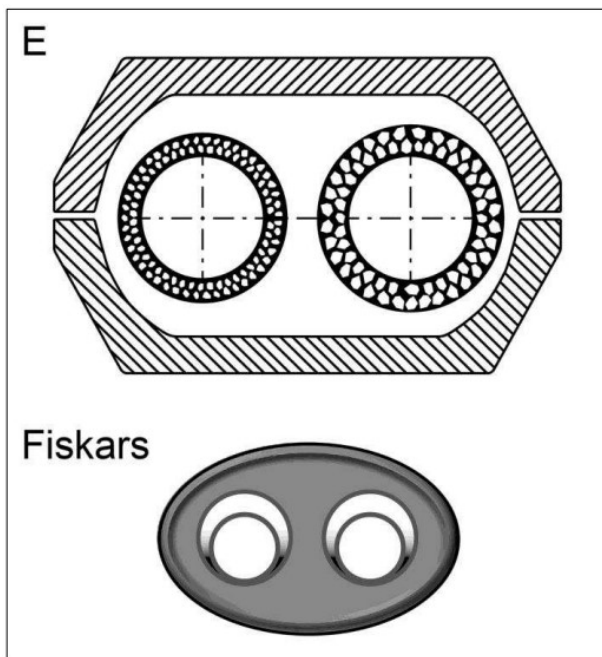
Suomessa käyttöön tullessaan kiinnivaahdotetut johdot korvasivat muut käytössä olleet johtotyypit ja 1980-luvun puolivälin jälkeen pääosin kaikki kaukolämpöjohdot ovat rakennettu kyseisellä johtotyypillä. Kiinnivaahdotettuja kaukolämpöjohtorakenteita on kaksi; 2Mpuk ja Mpuk, joissa virtausputki ja polyeteenisuojakuori on liitetty kiinteästi toisiinsa yhteen polyuretaanieristeellä.

2Mpuk (ks. kuvio 10) koostuu kahdesta yksiputkijohdosta, joita valmistetaan kokoluokissa DN 20–DN 600 ja erikoistapauksissa DN 1200 -kokoon asti. Kaksiputkijohto Mpuk:ssa (ks. kuvio 10) on kaksi virtausputkea yhdistetty yhteisellä eristeellä saman suojakuoren sisään. Kaksijohtoputkea valmistetaan DN 2×20–DN 2×200 kokoluokissa. Kaksijohtoputken asennuksessa huomioitavaa on menoputken sijoittaminen paluuputken alapuolelle lämpöhäviöiden minimoimiseksi. Yksiputkijohdon lämpöhäviöt ovat suuremmat kuin vastaavan kaksiputkijohdon. (Kaukolämmön käsikirja 2006, 138–139.)



Kuvio 10. Nykyisin käytössä olevat johtorakenteet Mpuk ja 2Mpuk (Kaukolämpöjohdot ja maantiet 2020, 30)

Betonikanavajohtoja ja muovisuojakuorijohtoja liikkuvien teräsputkien ei ole enää käytetty 1990-luvun alun jälkeen kaukolämpöverkon rakentamisessa. Kyseisiä johtotyyppisiä on kuitenkin edelleen runsaasti maassa asennettuina. Betonikanavajohdoissa virtausputket ovat kannakoitu ylä- ja alaelementistä koostuvan betonikuoren sisään (ks. kuvio 11). Kannakointi mahdollistaa riittävän tilavaran eristeitä varten. Putkiston lämpölaajenemisesta aiheutuva liike suunnataan ohjausosilla kanavarakenteen suuntaiseksi. Lämpölaajenemisen kompensointi ja ohjaus tapahtuu paljetasaimien ja kiintopisteiden avulla. Muovisuojakuorijohdon liikkuvien teräsputkien muodostaa virtausputkien lasikuituiset suojaputket, vuotovesiputki ja polyeteenisuojakuori kiinteästi yhteen liitettynä polyuretaanieristeellä (ks. kuvio 11). Tuuletetuissa suojaputkissa teräksiset virtausputket pääsevät vapaasti lämpöliikkumaan. (Kaukolämmön käsikirja 2006, 144–145; Mäkelä & Tuunanen 2015, 58–60.)



Kuvio 11. Betonikanavajohto (E) ja muovisuojakuorijohto liikkuvien teräsputkien (Fiskars)
(Kaukolämpöjohdot ja maantiet 2020, 31)

3.7 Kaukolämpöjohdon putkikoon mitoitus

Kaukolämpöverkon putkistot mitoitetaan tuotantolaitokselta/-laitoksilta kulutuskohteeseen suunnitellun lämpötehon siirtämisen mukaan. Kaukolämpöjohdossa siirrettävä lämpöteho riippuu kier-

tävistä vesivirtauksesta sekä meno- ja paluujohdon lämpötilaerosta, eli jäähtymästä. Verkon maksimaaliseen tehonsiirtokykyyn sisältyy kuitenkin rajaavia seikkoja. Putkikoko rajaa, kuinka suuria virtauksia putkessa voidaan siirtää. Lisäksi putkikoon valintaan vaikuttaa sallittu painetaso, painehäviö sekä meno- ja paluuputken välinen paine-ero. Tehoa ei voida siirtää verkkoon enempää kuin sitä kuluttajat pystyvät vastaanottamaan, jolloin asiakkaiden kaukolämpölaitteiden mitoitus sekä mahdollinen virtauksen rajoitus asettaa rajaehdoja. Verkkoon ei voida myöskään tuottaa suurempaa virtausta eikä painetta, kuin lämmöntuotantolaitosten pumppujen mitoituksen ylärajat antavat myöden. (Kaukolämmön käsikirja 2006, 198–199; Mäkelä & Tuunanen 2015, 53–56.)

Myös meno- ja paluujohdon lämpötilaeron valittavuus on rajallista. Kaukolämpöputket mitoitaan aiemmin mainitulle maks. 120 °C:lle, ja menoveden lämpötilaa rajaa asiakkaiden kaukolämpölaitteiden mitoitus ulkolämpötilan ja sääolosuhteiden mukaan. Menojohdon veden lämpötila pidetään mahdollisimman alhaisena lämpöhäviöiden minimoimiseksi, mutta alarajana toimii kuluttajien käyttöveden lämmityksen mitoitus. Menolämpötilaa ja lämpötilaeroa kuitenkin korotetaan verkossa tapahtuvien lämpöhäviöiden kompensoimiseksi ja siirtokykyä rajaavan vesivirran mukaan. Lämmöntuotantolaitosten menoveden lämpötilasäädöt toimivat edellä mainittujen rajojen ja ehtojen mukaan. Siirtyvä lämpöteho kaukolämpöputkessa lasketaan kaavalla 2. (Kaukolämmön käsikirja 2006, 198–199.)

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

missä:

Φ = lämpöteho (kW)

c_p = veden ominaislämpökapasiteetti (kJ/kg · K)

\dot{m} = massavirta (kg/s)

ρ = veden tiheys (kg/m³)

q_v = veden tilavuusvirta (m³/s)

ΔT = meno- ja paluulämpötilojen erotus eli toisin sanoen jäähdytys (°C tai K)

Käytännössä putkikooksi valitaan laskettua arvoa lähinnä oleva, seuraavaksi suurempi putkikoko putkitaulukosta. Näin saadaan putkistoon automaattisesti ylikapasiteettia. Lämpötehonsiirtoon

tarvittavan putkikoon laskennallinen sisäputkihalkaisija saadaan kaavalla 3. (Mäkelä & Tuunanen 2015, 53.)

$$d_{\text{lask}} = \sqrt{\frac{4 \cdot q_v}{\pi \cdot v_{\text{mit}}}} \quad (3)$$

jossa:

d_{lask} = laskennallinen putkihalkaisija (m)

q_v = kaukolämpöveden tilavuusvirta (m^3/s)

v_{mit} = mitoituksessa käytettävä kaukolämpöveden virtausnopeus (m/s), joka on riippuvainen putkimateriaalista (sisäpinnan materiaalin karheus) sekä putkijohdolle sallitusta painehäviöstä.

Mitoitusvirtausnopeuksiin on käytössä suositeltuja virtausnopeuksia. PSK 2401 -standardin antamat virtausnopeudet ovat ohjeellisia ja tapauskohtaiset painehäviölaskelmat tulee suorittaa tarkempaa mitoitusta varten. Standardi on sovellettavissa teollisuuden putkistojen hankinnoissa sekä suunnittelussa. Taulukkoon 1 on koottu standardin suosittelemat pumpun painepuolen ohjeelliset virtausnopeudet kullekin putken nimelliskoolle. (PSK 2401 2009, 1–3.)

Taulukko 1. Suositeltavat virtausnopeudet kullekin putken nimelliskoolle (PSK 2401)

DN	≤25	32	40	50	65	80	100	125	150	200	250	300	350	400	450	500	600	700	800
v (m/s)	0,8	1,0	1,2	1,4	1,5	1,6	1,7	2,0	2,5	2,8	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,2	4,5	4,7	5,0

Kaukolämpöputken ja sen sisällä virtaavan veden välillä vallitsee kitka, joka aiheuttaa painehäviötä. Tämä painehäviö määritellään kaavalla 4. (Kaukolämmön käsikirja 2006, 199.)

$$\Delta p_v = \xi \cdot \frac{L}{d_s} \cdot \frac{\rho \cdot w^2}{2} = \xi \cdot \frac{8 \cdot L}{d_s^5} \cdot \frac{\rho \cdot q_v^2}{\pi^2} = \xi \cdot \frac{8 \cdot L}{d_s^5} \cdot \frac{\text{m}^2}{\pi^2 \cdot \rho} \quad (4)$$

missä:

Δp_v = painehäviö (Pa)

ξ = kitkakerroin

ρ = veden tiheys (kg/m^3)

w = virtausnopeus (m/s)

L = putkipituus (m)

d_s = putken sisähalkaisija (m)

q_v = tilavuusvirta (m^3/s)

\dot{m} = massavirta (kg/s)

Kitkakerroin ξ määräytyy karheuden k sekä Reynoldsin luvun Re perusteella, joista jälkimmäisin määritetään kaavalla 5 (Kaukolämmön käsikirja 2006, 199).

$$Re = \frac{w \cdot d_s}{\nu} = \frac{4 \cdot q_v}{\pi \cdot d_s \cdot \nu} = \frac{4 \cdot q_v \cdot \rho}{\pi \cdot \eta \cdot d_s} = \frac{4 \cdot \dot{m}}{\pi \cdot \eta \cdot d_s} \quad (5)$$

missä:

Re = Reynoldsin luku

w = virtausnopeus (m/s)

d_s = putken sisähalkaisija (m)

ν = kinemaattinen viskositeetti (m^2/s)

q_v = tilavuusvirta (m^3/s)

ρ = veden tiheys (kg/m^3)

η = dynaaminen viskositeetti ($kg/m \cdot s$) = $\nu \cdot \rho$

\dot{m} = massavirta (kg/s)

Kitkakertoimen arvo luetaan Moodyn-käyrästä (ks. Kaukolämmön käsikirja 2006, 200) Re -luvun ja k/d_s -suhdeluvun akselilta. Kitkakerroin voidaan myös määrittää laskennallisesti Haalandin yhtälöllä, joka on approksimaatio Colebrook-White-yhtälölle. Se ei vaadi iterointia, ja poikkeaa Colebrook-White-yhtälön tuloksista vain alle 2 %. Haalandin yhtälö esitettyinä kaavassa 6. (White 2016, 363.)

$$\frac{1}{\sqrt{\xi}} = -1,8 \cdot \log_{10} \cdot \left(\left(\frac{k/d_s}{3,7} \right)^{1,11} + \frac{6,9}{Re} \right) \quad (6)$$

Sama kaava, ξ ratkaistuna:

$$\xi = \left(-1,8 \cdot \log_{10} \cdot \left(\left(\frac{k/d_s}{3,7} \right)^{1,11} + \frac{6,9}{Re} \right) \right)^{-2}$$

Missä:

ξ = kitkakerroin

k = putken sisäpinnan karheus (mm)

d_s = putken sisähalkaisija (mm)

Re = Reynoldsin luku

Aiemmin mainitut jakeluverkon osat asettavat mitoituksessa tiettyjä rajaehdoja ja lähtöarvoja. Siirtojohtoilla lämpöenergia siirretään tuotantolaitokselta koko kaupunkiin tai kaupunginosiin (Kaukolämpöjohdot ja maantiet 2020, 30). Suunniteltua heikomman jäähtymän vuoksi siirtojohtojen mitoituksessa käytetään verrattain pienempää lämpötilaeroa: $\Delta T = 30\text{--}40$ °C. Voimakkaasta lämpimän käyttöveden risteilystä johtuen käyttövesiteho voidaan jättää käytännössä huomioimatta mitoituksessa. Mitoituspainehäviönä käytetään pääsääntöisesti 0,5–1 bar/km-putkea tai tapauskohtainen mitoitus. (Kaukolämmön käsikirja 2006, 156; Mäkelä & Tuunanen 2015, 54.) Yleensä siirtojohtojen virtausputken koko on DN 100...DN 800 (Kaukolämpöjohdot ja maantiet 2020, 30).

Runko- ja jakelujohtot, eli haarajohtot, siirtävät lämpöenergian eteenpäin kohdennetulle alueelle siirtojohtosta haarautuen (Kaukolämpöjohdot ja maantiet 2020, 30). Alueen rakennusten laskettu huipputeho ja lämpimän käyttöveden tehontarpeen risteily määräävät johdon mitoituksen. Putkikokojen pienentämiseksi, jäähtymä ΔT pyritään samaan alueellisesti mahdollisimman suureksi. Mitoituslämpötilaerona käytetään: $\Delta T = 40\text{--}55$ °C. Pumppauskustannusten optimoimiseksi, mitoituspainehäviönä käytetään 1 bar/km-putkea, mutta jopa 2 bar/km-putkea niissä verkoston osissa, joissa paine-eroa on paljon käytettävissä kaikissa normaaleissa käyttötilanteissa. (Kaukolämmön käsikirja 2006, 156; Mäkelä & Tuunanen 2015, 54.) Tavanomaisesti virtausputkien koko on DN 40...DN 300 (Kaukolämpöjohdot ja maantiet 2020, 30).

Liittymis-, eli talojohdoilla siirretään lämpöenergia jakeluverkosta haaroitettuna kulutusalueen yksittäisten asiakkaiden lämmönjakohuoneisiin (Kaukolämpöjohdot ja maantiet 2020, 30). Liittymis-

johto mitoitetaan kulutuskohteen lämmityksen ja ilmanvaihdon huipputehon, mahdollisen prosessin käyttötehon sekä käyttöveden lämmityksen lisätehon mukaan, erikseen huomioiden kesä- ja talvitilanne. Virtauksien ja putkikokojen pienentämiseksi jäähtymä pyritään saamaan mahdollisimman suureksi: $\Delta T = 50\text{--}70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Painehäviöksi liittymisjohdoille sallitaan pääsääntöisesti 2 bar/km-putkea (200 Pa/m), mutta verkon latvaosille 1 bar/km-putkea (100 Pa/m). (Kaukolämmön käsikirja 2006, 155–156; Mäkelä & Tuunanen 2015, 54.) Liittymisjohtojen koko on yleensä DN 20...DN 100 (Kaukolämpöjohdot ja maantiet 2020, 30).

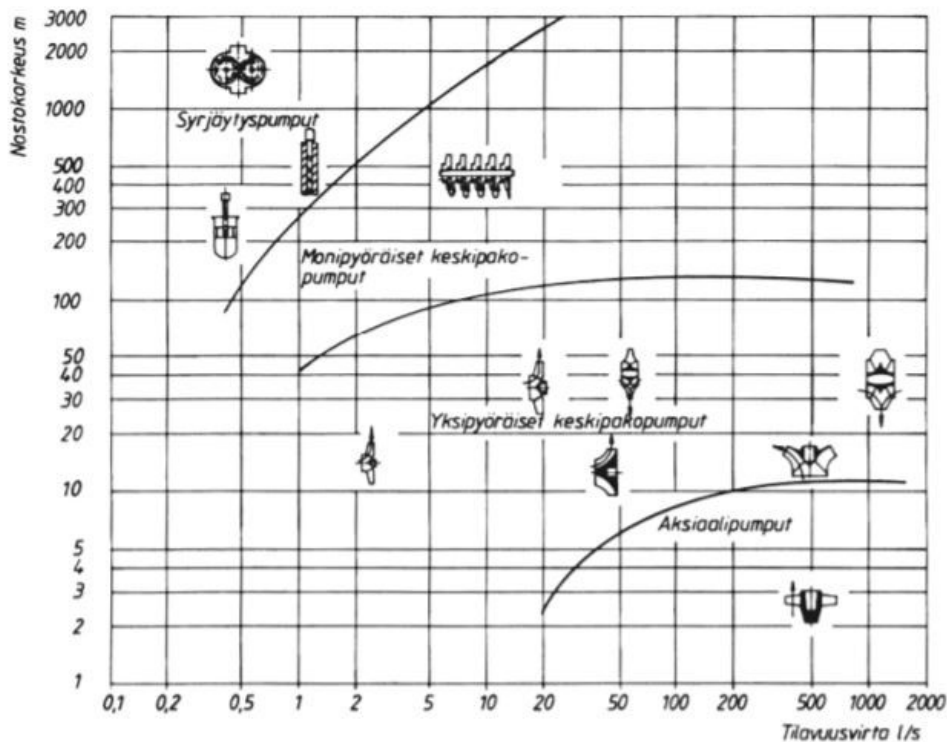
3.8 Pumppaus

Kaukolämmön kiertovesipumpuilla on hoidettava tuotantolaitoksen sisäiset, kaukolämpöverkon ja mittauskeskuksen painehäviöt sekä asiakkaan kaukolämpölaitteita ja säätöventtiilejä varten varattava paine-ero (0,6 bar). Pumpun mitoituspaineen ylärajat asettavat järjestelmän ja verkon suunnittelupaineet (ks. luku 4.3) sekä alarajan putkiston ja pumpun imupuolen alipainevara. (Kaukolämmön käsikirja 2006, 169–172.) Pumput voidaan jakaa pääryhmiin niiden toimintaperiaatteiden mukaan seuraavasti (Huhtinen, Korhonen, Pimiä & Urpalainen 2013, 134–136):

- syrjäytyspumppuihin
- dynaamisiin pumppuihin:
 - keskipakopumput
 - aksiaalipumput

Lähtökohtana pumpun valinnassa toimii haluttu vesimäärän virtaus ja tarvittava tuotettu paine-ero eli pumpun nostokorkeus virtauksen aikaansaamiseksi (ks. kuvio 12). Nestevirtojen ollessa pienet ja nostokorkeuksien ollessa suuret, sopii käytettäväksi syrjäytyspumput, joiden toiminta perustuu pesässä olevan nesteen syrjäyttämiseen paineenalaisen poistoputkeen syrjäytyselimellä. Syrjäytyspumppuja käytetään sovellutuksissa, joissa vastapaineesta riippumatta nestevirran määrää halutaan pitää vakiona. Suuret nestevirrat ja pienet nostokorkeudet käyttöalueena sopivat aksiaalipumpuille. Tämän ja syrjäytyspumppujen toimintavälialueelle sijoittuvat keskipakopumput, joita on yksi- ja monipyöräisinä. Dynaamisilla pumpuilla pumpataan tavallisesti samoja nesteitä ja niiden toiminta perustuu mekaanisen energian muuttamiseen liike- ja paine-energiaksi. Keskipakopumppujen käyttökohteet ovat hyvin moninaisia ja pääasiassa niitä käytetään pumppaamaan alhaisen viskositeetin nesteitä tarvittavan nostokorkeuden ollessa suuri suhteessa nestevirtaan.

(Huhtinen ym. 2013, 134–136; Huhtinen, Kettunen, Nurminen & Pakkanen 2000, 221.) Kaukolämpöpumppuina käytetään pääasiassa keskipakopumppuja (Kaukolämmön käsikirja 2006, 169).



Kuvio 12. Pumpputyyppien toiminta-alue tilavuusvirran ja nostokorkeuden suhteen (Energiatehokkaat pumput 2011, 7)

Pumput mitoitetaan lämmönsiirtimien toiminta-arvojen vesivirtaamalla ja kaukolämpöverkossa valitsevan paineen sekä meno- ja paluuputken välisen paine-eron mukaan (Rakennusten kaukolämmitys 2020, 28; Sirola & Tiitinen 2018, 3). Tärkeimpiä pumppujen mitoitukseen liittyviä pääsuureita on neljä. **Tilavuusvirta** on siirrettyä nestetilavuutta ajan suhteen. **Tehontarpeella** ilmaistaan pumpun ottama teho käytettävältä laitteelta eli moottorilta. **Hyötysuhteella** otetaan huomioon pumpussa tapahtuvat häviöt. **Nostokorkeus** on pumpulta tuotettavaksi tarvittava korkeusaseman lisäys, sisältäen imu- ja painekorkeuden. (Huhtinen ym. 2013, 137–139; Huhtinen ym. 2000, 221–222.) Tavanomaisesti pumppujen hyötysuhde on 70–90 % ja pienemmillä yleispumpuilla 30–50 % (Kaukolämmön käsikirja 2006, 170). Nostokorkeus H (m) vesipatsaana saadaan kaavalla 7 (Huhtinen ym. 2000, 221–222).

$$H = H_{\text{geod}} + \frac{p_p - p_i}{\rho \cdot g} 10^5 + \frac{w_p^2 - w_i^2}{2 \cdot g} + H_p + H_i \quad (7)$$

jossa:

H_{geod} = tulo- ja painepuolen nestepintojen välinen korkeusero (m)

p_p = paine painepuolen säiliössä (Pa)

p_i = paine tulosäiliössä (Pa)

ρ = nesteen tiheys (kg/m^3)

g = putoamisliikkeen kiihtyvyys (m/s^2)

w_p = virtausnopeus painepuolen säiliössä (m/s)

w_i = virtausnopeus tulosäiliössä (m/s)

H_p = paineputken virtausvastus sisältäen purkautumishäviön painepuolen säiliössä (m)

H_i = tuloputken virtausvastus (m)

Virtaus vastukset H_p ja H_i saadaan laskettua kaavalla 8:

$$H_{i/p} = \left(\lambda \cdot \frac{l}{d} + \sum \zeta \right) \frac{1}{2 \cdot g} \cdot w^2 \quad (8)$$

jossa:

$H_{i/p}$ = tulo- tai paineputken virtausvastus (m)

λ = kitkakerroin

l = putken pituus (m)

d = putken halkaisija (m)

ζ = kertavastus

g = maan vetovoiman kiihtyvyys ($9,81 \text{ m/s}^2$)

w = veden virtausnopeus putkessa (m/s)

Usein nostokorkeudella tarkoitetaan pumpun luomaa paineen lisäystä nesteelle. Paine-eron Δp (Pa) ja nostokorkeuden H (m) yhteys käy ilmi kaavasta 9:

$$\Delta p = \rho \cdot g \cdot H \quad (9)$$

jossa:

Δp = paine-ero (Pa)

ρ = nesteen tiheys (kg/m^3)

g = putoamiskiihtyvyyys (= $9,81 \text{ m}/\text{s}^2$)

H = nostokorkeus (m)

Pumpun ideaalinen, täysin häviöttömästi toimiva, vähimmäistehontarve voidaan laskea kaavalla

10:

$$P_{\text{teor}} = \Delta p \cdot q_v = \dot{m} \cdot g \cdot H \quad (10)$$

jossa:

P_{teor} = teoreettinen teho (W)

Δp = paine-ero (Pa)

q_v = tilavuusvirta (m^3/s)

\dot{m} = massavirta (kg/s)

g = putoamiskiihtyvyyys (= $9,81 \text{ m}/\text{s}^2$)

H = nostokorkeus (m)

Hyötysuhde saadaan laskettua kaavalla 11:

$$\eta = \frac{P_{\text{teor}}}{P_{\text{tod}}} \quad (11)$$

η = hyötysuhde

P_{teor} = teoreettinen teho (kW)

P_{tod} = todellinen otettu teho (kW)

Kavitaatioilmiössä pumpun imupuolen vastukset nousevat liian korkeiksi ja neste höyrystyy, jolloin pumpun paine laskee ja syntyvät höyrykuplat kuluttavat voimakkaasti pumppua. Kiertovesipumpun imupuolella on oltava 0,5–0,8 bar painetta kavitaation estämiseksi. NPSH:lla eli Net Positive

Suction Head:lla ilmaistaan valitseva paine pumpun imuaukossa, jolla taataan moitteeton toiminta, ja pumpun valmistajat ilmoittavat esitteissään NPSH-käyrän. Sallittu imukorkeus käy ilmi kaavasta 12. (Kaukolämmön käsikirja 2006, 170–171.)

$$H_i > \frac{p_o - p_h}{\rho \cdot g} - \text{NPSH} - H_v \quad (12)$$

missä:

H_i = imukorkeus (m)

P_o = imusäiliössä nestepintaan kohdistuva paine (Pa)

P_h = nesteen höyrystymispaine pumppauslämpötilassa (Pa)

ρ = nesteen tiheys (kg/m^3)

g = putoamiskiihtyvyys (= $9,81 \text{ m}/\text{s}^2$)

H_v = imujohdon vastus painekorkeutena (m nestepatsasta)

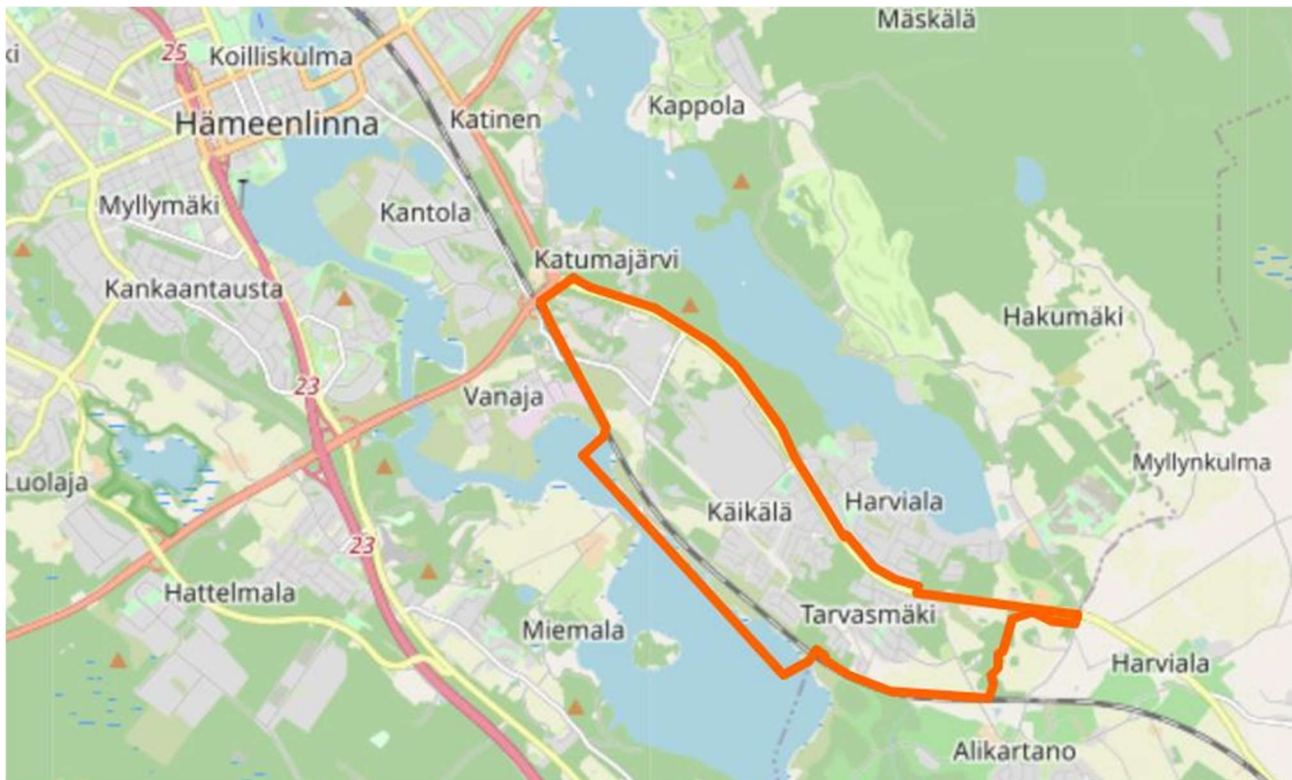
4 Käikälän hukkalämmön hyödyntäminen

4.1 Lähtötilanteen kartoittaminen

Hämeenlinnan kaukolämmön tuotantoa tarkasteltiin yleisellä tasolla. Lähtötilanteen kartoittamisessa perehdyttiin nykyisen kaukolämpöverkon rakenteeseen, siihen kytkettyihin lämmöntuotantolaitoksiin sekä niiden tuotantoon. Lähtötilanteen tunteminen toimi pohjana tutkimiselle. Lähtötilanteen kartoittamisessa hyödynnettiin runsaasti vuoden 2018 Planoran tuottamia laskelmia Loimualle (silloinen Elenia Lämpö).

Alustavasti tiedettiin, että toimeksiantajayrityksen teollisuuskaukolämpöasiakkaalla on lämmön myyntiä sekä ostoa. Koska teollisuuskohteessa on oma lämmöntuotanto, kaukolämmön myynti kohteeseen on ollut vähäistä. Teollisuuskohteen on tarkoitus kasvattaa tulevaisuudessa omaa hukkalämmön myyntiään toteutuvan tuotannon pohjakuormalla. Opinnäytetyön skenaarioissa tutkittiin maksimaalisen hyödyn tuotoksia. Tämä tarkoittaisi hukkalämpöä olevan aina käytössä maksimisopimusteholla, seisokkiajat poissuljettuina. Näin ollen lämmönmyyntiä olisi vuodessa 5 MW:n sopimusteholla noin 43,8 GWh ja 10 MW:n sopimusteholla olisi taas noin 87,6 GWh. Planoran laskelmat ennustavat, että teollisuuskohteen hukkalämmöllä kaukolämpövesi saadaan lämmi-

tettyä yli 88 °C:seen. Näin ollen siis lämpöä voidaan siirtää suoraan verkon menoveteen lämmönvaihtimen välityksellä, eikä lämpöpumppua tarvita (ks. kuvio 5). Aiemmin todettiin, ettei teollisuuskohteen nimeä eikä sen tarkkaa sijaintia voida paljastaa, mutta siihen voidaan viitata alueellisesti, sijaitsevan siis Käikälässä (ks. kuvio 13). (Hämeenlinnan kaukolämpöverkoston kehittämissuunnitelma 2018, 20; Vuoden 2025 tilanne -3 °C:ssa optimoidulla tuotannolla ja pumppauksella 2018; Vuoden 2025 tilanne -15 °C:ssa optimoidulla tuotannolla ja pumppauksella 2018.)



Kuvio 13. Karttakuva Käikälän alue rajattuna oranssilla (© OpenStreetMapin tekijät 2018, [CC-BY-SA 2.0](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0/), muokattu)

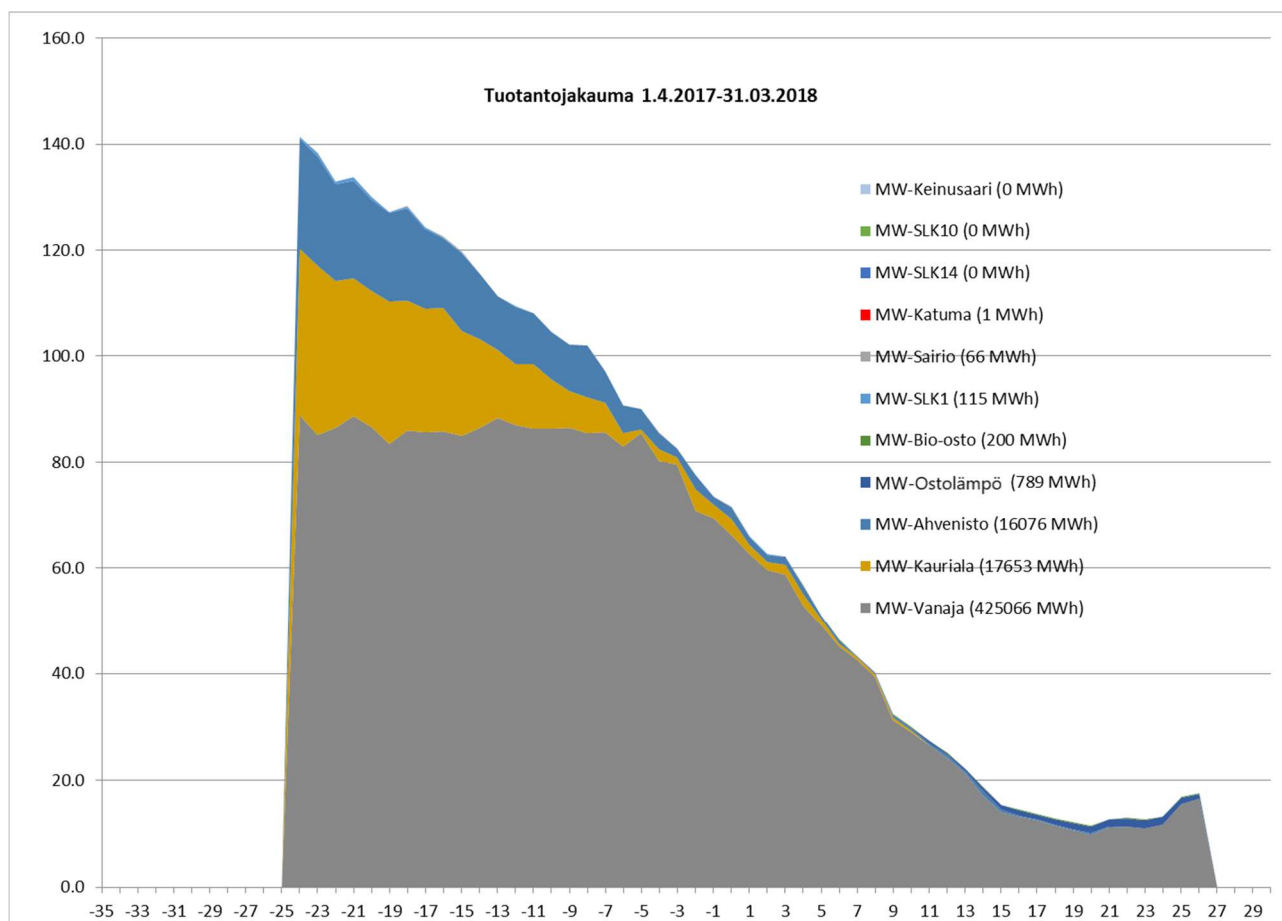
Verkkoon kytketyistä laitoksista ja niiden yleisistä tiedoista sekä sijainneista laadittiin lista (ks. taulukko 2) (Luettelo Hämeenlinna Kaukolämpölaitokset 2018). Taulukossa on esitetty laitosten tiedot niiltä osin, kuin niitä oli saatavilla. Sarakkeella ”yksikkömäärä kpl” tarkoitetaan kunkin lämpölaitoksen kattiloiden lukumäärää. Taulukosta on etenkin oleellista huomioida teollisuuskohteeseen johtava putkikoko. Keinusaaren varakeskuksen käytöstä poistumisen myötä tarvitaan uutta varatuotantokapasiteettia ja yhdeksi uudeksi varalaitokseksi on esitetty Katisen alueelle sijoitettavaa 40

MW:n laitosta. Sitä olisi myös mahdollisuus käyttää huippulaitoksena. (Hämeenlinnan kaukolämpöverkoston Kehittämissuunnitelma 2018, 21.) Lyhenteet: POR = raskas polttoöljy ja POK = kevyt polttoöljy. (ks. taulukko 2.)

Taulukko 2. Hämeenlinnan kaukolämpölaitokset (Luettelo Hämeenlinna Kaukolämpölaitokset 2018)

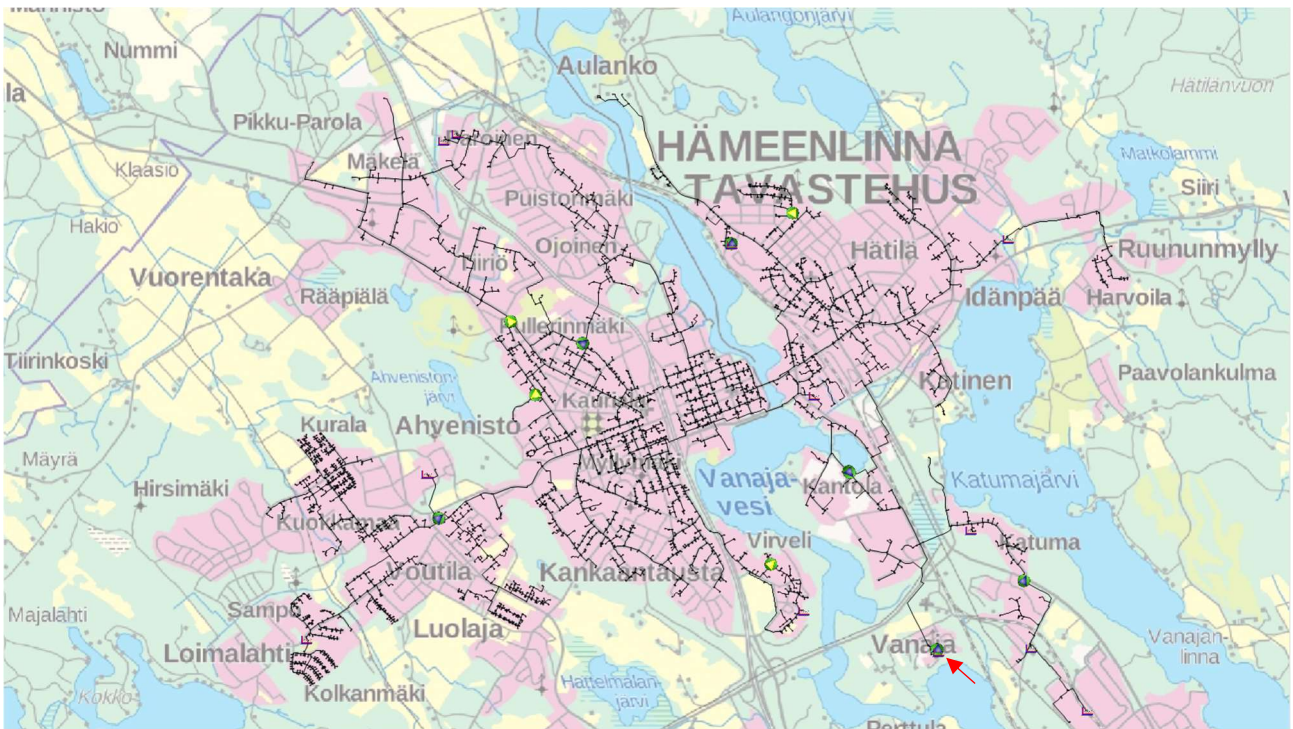
Sijainti	Tunnus	Tyyppi	Yksikkömäärä kpl	Tehokapasiteetti MW	Todellinen huipputeho MW	Polttoaine	Käynnistys järjestys	Putkikoko
Vanaja		Voimalaitos	3	170	105	Kaasu/Turve/Hake	1	DN500
Keinusaari (poistumassa)		Varakeskus	2	63		POR		DN400
Ahvenisto		Lämpökeskus	4	49	49	Kaasu/POK	2-3	DN300
Kauriala		Lämpökeskus	2	36	36	Kaasu/POK	2-3	DN250
Visämäki (poistumassa)	SLK1	Vara, siirrettävä	1	3		POK		DN125
Sairio		Lämpökeskus	1	10	6	POK		DN200
Katuma		Lämpökeskus		10	10	POK		DN200
Käikälän teollisuuslaitos		Ostolämpökohde		2,9				DN150
Konepajantie	SLK5	Vara, siirrettävä	1	0,79		POK		DN125
Loimalahdentie	SLK6	Vara, siirrettävä	1	0,79		POK		DN100
Paroistentie	SLK10	Vara, siirrettävä	2	5		POK		DN150
Ruununmyllytie	SLK14	Vara, siirrettävä	1	3,7		POK		DN125

Tuotantojakaumasta 2017–2018 (ks. kuvio 14) nähdään Vanajan voimalaitoksen sekä Ahveniston ja Kaurialan lämpökeskusten olevan merkittävimmät lämmöntuotantokohteet Hämeenlinnan kaukolämmityksessä (Hämeenlinnan kaukolämpöverkoston kehittämissuunnitelma 2018, 6). Vanajan voimalaitoksella lämpöä tuotetaan pääosin kahdella biopolttoaineen kattilalla; K5 ja K6, ja mahdollisuuksien mukaan myös kaasuturbiinin pakokaasukattilalla. K5-kattilan minimiteho on 23–25 MW ja maksimiteho 55 MW, K6-kattilalla vastaavasti 15 MW ja 50 MW. Lisäksi Vanajan voimalaitoksella on käytössä 400 MWh:n kaukolämpöakku. Ahveniston lämpökeskuksen minimiteho on 2–3 MW, Kaurialan 4–5 MW ja Sairion 2 MW. Teollisuuskohteeseen viitataan ”MW-Ostolämmöllä”. Tuotantojakaumasta voidaan huomata teollisuuskohteen hukkalämmön hyödyntämisen olleen toistaiseksi vähäistä. Vaikka tuotantojakauman data on vanhaa, voitiin todeta sen suuruusluokkien vastaavan lähelle nykyistä tuotantoa, sillä merkittävästi suurempia asiakkaita ei ole liittynyt verkkoon 2018 vuoden jälkeen. (ks. kuvio 14.)



Kuvio 14. Tuotantojakauma 1.4.2017–31.3.2018 (Planora 2018, muokattu)

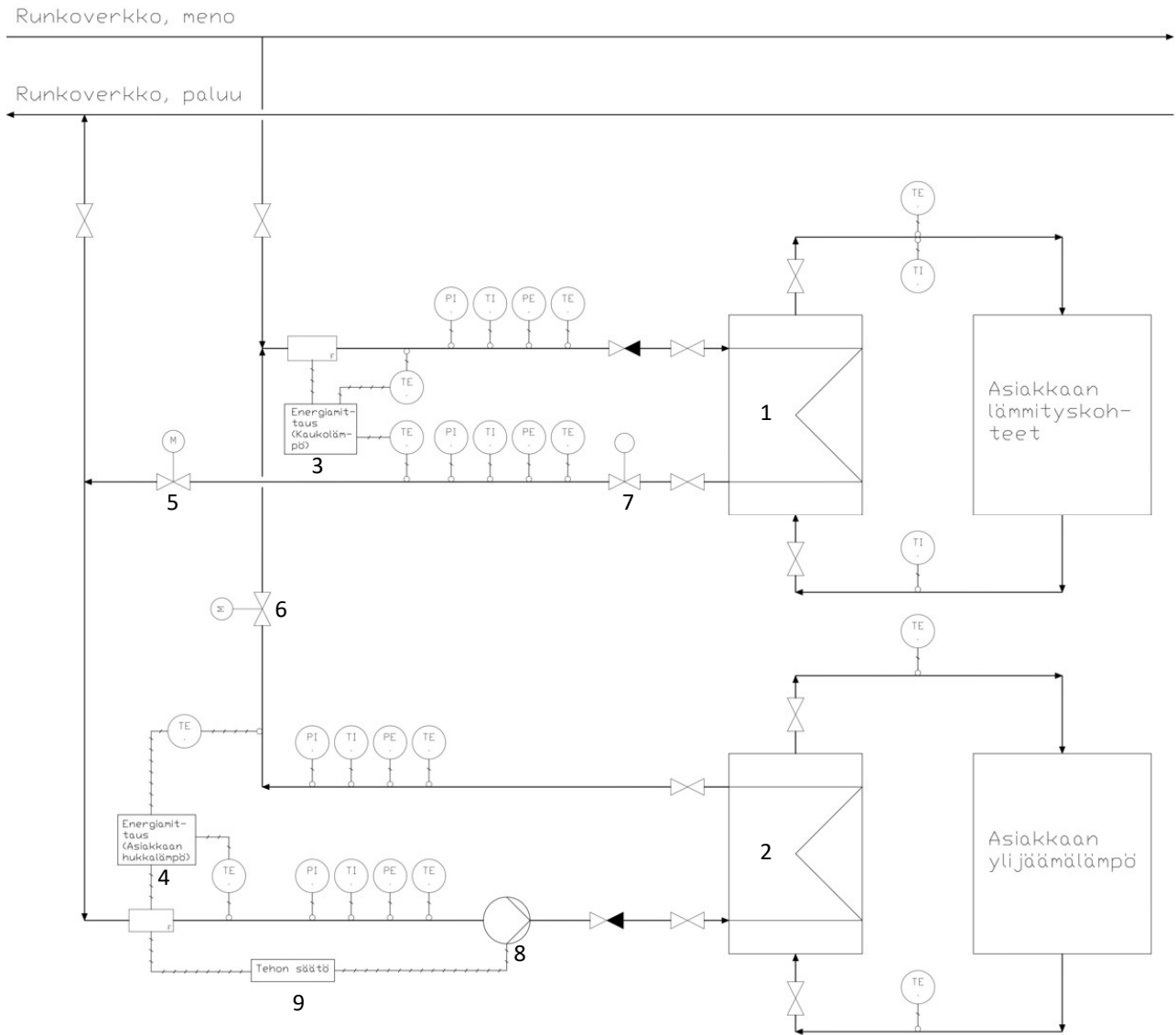
Hämeenlinnan kaukolämpöverkkoa analysoitiin yleisesti. Verkko on keskiössä ja tiheästi asutuilla alueilla rengasverkkoa, mutta paikoitellen ja etenkin laitamilla rakenne on puuverkkoa. Huomioitavaa on Katuman kautta Käikälän alueelle runkoverkon olevan rakenteeltaan puuverkkoa. (ks. kuvio 15.) Puuverkkorakenne rajoittaa lämmöntuottajien mahdollisuuksia liittyä verkkoon, vaikkakin verkon olosuhteet ovat paremmin tiedossa (Sirola & Tiitinen 2018, 3). Verkon rakenteesta johtuen virtaussuunta tulee vaihtelemaan, kun lämpöä siirretään Vanajalta Käikälän suuntaan ja päinvastoin. Kuviossa 15 on osoitettu Vanajan voimalaitos punaisella nuolella.



Kuvio 15. Hämeenlinnan kaukolämpöverkko taustakartalla (Planora 2018, muokattu)

4.2 Asiakaskytken mallintaminen

Teollisuuskohte tullaan kytkemään Hämeenlinnan kaukolämpöverkkoon sekä asiakkaana että lämmöntuottajana. Kytkentä (ks. kuvio 16) on mallinnettu Loimuan henkilökunnan ehdotetun toteutuksen mukaan. Lisäksi kytken mallintamisessa on sovellettu kaukolämmön esimerkkikytkentöjä 4 ja 11 (ks. kuvat 6 ja 7) yhdistämällä ne yhtenäiseksi kokonaisuudeksi. Kytkenäkuva on taustaltaan periaatteellinen eikä se vastaa tulevaa todellista kytkentää. Kytkenäkuva on piirretty AutoCAD Plant:n opiskelijaversiolla. Siirrettävät 5 tai 10 MW ovat kohtalaisen suuria lämpötehoja. Kuitenkin lämpötila- ja painetasot pysyvät kaukolämpöverkon mitoitusarvoissa. Näin ollen lämmön siirtimiksi valittaisiin tiivisteelliset levylämmönsiirtimet (ks. luku 3.5).



Kuvio 16. Teollisuuskohteen kaksisuuntainen kaukolämpökytkentä (periaate)

Tässä kappaleessa esitellään kuviossa 16 esitetyn kytkennän toimintakuvaus. Kytkennässä on oma lämmönsiirrin kaukolämmön ostoa (1) ja hukkalämmön myyntiä (2) varten. Energiamittauksiin (3 ja 4) on liitetty kunkin lämmönsiirtimen meno- ja paluuputkesta lämpötila-anturitieto sekä meno-putkista virtausmittaukset. Energiamittauksella 3 mitataan teollisuuskohteen ostavaa kaukolämpöä ja 4:lla myytävää hukkalämpöä. Ostotilanteessa moottoritoimilaitteella ohjattu sulkuventtiili 5 on auki ja sulkuventtiili 6 on kiinni. Lämmönsiirtimen (1) paluupuolella oleva säätöventtiili (7) säätelee siirtimen läpikulkevaa virtausta asiakkaan lämmöntarpeen mukaan. Myyntitilanteessa moottoritoimilaitteella ohjattu sulkuventtiili 6 on auki ja sulkuventtiili 5 on kiinni. Käyntiluvan saatuaan pumppu (8) lähtee keräämään ja tuottamaan painetta. Kaukolämpöveden virtaussuunta kääntyy

verkon paluulinjasta, lämmönsiirtimen (2) läpi, menolinjaan tuotetun paineen kasvattua suuremmaksi kuin verkoston paine menolinjan liityntäkohdassa. Pumppua (8) ohjataan taajuusmuuntajalla ja taajuusmuuntajaa ohjataan tehon säädöllä (9). (Ks. kuvio 16.)

4.3 Virtauksien mitoittaminen

Lämmönsiirtimien läpi kulkevat maksimivirtaukset tuli selvittää, jotta voitiin mitoittaa riittävän suuri pumppausteho kaukolämpöpumpulle sekä runkoverkon putkikoko Käikälä–Vanaja välille. Teollisuuskohteesta siirrettävälle hukkalämmön teholle käytettiin kahta työlukua: 5 ja 10 MW (Φ). Laskennallisesti selvitettiin, mitkä ovat massa- ja tilavuusvirran (\dot{m} ja q_v) suurimmat arvot, jotta edellä mainitut tehot saadaan siirrettyä kaukolämpövedeen. Myös minimivirtaukset laskettiin mahdollista jatkokäyttöä varten. Matemaattinen laskenta tarkasteluna onkin hyvin teoreettinen ja massavirtojen arvoissa saattaisi ilmetä heittoa todellisuudessa.

Laskennassa käytettiin kaavaa 1, joka yhtälöratkaisulla käännettiin \dot{m} :n ja q_v :n osalta ratkaistuun muotoon (ks. luku 3.5). Teollisuuskohte on liitetty runkoverkkoon, joka määrittää meno- ja paluujohdon välisen lämpötilaeron (ΔT) olevan 40–55 °C (ks. luku 3.7). Laskennassa on käytetty paluujohdon kaukolämpöveden pienimmän ja suurimman lämpötilan (40 °C ja 60 °C) määrittäviä ominaislämpökapasiteetin (c_p) ja tiheyden (ρ) arvoja. Ominaislämpökapasiteetin ja tiheyden arvot luettiin Appendix-työkalusta (40 °C ja 60 °C) (ks. Cengel & Ghajar 2015, 920). Laskentatyö toteutettiin luomalla kaava 1 Excel-ohjelmistoon. Kaavan toimivuus ja laskennan luotettavuus aluksi varmistettiin hyödyntämällä Planoran verkostolaskelmissa esiintyviä tapauksia. Kaavaan syötettiin laskelmissa esiintyviä lähtöarvoja ja Planoran tuloksia verrattiin omiin, jotka täsmäsivät. Laskennan luotettavuuden varmistettua, voitiin aloittaa varsinainen tutkimuskohteen massavirtojen laskenta ja tulosten taulukointi (ks. taulukko 3).

Taulukko 3. Massa- ja tilavuusvirtojen maksimi- ja minimiarvot 5 ja 10 MW:n tehoilla

Massa- ja tilavuusvirrat 5 MW:n teholla			Massa- ja tilavuusvirrat 10 MW:n teholla		
	\dot{m} (kg/s)	q_v (dm ³ /s)		\dot{m} (kg/s)	q_v (dm ³ /s)
$\Delta T = 40$ °C, veden alkulämpötila 40 °C	29,911	30,150	$\Delta T = 40$ °C, veden alkulämpötila 40 °C	59,823	60,299
$\Delta T = 40$ °C, veden alkulämpötila 60 °C	29,869	30,376	$\Delta T = 40$ °C, veden alkulämpötila 60 °C	59,737	60,752
$\Delta T = 55$ °C, veden alkulämpötila 40 °C	21,754	21,927	$\Delta T = 55$ °C, veden alkulämpötila 40 °C	43,508	43,854
$\Delta T = 55$ °C, veden alkulämpötila 60 °C	21,723	22,092	$\Delta T = 55$ °C, veden alkulämpötila 60 °C	43,445	44,183

Mitä vähemmän siis nostetaan virtaavan kaukolämpöveden lämpötilaa, sitä enemmän vettä on virrattava lämmönsiirtimen läpi, kun teho pysyy vakiona. Laskennallisesti osoitetaan suurimpien massavirtojen olevan 29,911 kg/s (5 MW) ja 59,823 kg/s (10 MW) veden alkulämpötilan ja lämpötilaeron ollessa 40 °C. Laskennallisesti osoitetaan suurimpien tilavuusvirtojen olevan taas 30,376 dm³/s (5 MW) ja 60,752 dm³/s (10 MW) veden alkulämpötilan ollessa 60 °C ja lämpötilaeron ollessa 40 °C. Samalla lämpötilaerolla, mutta suuremmalla veden alkulämpötilalla tilavuusvirrat ovat suuremmat, joka johtuu lämpöisemmän veden tiheyden ollessa pienempi. Tästä tuleekin nimenomaan huomioida, ettei suurempi tilavuusvirta tarkoita suurempaa massavirtaa.

4.4 Putkikoon mitoittaminen

Selvitettyä 5 ja 10 MW:n tehoa kuljettavat massavirrat, laskettiin seuraavaksi niitä siirtämään kykenevä runkojohdon putkikoot. Putkikoot määritettiin sallitun painehäviön rajaehdolla. Koska kyseessä on runkojohto, sallittu painehäviö on 1 bar/km-putkea (ks. luku 3.7). Aiheen rajauksen puitteissa tarkastelu tehtiin ainoastaan itsessään putkidimension ja sen sisäpinnan karheuden aiheuttaman painehäviön kannalta eikä verkoston kertavastuspainehäviöitä huomioitu.

Kaukolämpöputken sisäputkihalkaisija laskettaisiin kaavoilla 2–3 ja kitkan aiheuttama painehäviö kaavoilla 4–6 (ks. luku 3.7). Tutkimuksessa putkikoon mitoituksessa ja painehäviön laskennassa hyödynnettiin Logstor Calculator:ia. Kyseisellä sovelluksella kyetään laskemaan tarkasti energiahävikkejä sen algoritmien perustuessa laajoihin fysikaalisiin ja matemaattisiin malleihin (Logstor 2022). Näin ollen tätä pidettiin luotettavana sekä myös tehokkaana työkaluna virtauksien painehäviöiden laskentaan. Sovellus toteuttaa laskennan käytännössä suorille putkijohdoille. Tällä ei ollut vaikutusta tarkasteluun, sillä verkoston kertavastukselliset painehäviöt oli joka tapauksessa rajattu

laskennan ulkopuolelle. Virtausnopeuksien rajoina käytettiin PSK 2401:n suositeltuja virtausnopeuksia (ks. taulukko 1). Kyseisen sovellus antaa valita parametreinä (ks. kuvio 17):

- Meno- ja paluuvirran lämpötilan (Flow [°C] ja Return [°C])
- Putkijärjestelmän (Type of system)
- Putkidimension manuaalisen valittavuuden (Select Dimension)
- Painehäviön ilmoitettavan yksikön (Pressure drop, given in)
- Mitoitusvirtauksen tai siirrettävä energian (Flow)
- Virtaavan aineen (Media material)
- Putkijärjestelmän pituuden (Length Channel [m])
- Siirrettävän energian tai virtauksen suuruuden (Energy demand [kW] tai Flow [m³/h])
- Sallitun painehäviön Pa/m-putkea (Criteria [Pa/m])
- Sallitun virtausnopeuden m/s (Criteria [m/s])
- Putkimateriaalin (PipeSystem)
- Putken/putkien DN-koon (Dimension [d1] ja Dimension [d2])

LOGSTOR Calculator Archive Energy loss Aging curves **Pressure Loss** Documentation Design Tools Santeri Jaakonsaari

Pressure Loss

Open/Save

Temperatures

Flow [°C]

Return [°C]

System

Type of system

Select Dimension

Parameters

Pressure drop, given in

Flow

Media material

Sektioner

smaller Dimensions	Section	Length Channel [m]	Energy demand [kW]	Criteria [Pa/m]	Criteria [m/s]	PipeSystem	Dimension (d1)	Dimension (d2)	Press. grad. (flow/return) [Pa/m]	Velocity (flow/return) [m/s]	Mass Flow (flow/return) [kg/s]	Press. loss (flow/return) [Bar]
<input type="button" value="No"/>	P1-P2	1000	5000	100	2,5	Steel	150	150	128 / 134	1.52 / 1.52	29.79 / 29.92	2.619

© Logstor 2022

Kuvio 17. Kuvakaappaus Logstor Calculator:n näkymästä (Logstor 2022)

Laskennallisesti selvitetiin, kuinka suuret painehäviöt 5 ja 10 MW:n siirtämisestä syntyy lämpötilaeron 40–55 °C määrävillä virtauksilla. Taulukosta 2 käy ilmi teollisuuskohteeseen johtavan runkojohdon putkikoon olevan DN 150, josta laskenta aloitettiin ja kokeiltavaa kokoa lähdettiin suurentamaan. Laskennassa paluuvirtauksen lämpötiloina käytettiin 40 °C ja 60 °C, joista menovirran lämpötilaa nostettiin 1 °C kerrallaan ylöspäin alkaen lämpötilaerolla 40 °C ja päättyen 55 °C. Koska

todellisuudessa teollisuuskohteeseen johtaa Mpuk-järjestelmä (ks. luku 3.6) (Järjestelmän staattiset arvot 2018), valittiin sovelluksessa putkijärjestelmäksi putkipari samalla putkikoolla (pair [equal]). Painehäviön yksiköksi valittiin bar ja virtaavaksi aineeksi vesi. Koska tarkoitus oli tutkia painehäviötä siirrettävän tehon mukaan, valittiin virtausvalintakohtaan (flow) ”ei”. Putkijohdon pituudeksi annettiin 1000 m, koska painehäviötä tuli verrata 1 bar/km-putkea rajahtoon. Siirrettäväksi energiaksi annettiin 5000 kW ja 10000 kW. Sallitun painehäviön ollessa 1 bar/km-putkea, annettiin ensimmäiseksi kriteeriksi 100 Pa/m ja toiseksi kriteeriksi kunkin putkikoon suositeltu virtausnopeus taulukosta 1. Putken materiaaliksi valittiin teräs sen ollessa pääasiallinen kaukolämpöjohdon putkimateriaali (ks. luku 3.6). Putkidimensiot valittiin väliltä DN 150–250 kussakin putkikotarkastelussa. Annettujen parametrien jälkeen laskuri tuotti tuloksina paineen alenemisen, virtausnopeuden, massavirran meno- ja paluujohdossa. Kyseiset massavirrat myös täsmäsivät jo aiemmin laskettujen massavirtojen kanssa (taulukko 3). Vaikka painehäviön kohta (Press. loss (flow/return) [bar]) saattaa antaa ymmärtää antavansa tuloksen meno- ja paluujohdolle erikseen, on kuitenkin kyseessä näiden yhdistetty painehäviö. Kunkin laskentatarkastelun saadut tulokset taulukoitiin (ks. liite 1).

Liitteeseen 1 kootut laskentatulokset osoittavat 5 MW:n siirtämisen mahdolliseksi DN 150 putkikoolla. Suurimmillaan painehäviö on 1,34 bar/km-putkea. Kitkan aiheuttamaa painehäviötä DN 200-putkikoossa 5 MW:n siirtoteholla ei ole erikseen laskettu. 10 MW:n pienin massavirta on jo suurempi kuin 5 MW:n massavirta maksimissaan (ks. taulukko 3). Näin ollen tarkasteltaessa 10 MW:n painehäviötä 55 °C:n lämpötilaerolla, voidaan todeta DN 200-koon olevan ihanteellinen 5 MW:n tehon siirtämiseen jopa heikolla jäähtymällä. 10 MW:n siirtäminen on taas selkeästi kannattamatonta putkikoolla DN 150 painehäviön ollessa suurimmillaan 5,21 bar/km-putkea ja pienimmilläänkin jo 2,67 bar/km-putkea. Nämä painehäviöt ovat selkeästi suurempia kuin ohjeellinen sallittu painehäviö poikkeustapauksiin 2 bar/km-putkea (ks. luku 3.7). Liian raskas painehäviö johtaa kannattamattomaan pumppaukseen. DN 200-koon putkessa taas voidaan siirtää 10 MW:n tehoa. Painehäviö on suurimmillaan 1,29 bar/km-putkea. Jos putkikooksi valittaisiin DN 250 siirtämään 10 MW:n tehoa, painehäviö olisi merkittävästi pienempi 40 °C lämpötilaerolla paluueden ollessa 40–60 °C. Verrattaessa taulukoiden painehäviötä samoilla siirtotehoilla ja lämpötilaeroilla, mutta eri lähtölämpötiloilla, huomataan ettei veden lämpötilalla ole merkittävää vaikutusta painehäviöön. Lämpötilaeron määräävä virtauksen suuruus käytännössä on ratkaiseva tekijä putken kitkan aiheuttamaan painehäviöön. Mitä enemmän siis putkessa virtaa kg/s kaukolämpövettä, sitä enemmän kitka vaikuttaa virtaukseen. (Ks. liite 1.)

4.5 Pumpputyypin valinta ja mitoittaminen

Teollisuuskohteen asiakaskytken kaukolämpöpumpun tulee kyetä siirtämään 5 tai 10 MW:n tehoa kuljettavat virtaukset (ks. taulukko 3). Pumpun tehtävänä on pumpata kaukolämpövedettä runkoverkon paluuputkesta menoputkeen asiakkaan ylijäämälämpöä siirtävän lämmönvaihtimen kautta (ks. kuvio 16). Pumpun tulee siis lisäksi kyetä sekä tuottamaan riittävän suuri paine kääntääkseen verkoston virtaussuunnan että voittamaan verkoston ja järjestelmän painehäviöt. Toimeksiantajayrityksen henkilökunnan ohjeistuksella mitoituksessa käytettiin pumpun nostokorkeudelle työlukuna 60 m. Tällä taattiin mitoittettavan pumpun tuottavan varmasti riittävän suuri paine.

Kaukolämpöpumpuksi valittiin yksipyöräinen keskipakopumppu. Pumpputyypin on käytännöllisin valinta tilavuusvirtauksien (q_v) suurimpien arvojen ollessa $\approx 30,4$ l/s ja $\approx 60,8$ l/s (ks. taulukko 3) ja vaaditun nostokorkeuden ollessa 60 m (H) (ks. kuvio 12). Pumpun tuottama paine-ero (Δp) laskettiin kaavalla 9 (ks. luku 3.8). Paine-eron laskennassa käytettiin 40 °C:n veden tiheyttä (ρ) sen ollessa paluuputken alhaisin lämpötila, jolloin kaukolämpöveden tiheys on suurimmillaan. Näin saatiin suurin pumpun tuotettava paine-ero. Teoreettiset tarvittavat pumppaustehot 5 ja 10 MW:n virtauksille laskettiin kaavalla 10 (ks. luku 3.8). Pumppaustehojen laskennassa käytettiin kunkin hukkalämpötehon 40 °C:n paluueden (40 °C:n lämpötilaerolla) mukaisia massavirtoja, jotka olivat arvoiltaan suurimmat (\dot{m}) (ks. taulukko 3). Näin saatiin vaaditut vähimmäispumppaustehot 5 ja 10 MW:n massavirroille. Veden tiheyden arvot katsottiin Appendix-tilukosta (ks. Cengel & Ghajar 2015, 920).

Taulukko 4. Pumpun tuottama paine-ero ja pumppaustehot

Pumpun tuottama paine-ero ja pumppaustehot		
Tuotettava paine-ero	5,84	bar
Teoreettinen pumppausteho 5 MW:n massavirrälle	17,61	kW
Teoreettinen pumppausteho 10 MW:n massavirrälle	35,21	kW

4.6 Hukkalämmön vaikutus kaukolämmöntuotantoon

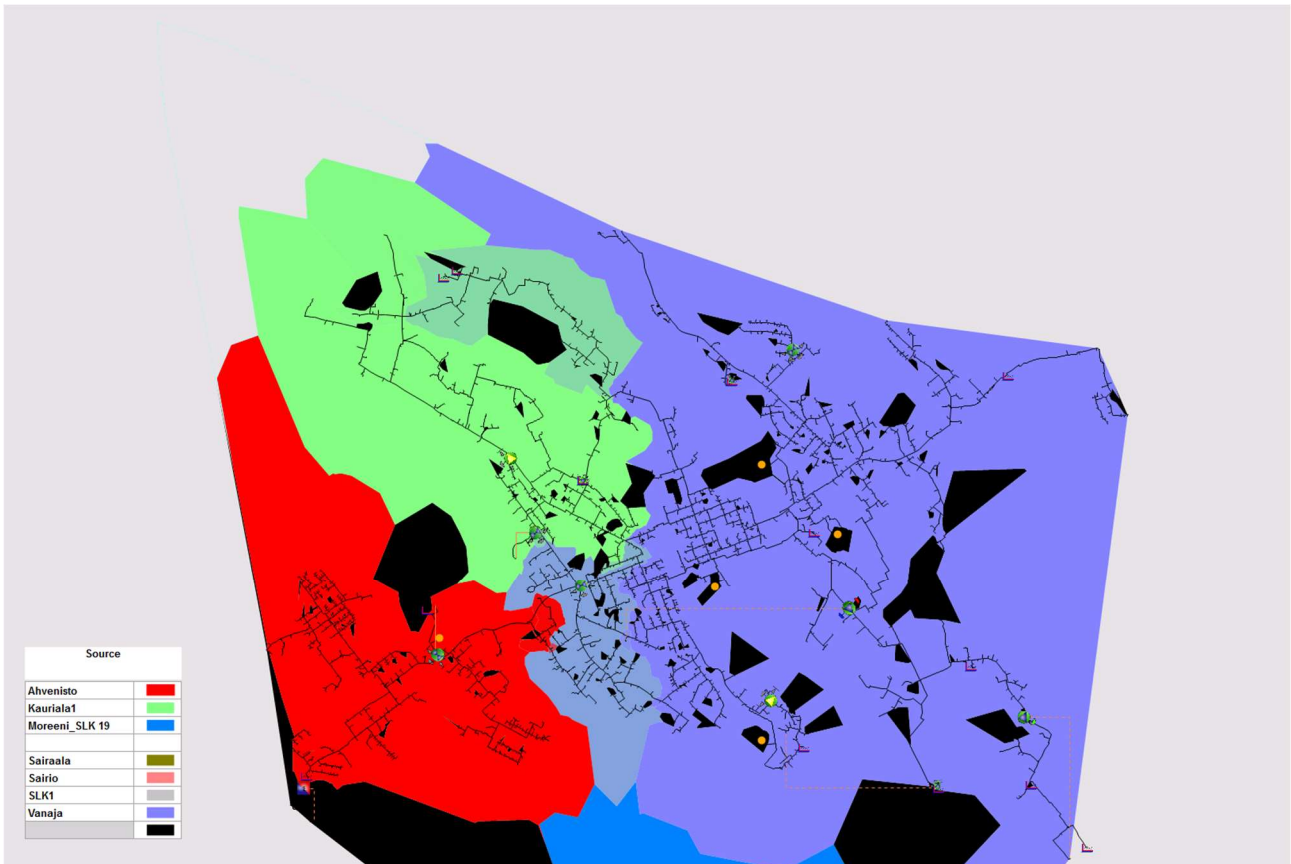
Tutkimuksessa arvioitiin 5 ja 10 MW:n hukkalämpötehojen vaikutusta nykyiseen tuotantoon. Tässä hyödynnettiin Loimuan toimittamaa tuntidataa laitosten tuotantotehoista ajalta 1.10.2020 –

25.3.2022 (HML-verkon tehot ja erillislaitosten käyttö 2022). Kyseisestä datasta rajattiin käyttöön vuoden mittainen otanta aikaväliltä 1.12.2020 – 30.11.2021. Kyseisen datan pohjalta tuotettiin kuvaajia ja laskelmia, joista tehtiin analyysit. Arvioinnin tuottamisessa hyödynnettiin Loimuan henkilökunnan asiantuntijuutta ja kuvauksia laitosten käytöstä. Näiden pohjalta laadittiin kuvaus siitä, kuinka Vanajan voimalaitoksen ja huippulaitosten (Ahvenisto, Kauriala ja Sairio) nykyinen ajaminen muuttuisi verkkoon syötetyn hukkalämpötehojen myötä. Aikaväli 1.12.2020 – 30.11.2021 on jaettu tarkastelun osalta neljään osaan, kolmen kuukauden väleihin. Tarkoituksena oli saada tuotetuista kuvaajista helpommin luettavia ja tulkittavia. Kuvaajissa esiintyvät ostolämpötehot 5 ja 10 MW eivät sisälly todelliseen tuotantoon, vaan ovat havainnollistamassa, kuinka todellista tuotantoa olisi korvattavissa näillä hukkalämpötehoilla. Kuvaajat on koottu liitteisiin 2–5.

Hämeenlinnan tuotantolaitosten ajamisessa pääperiaatteena on, että Vanajan voimalaitosta ajetaan aina maksimaalisessa teholla verkon pyyntitehoon nähden ja sen jälkeen tarpeen vaatiessa käynnistetään huippulaitokset. Tällaisia tapauksia ovat esimerkiksi, kun Vanajan huipputeho ei riitä kattamaan verkon pyyntiä tai Vanajalla on menossa tuotantokatko. Kaikki teollisuuskohteen tarjolla oleva hukkalämpöteho tultaisiin aina siirtämään verkkoon. Näin ollen Vanajan voimalaitosta ja huippulaitoksia ajetaan sen mukaan, että 5 tai 10 MW saadaan kaikissa käyttötilanteissa kokonaan hyödynnettyä. Peruseriaatteena on, että Vanajan voimalaitoksella tuotetaan lämpöä niin paljon, kuin kaukolämpöverkko vielä kykenee sitä vastaanottamaan hukkalämmön rinnalla. Kun Vanajan voimalaitoksen minimiteho hukkalämpötehon kanssa yhdistettynä ylittäisi verkon vastaanottokyvyn, voimalaitosta ajettaisiin katkokäytöllä. Tällöin kaukolämpöakun varausta vuorotellen ladattaisiin ja purettaisiin. Kun taas Vanajan ja hukkalämmön yhteisteho ei kattaisi verkon pyyntiä, huippulaitokset ajettaisiin ylös. Tuotantokatkotilanteissa Vanajan tuotanto korvattaisiin niin pitkälle hukkalämmöllä ja akulla kuin mahdollista, sen jälkeen huippulaitokset käynnistettäisiin ajoon.

Tiettyjen kulutus- ja sääolosuhteiden rajoissa kaikki Hämeenlinnan kaukolämpö voidaan tuottaa Vanajan voimalaitoksella, jossa poltetaan biopohjaisia polttoaineita. Tällöin Käikälän alueelta saatavalla hukkalämmöllä kevennettäisiin Vanajan kuormaa. Kun sääolosuhteet ja/tai kulutuspiikit vaativat huippulaitosten käyttöä, tultaisiin hukkalämmöllä keventämään näiden laitosten tuotannon kuormaa. Käytännössä siis Vanajan voimalaitokselta pumpattaisiin hukkalämpökapasiteetin

edestä huippulaitosten tehosyöttöalueille korvaamaan niiden tuotantoa (ks. kuvio 18). Näin tehtäisiin helpomman tehon siirtämisen vuoksi, mikä johtuu Vanajan sijainnista, pumppaustehosta ja voimalaitokselta lähtevästä putkikoosta. Huippulaitosten kuormien keventämisen myötä fossiilisen maakaasun ja öljyn käyttö vähenee.



Kuvio 18. Laitoksien syöttöteho- ja vaikutusalueet (Planora 2018, muokattu)

Merkittävin vaikutus hukkalämmöllä on Vanajan voimalaitoksen kesäajan ajamiseen. Voimalaitoksen K6-kattilan minimiteho (15 MW) on jo mitoitettu kesäajan miniteholle. 5 tai 10 MW:n hukkalämpötehon syöttö verkkoon pakottaisi kattilan ajoa vuorotellen ylös ja alas, eli katkokäyttämiseen ja kaukolämpöakun aktiiviseen hyödyntämiseen. Kattilan ajolla ladattaisiin 400 MWh:n kaukolämpöakkuja, josta tyhjennettäisiin 5 tai 10 MW:n hukkalämpötehon rinnalle loput kaukolämpöverkon tehopyynnistä. Kattila ajettaisiin alas ladattuaan akun täyteen ja takaisin ylös, kun akun varaus on 80–100 MWh:n tasolla. Toistuva kattilan ylös ajaminen lisää käynnistyksessä tarvittavan maakaasun käyttöä. Lämmöntuotannossa 01.06.2021 – 31.08.2021 on hyvin voimakasta vaihtelua huippu-

laitosten käytössä (ks liite 4). Todellisuudessa kesä- ja heinäkuussa huippulaitoksilla ei ollut tuotantoa kuin ainoastaan elokuussa, jolloin Vanajan voimalaitoksella oli tuotantoseisokki revision vuoksi. Tästä syystä diagrammin Vanajan ja huippulaitosten syöttötehokäyrien ja ulkolämpötilan väliseen korrelaatioon ei tule täysin luottaa. Kuitenkin voidaan huomata, että Vanajan voimalaitoksen ja huippulaitoksien, etenkin Ahveniston, tuotannon korvaamisessa hukkalämmöllä on paljon potentiaalia (ks. liite 4). (HML-verkon tehot ja erillislaitosten käyttö 2022.)

Syksyn, talven ja kevään osalta Vanajan voimalaitosta kyettäisiin ajamaan tasaisemmin ilman katkokäyttöä hukkalämmön rinnalla. Lämpimien sääolosuhteiden vuoksi loppukevällä ja alkusyksyllä 5 tai 10 MW:n hukkalämmön rinnalla hyödynnettäisiin kaukolämpöakkuja. K6:sta voidaan ajaa minimitehollaan 5 MW:n hukkalämpötehon kanssa, kun ulkolämpötila on noin alle 14 °C ja 10 MW:n hukkalämpötehon kanssa ulkolämpötilan ollessa noin alle 11 °C (ks. liitteet 3 ja 5). Lämmöntuotannossa 01.12.2020 – 28.02.2021 Vanajan voimalaitosta ajetaan kovilla pakkasilla huipputehollaan, jolloin myös huippulaitokset on käynnistetty tuotantoon kattamaan verkoston vajetta (ks. liite 2). Tällöin hukkalämmöllä olisi mahdollisuus keventää huippulaitosten kuormaa. (HML-verkon tehot ja erillislaitosten käyttö 2022.)

Kun huippulaitosten ajolle on tarvetta, pääsääntöisesti Ahveniston lämpökeskus käynnistetään ensin tuotantoon johtuen Hämeenlinnan kaukolämpöverkoston rakenteesta. Ahveniston jälkeen muita laitoksia ajetaan tuotantoon tarpeen mukaan. Kuitenkin verkoston elävä paikoittainen tehontarve ja kulutuspiikit tuovat tähän tapauskohtaisia poikkeuksia. Tuotantodatan perusteella tuotettiin laskenta, jossa käy ilmi hukkalämmöllä korvattavissa oleva tuotantoenergia ja -aika laitospoikkeuksittain. Datasta käy ilmi, että huippulaitoksista Ahveniston tuotannosta on eniten korvattavissa hukkalämmöllä (ks. Liitteet 2–5, huippulaitosten tuotanto; taulukko 5). Tulee kuitenkin huomioida, ettei Hämeenlinnan muuta tuotantoa kata pelkästään vain Ahveniston, Kaurialan ja Sairion lämpökeskukset. Tarkastelussa kuitenkin keskityttiin vain kyseisiin lämpökeskuksiin niiden ollessa suurimmat ja eniten tuotannossa olevat. Laskentojen tulokset on koottu taulukkoon 5. Ahveniston lämpökeskuksen jälkeen 5 MW:lla eniten korvattavissa olisi energian osalta Kaurialan, mutta käyttötuntien osalta Sairion. Sekä 5 MW:lla että 10 MW:lla voitaisiin käytännössä korvata Sairion tuotanto kokonaan. 10 MW:lla on potentiaalia korvata Ahveniston ja Kaurialan energiantuotantoa moninkertaisesti verrattuna 5 MW:iin. Samoin myös korvattava tuotantoaika on selkeästi suurempi 10 MW:n hukkalämpöteholla.

Vuoden ajanjakso otantana on kuitenkin verrattain pieni, sillä sääolosuhteet, kulutus ja Vanajan tuotanto vaihtelevat vuosittain jonkin verran. Tämä tarkoittaa silloin sitä, että hukkalämmöllä korvattavissa oleva Vanajan voimalaitoksen ja huippulaitosten tuotanto elää vuosien välillä, eikä tehty tarkastelu ennusta tarkasti korvattavaa tuotantopotentiaalia. Toimeksiantajan mukaan verkosto on kuitenkin muuttunut viimeisen kahden vuoden aikana sen verran oleellisesti, ettei olisi ollut relevanttia tehdä useamman vuoden arvioita vanhemmilla tuotantodatoilla. Hukkalämmön tuotantopaikka ei ole pumppauksen kannalta otollisella sijainnilla. Tämänhetkisen maakaasun hinnan vuoksi kuitenkin toimeksiantajan mukaan mieluummin sallitaan pumppaushäviöt kuin kulutettaisiin huippulaitosten polttoaineena olevaa maakaasua.

Taulukko 5. Hukkalämpötehoilla korvattavissa oleva huippulaitosten tuotanto

Hukkalämpötehoilla korvattavissa oleva huippulaitosten tuotanto 1.12.2020 – 30.11.2021				
	Ahvenisto	Kauriala	Sairio	
Toteutuneet käyttötunnit	866	733	151	h
Toteutunut tuotanto	6948,74	8885,88	132,04	MWh
5 MW				
Säästettävät käyttötunnit	319	76	151	h
Säästettävä tuotanto	834,29	140,26	132,04	MWh
10 MW				
Säästettävät käyttötunnit	599	240	151	h
Säästettävä tuotanto	2914,46	1427,78	132,04	MWh

4.7 Kustannusten arviointi

Kustannuksia tarkasteltiin teollisuuskohteen kytkennän toteuttamisen ja runkoverkon putkijohdon koon suurentamisen kannalta. Kytkentään sisältyvistä laitteista pyydettiin tarjouspyynnöt laitetoimittajilta. Kytkennän rakentamisen urakointitöiden kustannukset on arvioitu toimeksiantajayrityksen aikaisempien projektien pohjalta. Kaukolämpöjohdon putkikoon saneerauksen kustannuksena käytettiin toimeksiantajan toimittamaa tilastollista arviota 700 €/m. Planoran aikaisemmista laskelmista käy ilmi, että nykyistä Katumaalta Käikälään johtavaa putkikokoa DN 150 tulisi uusia noin 1920 m (Hämeenlinnan kaukolämpöverkoston kehittämissuunnitelma 2018, 20).

Taulukko 6. Kustannusarviot 5 MW:n ja 10 MW:n järjestelmille

Lämmönsiirtimet		
5 MW:n lämmönsiirrin	8300	€
10 MW:n lämmönsiirrin	12050	€
KL-Pumppu		
5 MW:n vaativalle virtaukselle	4500	€
10 MW:n vaativalle virtaukselle	8000	€
Pumpun taajuusmuuttaja		
Vacon 100 Industrial (arvio)	2500	€
Toimilaitteet DN200		
Auman tarjous täysiaukkoinen DN200 venttiilillä	4200	€/kpl
Putkityöt, arvio	30000	€
Sisältää mekaanisen putkistorakentamisen sekä laitteiston mekaaniset asennustyöt.		
Logiikan muutostyöt, arvio	15000	€
Hyödynnetään olemassa olevaa logiikkaa. Lisätään automaatiokaappiin operointipaneeli. Moottorin sekä toimilaitteventtiileiden lisäys.		
Kustannukset 5 MW:n järjestelmälle, yhteensä	81200	€
Kustannukset 10 MW:n järjestelmälle, yhteensä	1432450	€

5 MW:n järjestelmän arvioitu kustannus koostui kytkennän laitteista ja urakoinneista. Järjestelmässä sekä kaukolämmön että hukkalämmön lämmönsiirrin ovat 5 MW, eli kaksi kappaletta. Kaukolämmön aiemman ja nykyisen menekin perusteella 5 MW tulee kattamaan, jopa ylikin, teollisuuskohteen mahdollisen lämpötehotarpeen. Järjestelmään sisältyy kolme kappaletta DN 150-koon toimilaitteita, tässä kuitenkin hyödynnettiin DN 200-koon toimilaitteiden tarjoushintaa. Lopuksi kustannusarvio pitää sisällään pumpun (5 MW:n vaativalle virtaukselle), taajuusmuuntajan hinnan sekä logiikan muutos- ja putkitöiden arvioidun kustannuksen. Runkoverkon nykyinen putkikoko on todettu soveltuvan 5 MW:n siirtämiseen eikä vaadi verkostourakointia.

10 MW:n järjestelmän kytkennän laitteiden ja urakoiden kustannusten lisäksi, kustannusarvio koostui runkoverkon putkikoon suurennustyöstä. Järjestelmässä kaukolämmön lämmönsiirrin on jo aiemmin mainitusta syystä 5 MW, hukkalämmön lämmönsiirrin on taas 10 MW. Järjestelmään sisältyy kolme kappaletta DN 200-koon toimilaitteita. Kustannusarvio sisältää pumpun (10 MW:n vaativalle virtaukselle), taajuusmuuntajan hinnan sekä logiikan muutos- ja putkitöiden arvioidun

kustannuksen. Suurin osa 10 MW:n järjestelmän kustannuksista muodostuu putkikoon suurentamisesta 1920 m:ltä.

5 Johtopäätökset

Tapaustutkimuksessa saatiin selvitettyä verkon vähimmäisvaatimukset siirtämään 5 ja 10 MW:n lämpötehoja. Vaadittavat virtaukset ovat suurimmillaan kaukolämpöveden jäähtymän ollessa runkoverkossa matalimmillaan, eli paluu- ja menopotken veden lämpötilaeron ollessa 40 °C. Tämä tarkoittaa 5 MW:n vaativan teoreettisesti suurimmillaan 29,91 kg/s virtausta ja 10 MW:n 59,82 kg/s virtausta. 29,91 kg/s massavirta edellyttää putkikooksi vähintään DN 150 ja 59,82 kg/s massavirta edellyttää taas vähintään DN 200. Kyseisillä putkiko'oilla ja verkon jäähtymän ollessaan alarajasaan, pelkästään jo putken kitkan aiheuttama painehäviö on noin kolmanneksen verran yli sallitun rajan. Lisäksi painehäviö/km-putkea tulisi olemaan laskettua suurempi, kun kertavastukselliset painehäviöt otettaisiin mukaan laskentoihin. Runkoverkon paluu- ja menopotken kaukolämpöveden lämpötilaeron tulisikin olla vähintään noin 45–46 °C, että pysyttäisiin pelkästään kitkapainehäviön osalta sallitun painehäviön rajatuntumassa. Kaukolämpöveden heikkojäähtymä olisi kuitenkin vain kesäajan ongelma, ja muuna-aikana vuodesta päästäisiin paremmalla jäähtymällä optimaalisempaan pumppaukseen. Painehäviöt siirrettäville lämpötehoille pysyisivät ihanteellisella tasolla kaikilla lämpötilaeroilla, jos 5 MW:n siirtämiseen valittaisiin putkikooksi DN 200 ja 10 MW:n siirtämiseen DN 250.

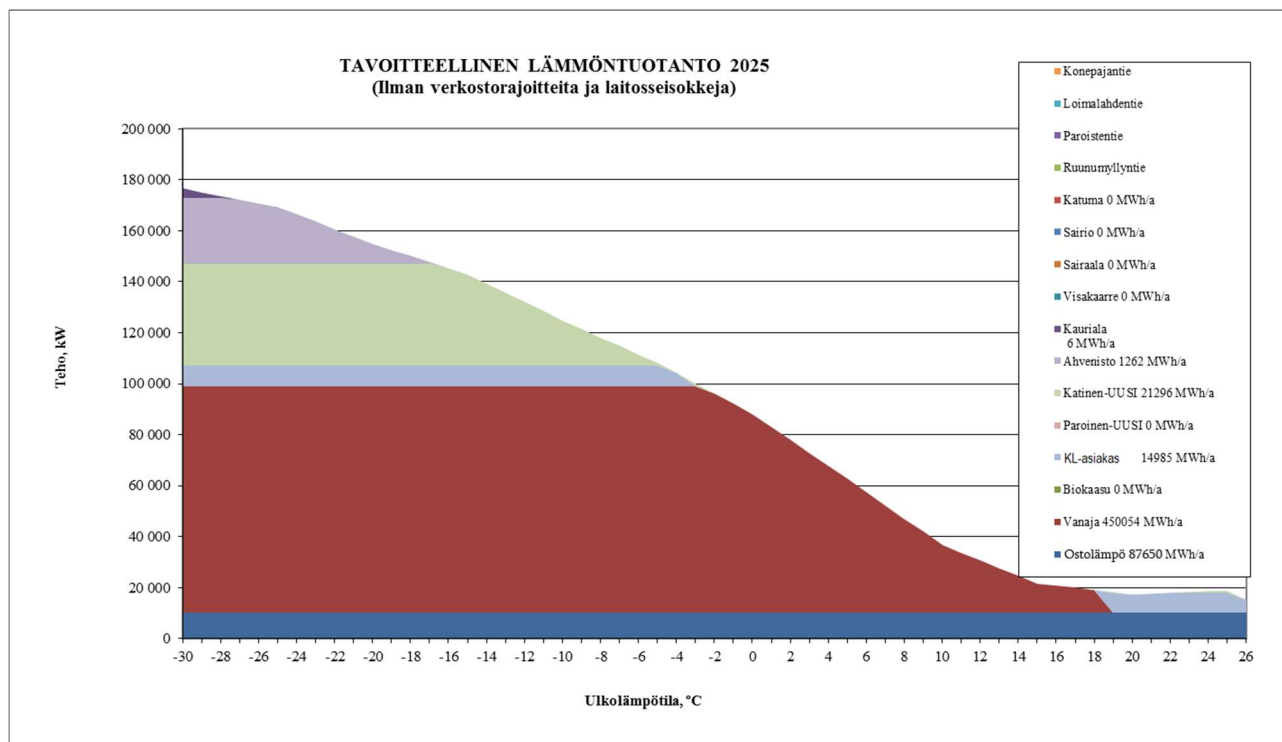
Laskennallisesti osoitetaan, että pumpulla tulisi kyetä tuottamaan 5,84 bar:n paine ja siirrettävästä lämpötehosta riippuen pumppaustehoa vaaditaan teoreettisesti 17,61–35,21 kW, kun pumpun hyötysuhdetta ei ole huomioitu. (ks. taulukko 4). Lisäksi Harvialantien varressa, lähellä Katumaa, sijaitsee tutkittavan runkojohdon varrella välipumppaamo (ks. kuvio 15), jonka paineen tukemista ei ole laskelmissa huomioitu. Näin ollen pumpussa on todennäköisesti jonkin verran ylimitoitusta. Pumpun ylitehokkuudesta ei ole haittaa, mutta liian tarpeettoman tehokas pumppu on myöskin suotta kalliimpi investointi. Pumppauksen kannalta eduksi olisi, jos runkoverkon putkikoossa olisi ylikapasiteettia.

Kehitystutkimuksella kartoitettiin tarvittavia muutoksia kaukolämpöverkkoon ja laitosten ajamiseen, jotta hukkalämpötehot saadaan hyödynnettyä. Asiakastietoja paljastamatta, teollisuuskoh-

teen nykyistä kaukolämpökytkentää ei kuvata tarkasti, mutta sen voidaan todeta olevan vähintäänkin poikkeuksellinen. Ehdotettu periaatekytkentä (ks. kuvio 16) on selkeä, takaa toimitusvarmuuden ja se on pumppauksen kannalta kytkentänä kevyempi. Nykyisen runkoverkon putkikoko DN 150 Katumaalta Käikälän alueelle riittäisi 5 MW:n hukkalämpötehon siirtämiseen, mutta 10 MW:lle putkikoko tulisi vaihtaa vähintään DN 200:ksi (ks. luku 4.4).

Hukkalämmön hyödyntäminen tulisi johtaman aktiivisempaan Vanajan kaukolämpöakun käyttöön sekä bio- ja fossiilisten polttoaineiden polton vähenemiseen. Lämpimillä sääolosuhteilla lämmöntuotannon kuormaa kevennettäisiin Vanajan voimalaitokselta ja kylmemmillä ulkolämpötiloilla huippulaitoksilta. Vanajan voimalaitoksen katkokäyttäminen ja kaukolämpöakun hyödyntäminen on entuudestaan tuttua Loimualue ajalta ennen K6-kattilaa. Teollisuuskohteen hukkalämmön myötä tuleva voimalaitoksen ajomalli ei siis tulisi olemaan uutta Vanajalla. Huippulaitoksista kuormaa on mahdollisuus keventää eniten Ahveniston lämpökeskukselta. (ks. luku 4.6.) Hukkalämpöenergia antaa myös joustavuutta huippulaitosten ajamiseen. Lämmön kulutuspiikkihetkillä keskusvalvomon (Vanaja) operaattori voi käyttää ”pelisilmäänsä” ja optimoida huippulaitosten käyttöä. Näin voidaan jopa säästyä kokonaan huippulaitoksen käynnistämiseltä. Tämän kaltainen säästö ei käy ilmi suoraan taulukosta 5, sillä se kattaa vain ne tuotantoajat ja näiden energiantuotannon, kun teho on ≤ 5 MW tai ≤ 10 MW.

Mikäli Katisen uusi varakeskus rakennetaan, pienenee Ahveniston ja Kaurialan tuotanto merkittävästi (ks. kuvio 19). Tämän johdosta nykyiseen tuotantoon verraten hukkalämmöllä vaikutettaisiin Vanajan voimalaitoksen lisäksi enemmän Katisen varakeskuksen tuotantoon. Kuviossa 19 teollisuuskohteeseen viitataan ”Ostolämmöllä”. Teollisuuden hukkalämpöä voidaan hyödyntää siis kaukolämmön tuotannossa korvaamaan lämmöntuotantolaitoksien kuormaa ja keventämään niiden ajoa. Bio- ja fossiilisten polttoaineiden polton vähentäminen toimii eduksi sekä taloudellisesti että ympäristöllisesti. Vaikka tarkkoja hintatietoja hukkalämpöenergialle ei saatu, olettamuksena oli kuitenkin sen käytön olevan aina halvempaa verrattuna polttoaineiden hintaan. Polton vähentyessä vähenee samalla hiukkaspäästöt.



Kuvio 19. Lämmöntuotannon tavoitteellinen ajojärjestys ja jakauma 2025 (Planora 2018, muokattu)

Kustannukset järjestelmälle, jolla voitaisiin hyödyntää 5 MW:n hukkalämpötehoa tulisivat vähintään olemaan yhteensä 81200 € ja 10 MW:n hukkalämpöteholle 1432450 €. 10 MW:n järjestelmän hinta tulisi siis olemaan moninkertainen verrattuna 5 MW:n järjestelmän investointiin. Kalliimalla investoinnilla kuitenkin mahdollistetaan kaksinkertaisen hukkalämpöenergian hyödyntäminen. Suurin osa 10 MW:n järjestelmän hinnasta koostuu putkikoon vaihtamisesta, jota voidaan sijoituksena pitää varsin pitkäikäisenä. Kaukolämpöjohdon tulee kestää vähintään 30–50 vuotta jatkuvan käyttölämpötilan ollessa 120–115 °C (Kaukolämmön käsikirja 2006, 137). Hukkalämmön ja polttoaineiden sopimushintojen ollessa salaisia, ei investoinneille voitu laskea takaisinmaksuaikaa eikä nettosäästöä. Investointien pitkäikäisyyden ja hukkalämmön oletetun edullisen hinnan perusteella voidaan ennustaa investointien tulevan kuitenkin ylipäättään kannattavaksi.

6 Pohdinta

6.1 Tavoitteiden saavuttaminen

Opinnäytetyössä tutkittiin 5 ja 10 MW:n hukkalämpötehojen hyödyntämistä Hämeenlinnan kaukolämmön tuotannossa. Teollisuuskohteen odotettaisiin myyvän hukkalämpöä 5 MW:n sopimusteholla noin 43,8 GWh/a ja 10 MW:n sopimusteholla taas 87,65 GWh/a. Tutkimukselle määritettiin selvitystavoitteiksi:

- Teollisuuskohteen liitääntä Hämeenlinnan kaukolämpöverkkoon.
- Tekniset vaatimukset siirrettäville lämpötehoille kaukolämpöverkossa.
- Hukkalämpötehojen vaikutus kaukolämmön tuotantoon.
- Muutosten tuomat kustannukset.

Työssä onnistuttiin tuottamaan periaatteellinen kytkentä toimintakuvauksella kaksisuuntaisen kaukolämmön asiakkaalle, joka on opinnäytetyön tapauksessa teollisuuskohte (ks. kuvio 16). Kytkentä muodostettiin toimeksiantajan kuvauksen pohjalta ja sitä tarkennettiin jo olemassa olevien esimerkkikytkentöjen pohjalta (ks. kuvat 6 ja 7). Kytkentä on pyritty tekemään periaatteeltaankin kohtalaisen tarkaksi. Koska teollisuuskohteen yritys ei ottanut osaa opinnäytetyöhön, ei kytkentää ollut mahdollista tuottaa tarkemmaksi, ja tästä syystä esimerkiksi kytkennän lämmönsiirtimien toisipuoli luonnosteltiin ylimalkaisesti. Kytkennän toteutusta voidaan pitää varsin poikkeuksellisenä eikä Loimualla ole missään nykyisissä asiakaskohteissaan vastaavaa. Mistään julkisesta lähteestä ei onnistuttu löytämään samankaltaista kaukolämpökytkentää, jossa toimija on yhdistetty kaukolämpöverkkoon kahdella lämmönsiirtimellä sekä asiakkaana että tuottajana. Alun perin ehdotuksena oli toteuttaa kytkentä yhdellä lämmönsiirtimellä. Tämä olisi vaatinut lämmönsiirtimen, jonka kylmä- ja lämminpuoli pystyisivät vaihtamaan roolejaan. Todellisilla markkinoilla kyseisen lämmönsiirrintyyppin saatavuudesta oli epävarmuutta, jolloin koettiin turvallisemmaksi ratkaisuksi toteuttaa kytkentä kahdella siirtimellä.

Tarvittavat teoreettiset massa- ja tilavuusvirrat sekä pumpun tuotettava paine-ero ja pumppaustehot 5 ja 10 MW:n siirtämiseen onnistuttiin selvittämään. Nämä ovat kuitenkin nimenomaan teoreettisia arvoja, eli pelkästään laskennallisia eikä niissä ole otettu kaikkia häviötekijöitä huomioon.

Opinnäytetyön ajalliset resurssit sekä käytössä olevat työkalut eivät antaneet myöden tuottaa tarkempia laskelmia. Nämä laskelmat antavat kuitenkin ehdottoman alarajan sille, millaisia virtauksia ja pumppaustehoja suurimmillaan on vähintäänkin odotettavissa kyseiselle toteutukselle. Työssä onnistuttiin selvittämään vähimmäisputkikoot siirtämään skenaarioiden lämpötehoja. Mitoitetut painehäviöt tosin tulevat olemaan suuremmat, kun kertavastusten ja kytkennän painehäviöt lisätään putkijohdon painehäviöiden päälle. Tarkemmilla painehäviölaskemilla olisi saatu tarkemmat vaatimukset pumppaukselle. Suunniteltu korvaava kytkentä nykyisen tilalle teollisuuskohteessa kuitenkin keventäisi huomattavasti pumppausta. Planoran laskelmissa lähtökohtana on ollut se, ettei kohteen kytkentää tulla muuttamaan. Näissä laskelmissa pumpattava massavirta sekä tuotettava paine on laskettu niin, että 10 tai 15 MW kyetään siirtämään verkkoon teollisuuskohteen nykyisen kytkennän kautta. Opinnäytetyön laskelmat antavatkin pienemmän arvon pumpattavalle 10 MW:n suurimmalle massavirralla verrattuna Planoran laskelmiin. Opinnäytetyön ja Planoran laskelmien tulosten vertailun pohjalta ei voida tehdä arvioita opinnäytetyön laskelmien paikkaansa pitävyydestä, koska Planoran laskelmat perustuvat erilaiseen skenaarioon.

Opinnäytetyössä onnistuttiin myös tuottamaan arvioita hukkalämmön vaikutuksesta Hämeenlinnan kaukolämmön tuotantoon sekä mitä kustannuksia järjestelmien toteuttamisesta on odotettavissa. Vaikutuksia lämmöntuotantoon arvioitiin tuoreen tuotantodatan ja toimeksiantajan laitosajokuvauksien pohjalta. Mitään tarkkaa laitosten ajomallia ei olisi voitu lähteä suunnittelemaan. Tämä olisi vaatinut huomattavasti enemmän ajallisia resursseja opinnäytetyön suorittamiseen sekä simulointityökaluja. Tällaisen etukäteen suunnitellun mallin toteutusta voidaan pitää myös osittain perusteettomana, sillä laitosten optimaalisesta ajamisesta kaikissa käyttötilanteissa pitää huolen automaatio ja keskusvalvomon operaattorit. Oleellisempaa olikin arvioida yleisellä tasolla, kuinka hukkalämpö tulee vaikuttamaan Vanajan minimitehoajoon sekä muun tuotannon määrään. Toisin kuin Vanajan voimalaitoksen, huippulaitoksien osalta tuotettiin alustava laskenta kutakin laitosta kohtaan korvattavan tuotannon määrä. Käytännössä siis koko vuoden hukkalämpöenergialla korvataan se Vanajan tuotanto, mikä jää huippulaitosten tuotannon korvaamisen jälkeen yli.

Työssä laskettuja kustannuksia voidaan pitää vähintäänkin alarajana toteutettaville hankkeille. Kytkentään sisällyville laitteille saatiin suhteellisen tarkat hinnat. Nämä voivat ajan kanssa muuttua ja

tarjoushinnat eivät todennäköisesti tule olemaan samat, kun hanke realisoituisi. Urakointien hinnoissa jouduttiin tyytymään hyvin arviolliseen summaan, sillä teollisuuskohteeseen ei olisi ollut mahdollista pyytää urakoitsijoita paikalle tekemään arvioita. Vaikka 10 MW:n järjestelmä on moninkertaisesti kalliimpi 5 MW:n järjestelmään, on kuitenkin hyödynnettävissä oleva hukkalämmön määrä kaksinkertainen, jolla saadaan huomattavampi kevennys lämmöntuotannon kuormaan.

Tapaus- ja kehitystutkimuksellinen lähestymistapa oli tutkimustyön suorittamiseen toimiva. Työssä onnistuttiin kartoittamaan lähtötilanne ja tunnistamaan vaatimukset hukkalämmön hyödyntämiselle. Tietoperusta oli riittävän laaja ja tarkka sovellettavaksi käytännön työssä. Sen pohjalta kyettiin ymmärtämään kaukolämmityksen toiminta ja kaukolämpöverkon tekniset ominaisuudet. Tietoperustassa esitettyjen kaavojen ja kaukolämpöverkon teknisten reunaehtojen avulla pystyttiin tuottamaan toimeksiannossa tavoitteena olleet laskelmat. Tietoperustan avulla kyettiin myös perustelemaan suunnitellun kytkennän konstruktio ja tietyt laitehankinnat. Tarvittavat muutokset verkkoon ja laitosten ajoon saatiin myös kartoitettua sillä laajuudella kuin työn rajaus antoi myöden. Kuitenkaan kehitystutkimuksen ratkaisujen testausta ei voitu toteuttaa, sillä opinnäytetyö toimi esisuunnittelun kaltaisena työnä, jossa tehtäviä muutoksia ei päästä käytännössä kokeilemaan. Todellisuudessa Loimuan ja teollisuuskohteen hanke tapahtuu opinnäytetyön jälkeen tulevaisuudessa eikä näin ollen toteutuneiden ratkaisujen seuranta-aika sisällynyt tutkimustyöhön.

6.2 Luotettavuus

Tutkimuksen luotettavuutta arvioitiin validiteetin ja reliabiliteetin kannalta. Validi tutkimus tutkii sitä, mitä on aiheen kannalta tarkoituksen mukaista tarkastella. Validi tutkimus ei myöskään sisällä systemaattisia virheitä ja antaaakin pääosin oikeita tuloksia. Reliabiliteetti mittaa tutkimuksen tarkkuutta ja pysyvyyttä. Reliaabelin tutkimuksen tulokset ovat tarkkoja ja yhdenmukaisia, ja ne ovat toistettavissa. (Heikkilä 2014, 11–12.)

Tutkimuksen validius taattiin huolellisella aiheen rajauksella ja tavoitteiden määrittelyllä. Aineiston tuli olla laaja, mutta tarkoin harkittu. Vaikka työssä hyödynnettiin runsaasti Planoran tuottamia vuoden 2018 laskelmia, tutkimustyössä ei kuitenkaan ollut tarkoitus tuottaa samoja tuloksia ja toistaa samoja asioita. Tutkimuskysymykset kattoivat tutkimusongelman kokonaisuudessaan. Tutkimuskysymykset olivat yksiselitteisiä ja mittasivat oikeita asioita. Tietoperustan aineistoksi saatiin

muodostettua riittävän kattava ja soveltuva kokonaisuus työn kontekstin ymmärtämisen ja tutkimuskysymyksiä ratkaisun kannalta. Yhdessä muun aineiston kanssa työssä kyettiin tuottamaan tuloksia ja johtopäätöksiä, jotka vastasivat tutkimuskysymyksiin tarkoituksenmukaisella tarkkuudella.

Reliabiliteetin kannalta Planoran aiemmin tuottamia laskelmia simuloitiin omilla kaavoilla. Näin varmistettiin omien laskentojen kykenevän antamaan samoja tuloksia, ja toteamaan ne tarkoiksi. Tämän lisäksi omien tulosten tuli olla samansuuntaisia, vaikkei tutkimuskohdetta lähestyttykään samalla tavalla. Jos tulokset eivät olisi olleet toistuvan kaltaisia verrattuna Planoran tuloksiin, olisi työn tulokset olleet kyseenalaisia. Tutkimustyön laskennoissa hyödynnettiin fysikaalisia laskentoja, joiden tarkkuus ovat ajasta riippumattomia, jolloin työssä laskennalliset tulokset ovat reliabeleja. Laskentojen tarkkuuteen vaikuttaa kuitenkin huomioon otettavien tekijöiden ja muuttujien määrä. Lisäksi tarkkuuteen vaikuttaa käytettävän datan tarkkuus. Tiedon keruu ja aineiston käsittely tehtiin huolellisesti, jolla varmistettiin tulosten tarkkuus. Opinnäytetyön reliabiliteettiin vaikuttaa myös voimassa olevat määräykset, lait sekä yleiset ohjeistukset. Huomioiden tutkimustyön menetelmät ja ajankohdan, voidaan pitää opinnäytetyön täyttävän reliabiliteetin kriteerit.

6.3 Opinnäytetyön hyödyntäminen ja kehitysehdotukset

Toimeksiantaja voi hyödyntää opinnäytetyön tuloksia pohjustuksena tarkemmille suunnitteluille, kun hanke yhdessä teollisuuskohteen kanssa tulee olemaan ajankohtainen. Tämän työn tuloksia ja havaintoja toimeksiantaja voi myös mahdollisuuksiensa mukaan soveltaa ja hyödyntää muissa projekteissaan. Vaikka opinnäytetyö antoi arviot kustannuksista eikä tuottanut laskelmia takaisin maksuajasta ja nettosäästöstä, voi toimeksiantaja nämä itse sisäisesti laskea omien sopimuksien pohjalta julkisuuden ulkopuolella. Kuka tahansa muu toimija voi tätä opinnäytetyötä esimerkkitapauksen kaltaisesti hyödyntää tutkiessaan kaksisuuntaista kaukolämpöä tai kartoittaessaan sen potentiaalia. Opinnäytetyö antaa eväitä tuntemaan rajatekijöitä hukkalämmön syötölle kaukolämpöverkkoon, tarkastelemaan laskennallisilla menetelmillä sekä analysoimaan eri näkökulmista hukkalämmön hyödyntämistä ja vaikutuksia.

Jatkoselvityksissä tulisi tuottaa tarkemmat painehäviölaskelmat verkoston osalta. Tähän sisällytetäisiin kytkennän tuomat painehäviöt sekä muut kertavastukselliset painehäviöt uusittavalla ver-

kosto-osuudella. Painehäviöiden ollessa tarkemmalla tolalla voidaan pumppauksen laskentoja tarkentaa. Hankkeen seuranta-ajan pohjalta pumppausta ja verkoston toimintaa optimoitaisiin. Itse kytkentä tulisi suunnitella yksityiskohtaisemmin teollisuuskohteen yrityksen henkilökunnan kanssa. Tästä päästäisiin myös tekemään automaation ja instrumentoinnin tarkempi suunnittelu. Kun teollisuuskohteen yritys on jälleen aktiivinen hankkeen osalta, voidaan järjestelmien investointien kustannuksia saada tarkemmaksi urakoitsijoiden ja yhteistyökumppaneiden omilla arvioinneilla. Käyttöön valjastetun hukkalämmön myötä Hämeenlinnan lämpökeskusten käyttö voi olennaisesti pienentyä ja tuoda pidempiä käyttämättömiä ajanjaksoja. Tällöin Loimuan olisi mahdollisesti hyvä arvioida uudelleen laitostensa elinikää, kunnossapitoa ja elinkaarta.

Tutkimus koskettaa laajempaa kokonaisuutta yleisen energiatehokkuuden kannalta. Ilmastonmuutos on globaali ongelma, johon voidaan vaikuttaa ympäristöpäästöjä vähentämällä. Teollisuuden hukkalämmössä on suuri potentiaali lämmöntuotannon primäärienergian korvaamisessa. Suomen yleisin lämmitysratkaisu on kaukolämpö, jonka energia tuotetaan pääosin polttamalla. Tällaisessa keskitetyssä tuotannossa on myöskin helpointa ja kustannustehokkainta tehdä päästöjä alentavia ratkaisuja. Polttoaineiden polton vähentäminen keventää ympäristökuormitusta sekä edistää energiaomavaraisuutta. Paikalliset hukkalämmön hyödyntämISRatkaisut yhdessä tukevat niin Suomen kuin koko maailman ympäristötavoitteita, mikä tekee tämän kaltaisten tutkimusten tekemisen tärkeäksi.

Lähteet

Alfa Laval. N.d. Alfa Laval:n kotisivujen osio: ”Tiivisteelliset levylämmönvaihtimet”. Viitattu 26.3.2021. <https://www.alfalaval.fi/microsites/tiivisteelliset-levylammonvaihtimet/tyokalut/levylammonvaihtimen-toiminta/>.

Cengel, Y. A. & Ghajar, A. J. 2015. Heat and mass transfer: fundamentals & applications (SI Units). New York: McGraw-Hill Education.

CHEM-A1120 Virtaustekniikka ja lämmönsiirto. 2019. PDF-tiedosto Aalto my courses -nettisivulta. Viitattu 8.1.2022. <https://mycourses.aalto.fi/mod/folder/view.php?id=390168>.

Elenia Lämpö on nyt Loimua. 2019. Julkaisu Loimuan kotisivuilla. Viitattu 25.2.2022. <https://www.loimua.fi/elenia-lampo-on-nyt-loimua/>.

Energiatehokkaat pumput. 2011. Motivan julkaisema tiedosto. Viitattu 10.2.2022. https://www.motiva.fi/files/5343/Energiatehokkaat_pumput.pdf.

Energiavuosi 2021 Kaukolämpö. 2022. Esitys Energiateollisuus ry:n verkkosivuilla. Viitattu 10.2.2022. https://energia.fi/uutishuone/materiaalipankki/energiavuosi_2021_-_kaukolampo.html#material-view.

Heikkilä, I. & Kiuru, T. 2014. Ylijäämälämmön taloudellinen hyödyntäminen. Helsinki: Motiva. Viitattu 24.1.2022. https://www.motiva.fi/files/10216/Ylijaamalammon_taloudellinen_hyodyntaminen_Ylijaamalampoenergia-analyysit.pdf.

Heikkilä, T. 2014. Kvantitatiivinen tutkimus. Tilastollinen tutkimus -kirjaan liittyvä verkkomateriaali. Viitattu 24.3.2022. <http://www.tilastollinentutkimus.fi/1.TUTKIMUSTUKI/KvantitatiivinenTutkimus.pdf>.

HML-verkon tehot ja erillislaitosten käyttö. 2022. Loimua Oy:n toimittama Excel-tiedosto Hämeenlinnan kaukolämmöntuotannosta tunneittain. Loimua Oy:n sisäinen lähde, ei julkisessa jaossa.

H Padleckas. 2006. Straight-tube heat exchanger 1-pass. [CC BY-SA 3.0](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/deed.en). <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/deed.en>. Viitattu 28.3.2022. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Straight-tube_heat_exchanger_1-pass.PNG.

Huhtinen, M., Kettunen, A., Nurminen, P. & Pakkanen, H. 2000. Höyrykattilatekniikka. 5. p. Helsinki: Edita.

Huhtinen, M., Korhonen, R., Pimiä, T. & Urpalainen, S. 2013. Voimalaitostekniikka. 3. p. Kotka: Opetushallitus.

Hämeenlinnan kaukolämpöverkoston kehittämissuunnitelma. 2018. Planora Oy:n tuottama raportti Elenia Lämpö Oy:lle. Loimua Oy:n sisäinen lähde, ei julkisessa jaossa.

Ikkunoita tutkimusmetodeihin I. 2010. 3. p. Jyväskylä: PS-kustannus.

Järjestelmän staattiset arvot. 2018. Planora Oy:n tuottama laskentakooste Elenia Lämpö Oy:lle. Loimuan sisäinen lähde, ei julkisessa jaossa.

Kaksisuuntaisen kaukolämmön liiketoimintamallit. 2016. Pöyryn tuottaman raportti Energiateollisuus ry:lle ja Sitralle. Viitattu 8.2.2022. https://energia.fi/files/598/Kaksisuuntaisen_KL_Yleinen_osuus_raportti_2016.pdf.

Kaukolämmön käsikirja. 2006. Energiateollisuus ry. Helsinki: Libris.

Kaukolämpöjohdot ja maantiet. 2020. Väyläviraston ohjeita 54/2020. Viitattu 5.2.2022. https://energia.fi/files/5582/L15_vo_2020-54_kaukolampojohdot_maantiet_web.pdf.

Kaukolämpö tuotetaan lähellä asiakasta. N.d. Julkaisu Energiateollisuus ry:n verkkosivuilla. Viitattu 25.12.2021. https://energia.fi/energiasta/energiantuotanto/kaukolammon_tuotanto.

Kaukolämpöverkkoja yli 15 000 km. N.d. Julkaisu Energiateollisuus ry:n verkkosivuilla. Viitattu 25.12.2021. <https://energia.fi/energiasta/energiaverkot/kaukolampoverkot>.

Kaukolämpöverkon pumppausjärjestelyt. 2011. Energiateollisuus ry:n laatima suositus L10/20211. Viitattu 8.2.2022. https://energia.fi/files/673/SuositusL10_2011_Pumppaus.pdf.

Kivihiilen energiakäytön vuonna 2029 kieltävä laki voimaan huhtikuun alussa. 2019. Tiedote Valtioneuvoston verkkosivuilla. Viitattu 10.2.2022. <https://valtioneuvosto.fi/-//1410877/kivihiilen-energiakayton-vuonna-2029-kieltava-laki-voimaan-huhtikuun-alussa>.

Logstor. 2022. Logstorin e-palvelut kotisivuilla. Viitattu 13.3.2022. <https://www.logstor.com/fi/palvelut-ja-tekninen-tuki/e-palvelut/logstor-calculator>.

Loimuan esite. N.d. Loimuan kotisivuilla julkaistu yritysesite. Viitattu 25.2.2022. <https://www.esitteemme.fi/loimua/WebView/>.

Loimua Oy. 2021. Loimuan kotisivut. Viitattu 25.2.2022. <https://www.loimua.fi>.

Luettelo Hämeenlinna Kaukolämpölaitokset. 2018. Planora Oy:n tuottama listaus Hämeenlinnan lämpölaitoksista, Excel-tiedosto. Loimua Oy:n sisäinen lähde, ei julkisessa jaossa.

Mäkelä, V-M. & Tuunanen, J. 2015. Suomalainen kaukolämmitys. Mikkeli: Mikkelin ammattikorkeakoulu. Viitattu 8.1.2022. <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/97138/URNISBN9789515885074.pdf?sequence=1>.

OpenStreetMapin tekijät. 2018. Käikälän asuinalueen raja. OpenStreetMap -karttapalvelu. [CC-BY-SA 2.0](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0/). <https://www.openstreetmap.org/copyright>. Viitattu 28.3.2022. <https://www.openstreetmap.org/relation/304213#map=13/60.9687/24.5448>.

Perttula, J. 2000. Energiatekniikka. Helsinki: Wsoy.

Puoliväliriihen toimenpiteet vastaavat turvealan murrokseen. 2021. Tiedote Valtioneuvoston verkkosivuilla. Viitattu 10.2.2022. <https://valtioneuvosto.fi/-/1410877/puolivaliriihen-toimenpiteet-vastaavat-turvealan-murrokseen>.

Putkiston virtausnopeudet. 2009. PSK 2401 standardi. PSK Standardisointiyhdistys. Viitattu 8.1.2022. <https://psk-standardisointi.fi/standardit/>.

Rakennusten kaukolämmitys. 2020. Energiateollisuus ry:n määräykset ja ohjeet, julkaisu K1/2020. Viitattu 27.1.2020. https://energia.fi/files/5423/JulkaisuK1_2020_Energiateollisuus_ry_%28paiv._20201119%29.pdf.

Sirola, V. & Tiitinen, M. 2018. Hukkalämpöjen hyödyntäminen kaukolämpöjärjestelmässä. Helsinki: Energiateollisuus. Viitattu 24.1.2022. https://energia.fi/files/3127/Hukkalammot_kaukolampoverkkoon_tekniset_ohjeet_20181016.pdf.

Tiivisteellinen levylämmönsiirrin. N.d. Tuotekuvaus South-West Supply Oy Ltd:n sivuilta. Viitattu 28.1.2022. <https://swsupply.fi/tiivisteellinen-levylammonsiirrin/>.

Tiivisteelliset levylämmönsiirtimet. N.d. ViFlow:n tuottama esite. Viitattu 7.2.2022. <https://docplayer.fi/2690922-Tiivisteelliset-levylammonsiirtimet.html>.

Tulevaisuuden asiakasratkaisut. N.d. Julkaisu Energiateollisuus ry:n verkkosivuilla. Viitattu 23.1.2022. https://energia.fi/energiasta/asiakkaat/kaukolammon_asiakkuus/tulevaisuuden_asiakasratkaisut.

Tuotannon hukkalämpö hyödyksi. 2013. Julkaisu Motivan verkkosivuilla. Viitattu 10.2.2022. https://www.motiva.fi/ajankohtaista/julkaisut/teollisuus/tuotannon_hukkalampo_hyodyksi.10766.shtml.

Vuoden 2025 tilanne -3 °C:ssa optimoidulla tuotannolla ja pumppauksella. 2018. Planora Oy:n tuottama Hämeenlinnan kaukolämpöverkoston laskentatulokooste. Loimua Oy:n sisäinen lähde, ei julkisessa jaossa.

Vuoden 2025 tilanne $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$:ssa optimoidulla tuotannolla ja pumppauksella. 2018. Planora Oy:n tuottama Hämeenlinnan kaukolämpöverkoston laskentatulokooste. Loimua Oy:n sisäinen lähde, ei julkisessa jaossa.

White, F. M. 2016. Fluid mechanics. New York: McGraw-Hill Education.

Liitteet

Liite 1. Kaukolämpöputkien painehäviölaskentatulosten taulukot

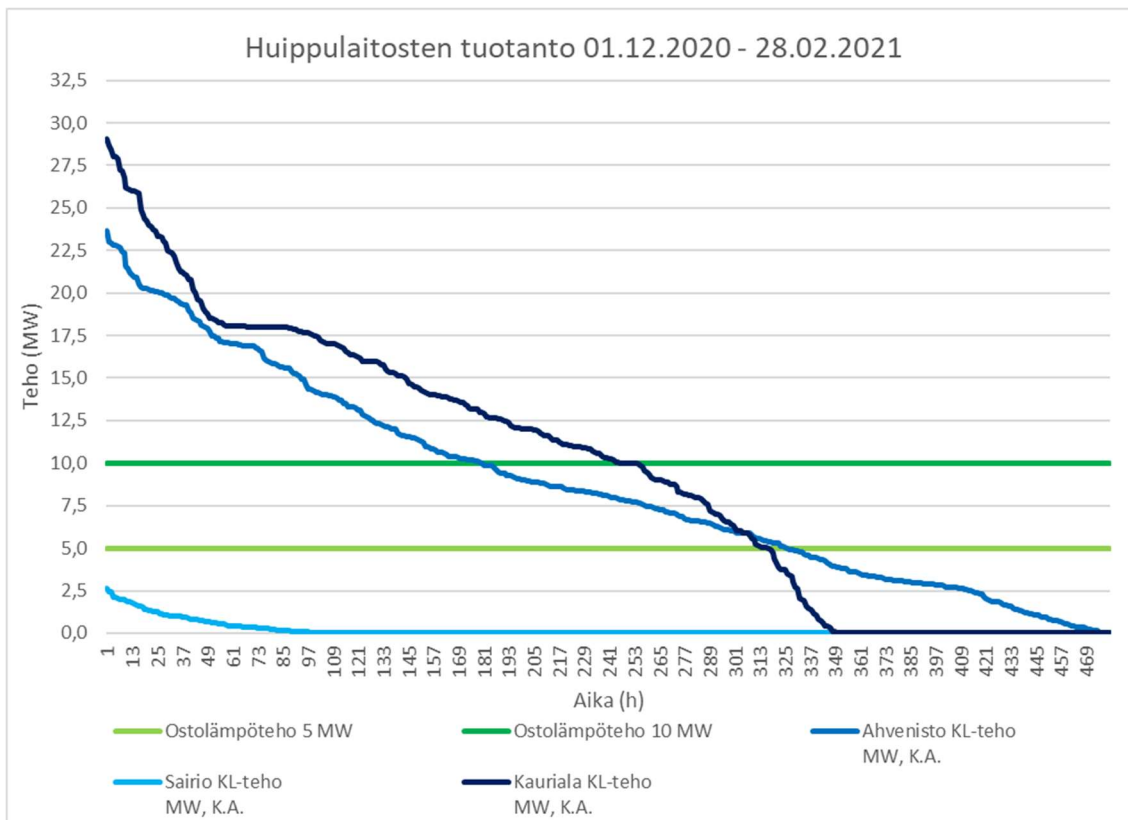
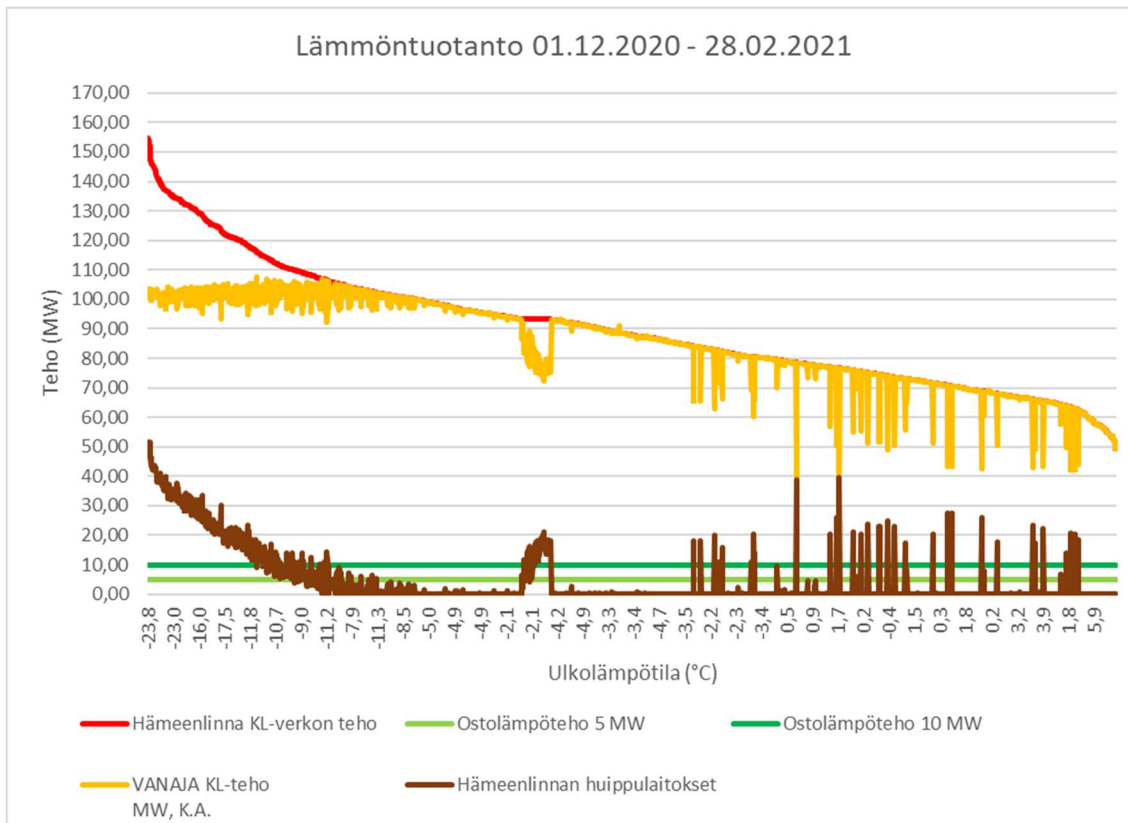
Kitkan aiheuttama painehäviö: DN 150 / 5 MW, 1000 m									
Lämpötilaero [°C]	Paluuveden lämpötila [°C]	Menoveden lämpötila [°C]	Paluuputken painehäviö [bar]	Menoputken painehäviö [bar]	Lämpötilaero [°C]	Paluuveden lämpötila [°C]	Menoveden lämpötila [°C]	Paluuputken painehäviö [bar]	Menoputken painehäviö [bar]
40	40	80	1,28	1,34	40	60	100	1,27	1,33
41	40	81	1,22	1,28	41	60	101	1,22	1,27
42	40	82	1,16	1,22	42	60	102	1,16	1,21
43	40	83	1,11	1,17	43	60	103	1,11	1,16
44	40	84	1,06	1,12	44	60	104	1,06	1,11
45	40	85	1,01	1,07	45	60	105	1,01	1,06
46	40	86	0,97	1,03	46	60	106	0,97	1,02
47	40	87	0,93	0,99	47	60	107	0,93	0,98
48	40	88	0,89	0,95	48	60	108	0,89	0,94
49	40	89	0,86	0,91	49	60	109	0,85	0,9
50	40	90	0,82	0,88	50	60	110	0,82	0,87
51	40	91	0,79	0,85	51	60	111	0,79	0,84
52	40	92	0,76	0,81	52	60	112	0,76	0,81
53	40	93	0,73	0,79	53	60	113	0,73	0,78
54	40	94	0,71	0,76	54	60	114	0,70	0,75
55	40	95	0,68	0,73	55	60	115	0,68	0,73

Kitkan aiheuttama painehäviö: DN 150 / 10 MW, 1000 m				
Lämpötilaero [°C]	Paluuveden lämpötila [°C]	Menoveden lämpötila [°C]	Paluuputken painehäviö [bar]	Menoputken painehäviö [bar]
40	40	80	5,02	5,21
55	40	95	2,67	2,83
40	60	100	5,03	5,21
55	60	115	2,67	2,82

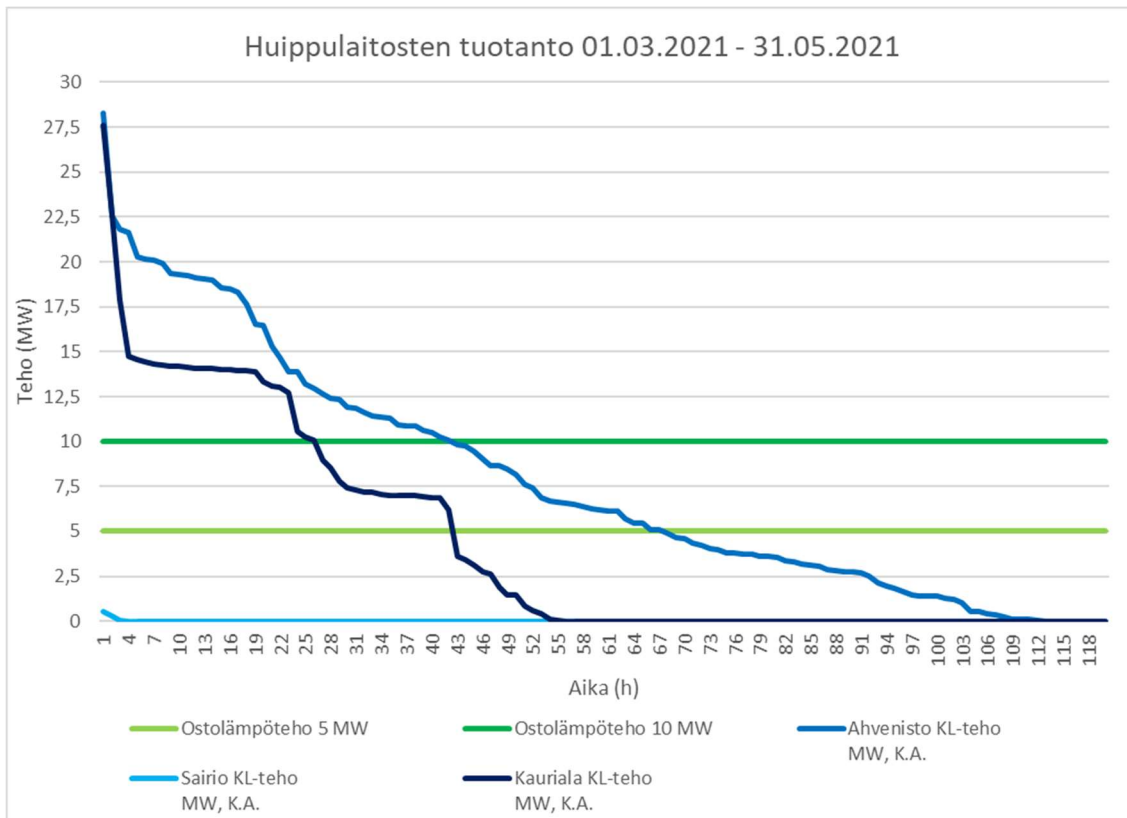
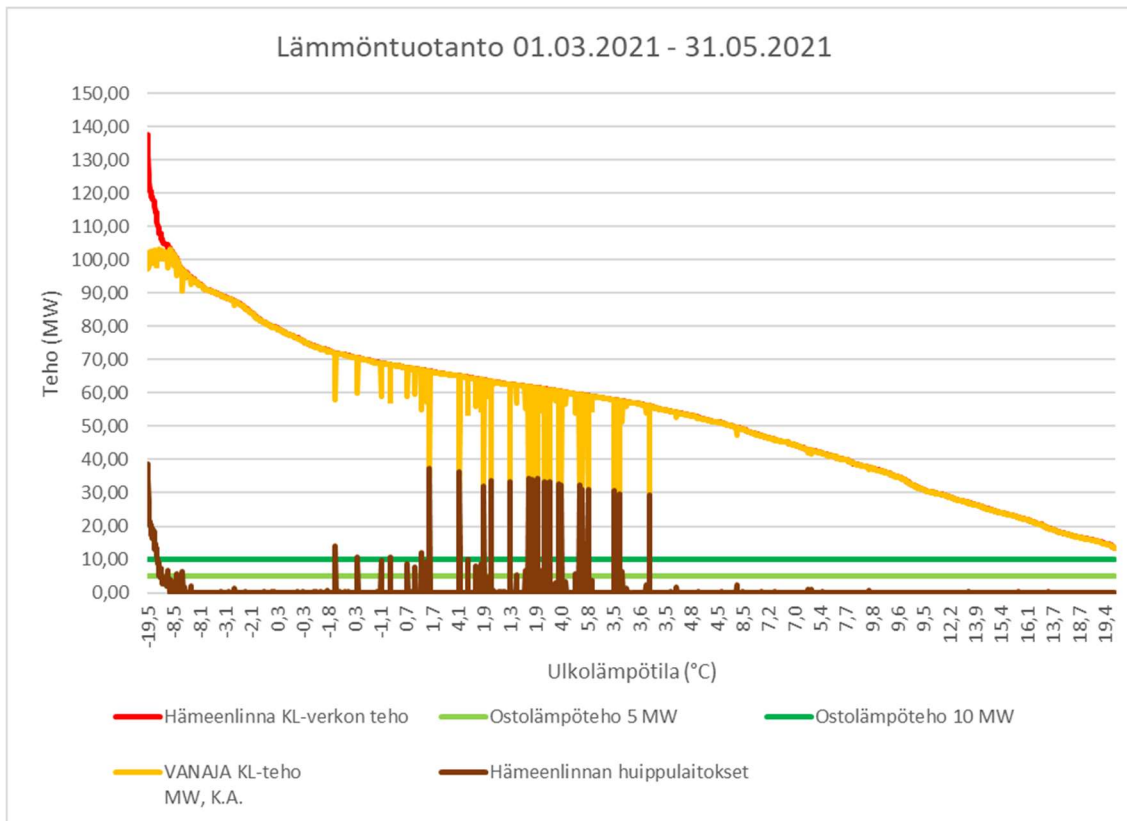
Kitkan aiheuttama painehäviö: DN 200 / 10 MW, 1000 m									
Lämpötilaero [°C]	Paluuveden lämpötila [°C]	Menoveden lämpötila [°C]	Paluuputken painehäviö [bar]	Menoputken painehäviö [bar]	Lämpötilaero [°C]	Paluuveden lämpötila [°C]	Menoveden lämpötila [°C]	Paluuputken painehäviö [bar]	Menoputken painehäviö [bar]
40	40	80	1,24	1,29	40	60	100	1,24	1,29
41	40	81	1,18	1,23	41	60	101	1,18	1,23
42	40	82	1,12	1,18	42	60	102	1,12	1,17
43	40	83	1,07	1,13	43	60	103	1,07	1,12
44	40	84	1,03	1,08	44	60	104	1,02	1,07
45	40	85	0,98	1,03	45	60	105	0,98	1,03
46	40	86	0,94	0,99	46	60	106	0,94	0,98
47	40	87	0,90	0,95	47	60	107	0,90	0,94
48	40	88	0,86	0,91	48	60	108	0,86	0,91
49	40	89	0,83	0,88	49	60	109	0,83	0,87
50	40	90	0,80	0,84	50	60	110	0,79	0,84
51	40	91	0,77	0,81	51	60	111	0,76	0,81
52	40	92	0,74	0,78	52	60	112	0,74	0,78
53	40	93	0,71	0,76	53	60	113	0,71	0,75
54	40	94	0,68	0,73	54	60	114	0,68	0,72
55	40	95	0,66	0,71	55	60	115	0,66	0,70

Kitkan aiheuttama painehäviö: DN 250 / 10 MW, 1000 m				
Lämpötilaero [°C]	Paluuveden lämpötila [°C]	Menoveden lämpötila [°C]	Paluuputken painehäviö [bar]	Menoputken painehäviö [bar]
40	40	80	0,39	0,41
40	60	100	0,39	0,41

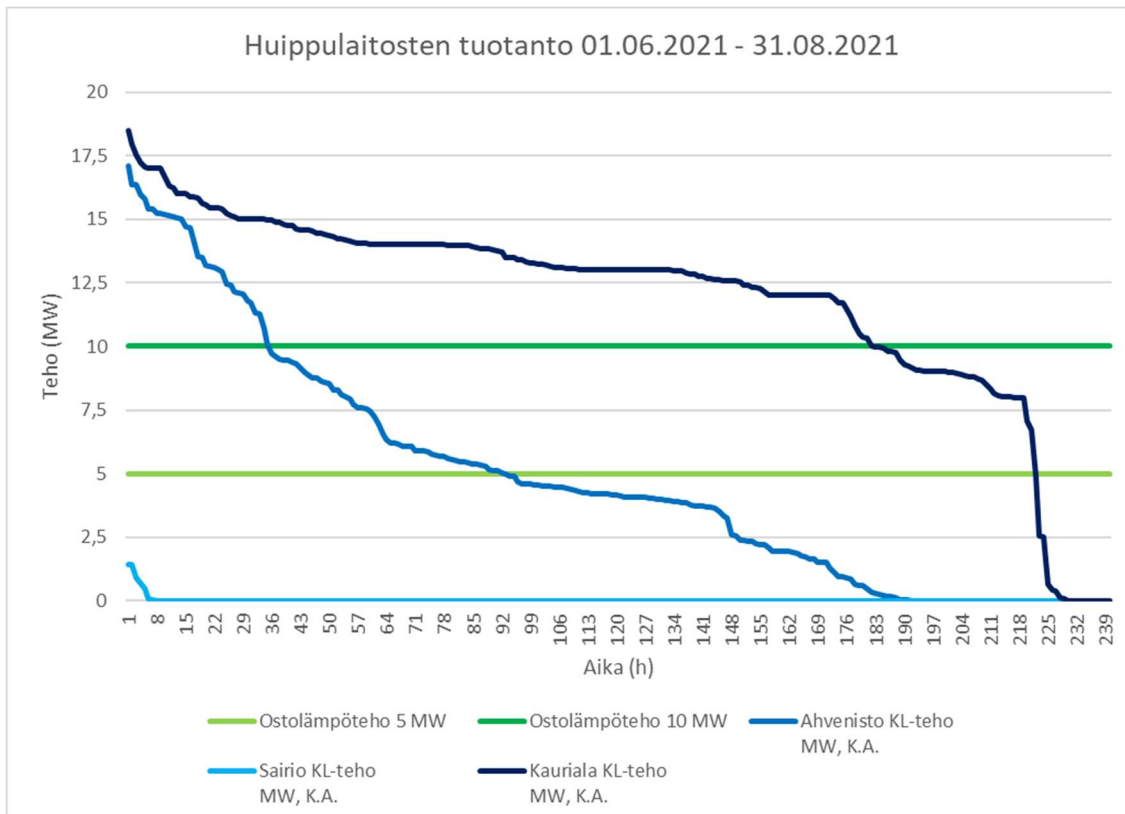
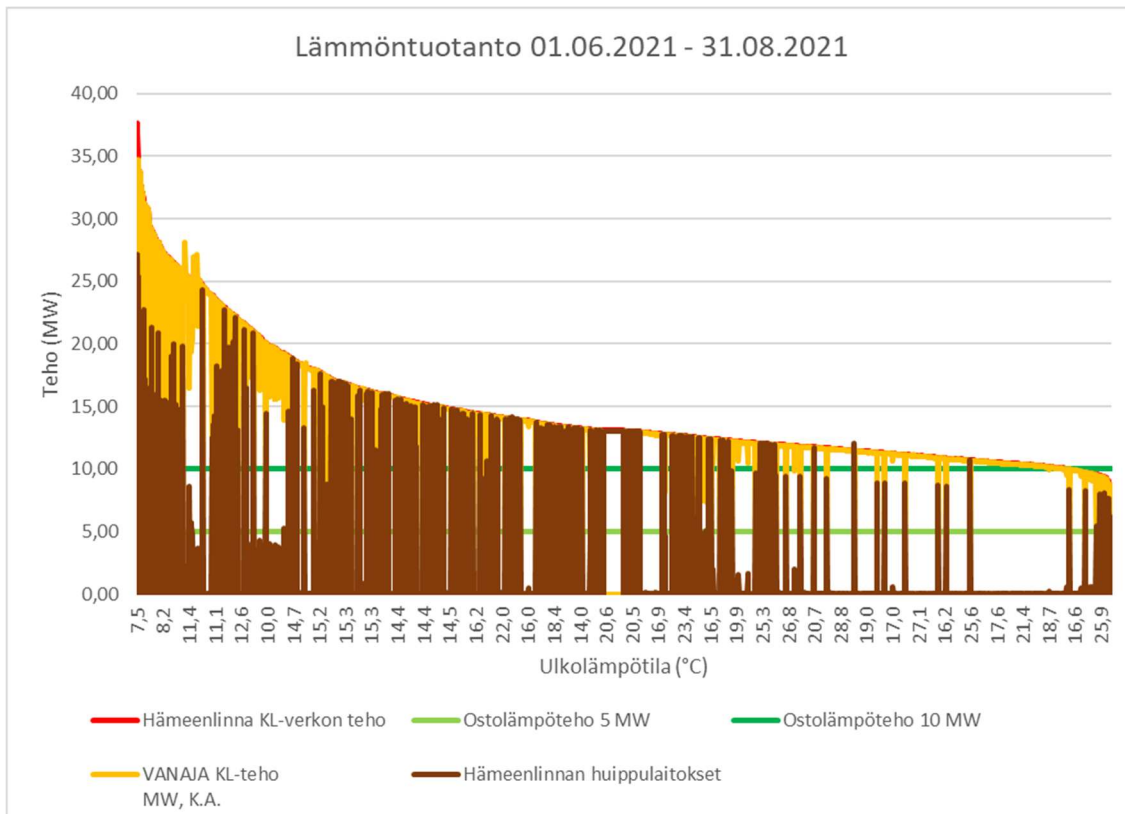
Liite 2. Lämmön ja huippulaitosten tuotanto 01.12.2020 – 28.02.2021



Liite 3. Lämmön ja huippulaitosten tuotanto 01.03.2021 – 31.05.2021



Liite 4. Lämmön ja huippulaitosten tuotanto 01.06.2021 – 31.08.2021



Liite 5. Lämmön ja huippulaitosten tuotanto 01.09.2021 – 30.11.2021

