



Teknis-taloudellinen tarkastelu kauko- lämmön kapasiteetin lisäämisestä

Suvi Haapala

Opinnäytetyö, AMK
Helmikuu 2025
Energia- ja ympäristötekniikka

Haapala, Suvi

Teknis-taloudellinen tarkastelu kaukolämmön kapasiteetin lisäämisestä

Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Helmikuu 2025, 46 sivua

Energia- ja ympäristötekniikan tutkinto-ohjelma. Opinnäytetyö AMK.

Julkaisun kieli: suomi

Julkaisulupa avoimessa verkossa: kyllä

Tiivistelmä

Toimeksiantajana opinnäytetyölle toimi kotimainen energiayhtiö, jonka liiketoimintoihin kuuluu kaukolämmön tuotanto. Opinnäytetyössä tarkasteltiin yhtä toimeksiantajan kaukolämpöverkoston kuuluvaa erillisverkostoa. Tämä kaukolämpöverkosto sijaitsee alueella, jonka yritystoiminnan uskotaan kehittyvän tulevaisuudessa. Alueen kehitys edellyttäisi investointia uuteen kaukolämmön tuotantoyksikköön, jotta kasvava tehontarve saataisiin katettua.

Opinnäytetyön tavoitteena oli määritellä, kuinka paljon kaukolämmön tarve voisi kasvaa tulevaisuudessa. Tämän pohjalta tavoitteena oli tarkastella millä lämmöntuotantomuodoilla tarvittava lisäteho olisi kannattavinta tuottaa. Tavoitteena oli myös selvittää millainen rooli nykyisellä kiinteän polttoaineen kattilalla olisi tulevaisuudessa.

Opinnäytetyö toteutettiin kehittämistutkimuksena. Tarkasteltaviksi tuotantomuodoiksi valittiin sähkökattila, kiinteän polttoaineen kattila sekä lämpöpumppuratkaisu. Lämpöpumpun osalta tarkasteltiin kahta hukkalämmön hyödyntämismahdollisuutta.

Opinnäytetyön tuloksena syntyi selvitys, jossa avataan kattavasti eri tuotantomuotojen mahdollisuuksia ja haasteita sekä kaukolämpöalan laajempaa kehitystä. Kehittämistutkimuksen tulokseksi saatiin, että tarvittava 0,5 MW lisäteho on kannattavinta tuottaa kiinteän polttoaineen kattilalla, metsähaketta hyödyntäen.

Avainsanat (asiasanat)

kaukolämpö, lämmöntuotanto, lämpöpumput, hukkalämpö, sähkökattila

Muut tiedot (salassa pidettävät liitteet)

-

Haapala, Suvi

Technical and economic study on increasing district heating capacity

Jyväskylä: JAMK University of Applied Sciences, February 2025, 46 pages

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

Permission for open access publication: Yes

Language of publication: Finnish

Abstract

The thesis was commissioned by a Finnish energy company whose business activities include district heating production. The thesis examined one separate network belonging to the client's district heating network. This district heating network is located in an area where business activities are expected to develop in the future. The development of the area would require investment in a new district heating production unit to cover the growing power demand.

The goal of this thesis was to determine how much the need for district heating could increase in the future. Based on this, the goal was to examine which forms of heat production would be the most profitable to produce the necessary additional power. The aim was also to determine what role the current solid fuel boiler would have in the future.

The research method in this thesis was development study. The examined production forms were an electric boiler, a solid fuel boiler and a heat pump solution. In the case of a heat pump, two possibilities for utilizing waste heat were examined.

The result of the thesis was a report that comprehensively explores the possibilities and challenges of different production forms and the broader development of the district heating sector. As a result of the development study, it was found that the necessary additional power of 0.5 MW is most profitable to produce with a solid fuel boiler, using forest chips.

Keywords/tags (subjects)

district heating, heat production, heat pumps, waste heat, electric boiler

Miscellaneous (Confidential information)

-

Sisältö

| | | |
|----------------------|---|-----------|
| 1 | Johdanto | 6 |
| 1.1 | Opinnäytetyön tausta | 6 |
| 1.2 | Työn tavoitteet..... | 6 |
| 1.3 | Tutkimuskysymykset ja aiheen rajaus..... | 7 |
| 2 | Tutkimusmenetelmät | 8 |
| 2.1 | Aineiston ja tietoperustan rooli | 9 |
| 3 | Kaukolämmön tuotannon ja mitoituksen periaatteita | 10 |
| 3.1 | Kaukolämpö Suomessa | 10 |
| 3.2 | Kaukolämmön tuotantoa ohjaavat tekijät | 11 |
| 3.3 | Tuotanto- ja tilaustehon määrittäminen | 11 |
| 4 | Sähkökattilat | 13 |
| 5 | Lämpöpumput | 14 |
| 5.1 | Lämpöpumppujen hyödyntäminen kaukolämpöverkossa..... | 15 |
| 5.2 | Hukkalämmöt..... | 16 |
| 5.2.1 | Energiateollisuuden hukkalämmöt..... | 16 |
| 6 | Sähkön perustuvat tuotantomuodot | 17 |
| 7 | Metsähakkeen hyödyntäminen kaukolämmityksessä | 20 |
| 8 | Tarkasteltavan kaukolämpöverkon nykytilanne | 22 |
| 9 | Määritelty lisätehontarve | 24 |
| 10 | Lämpöpumpun ja hukkalämpöjen hyödyntäminen kohteessa | 26 |
| 11 | Investoinnin kannattavuuden tarkastelu | 29 |
| 11.1 | Sähkökattila..... | 30 |
| 11.2 | Lämpöpumppuratkaisu | 34 |
| 11.3 | Hakekattila | 37 |
| 12 | Tulokset ja johtopäätökset | 38 |
| 13 | Pohdinta ja tulosten hyödynnettävyys | 40 |
| 13.1 | Jatkotoimenpiteet | 42 |
| 13.2 | Tutkimuksen luotettavuus ja eettisyys | 42 |
| Lähteet | 44 | |

Kuviot

| | | |
|----------|---|----|
| Kuvio 1. | Kehittämistutkimus prosessi | 9 |
| Kuvio 2. | Metsähakkeen ja -murskeen hintoja 2022-2024 | 21 |

| | |
|--|----|
| Kuvio 3. Kaukolämpöverkon pysyvyyskäyrä 2023 | 23 |
| Kuvio 4. Kaukolämpöverkon pysyvyyskäyrä 1.1.2024-10.11.2024..... | 23 |
| Kuvio 5. Savukaasujen lämpötilat 1.2-29.2.2024..... | 26 |
| Kuvio 6. Kylmäaineen R134a Log p-h kaavio 60-95 astetta..... | 27 |
| Kuvio 7. Kylmäaineen R134a Log p-h kaavio 25-95 astetta..... | 28 |
| Kuvio 8. Sähköverkkoyhtiön hinnasto..... | 31 |

Taulukot

| | |
|--|----|
| Taulukko 1. Rakennustyyppien ominaislämpötehoja | 12 |
| Taulukko 2. Lämpimän käyttöveden mitoitusvirtaamat..... | 13 |
| Taulukko 3. Sähköpörssin keskihinnat 2023-2024..... | 19 |
| Taulukko 4. Sähköpörssin futuurihintoja 2025-2026..... | 20 |
| Taulukko 5. Mahdollisten rakennusten tilaustehon määrittely | 25 |
| Taulukko 6. Pien- ja keskijännitetoteutuksen sähkönsiirto kustannukset | 32 |
| Taulukko 7. Sähkökattila investointi | 33 |
| Taulukko 8. Lämpöpumppu investointi | 35 |
| Taulukko 9. Lämpöpumppu savukaasupesurilla -investointi..... | 36 |
| Taulukko 10. Hakekattila investointi..... | 38 |

1 Johdanto

1.1 Opinnäytetyön tausta

Kaukolämmityksellä on merkittävä rooli Suomen lämmöntuotannossa. Suomessa toimii monia kaukolämpöä tarjoavia yrityksiä, jotka vastaavat yksilöllisistä kaukolämpöverkoistaan. Eri lämmöntuotantomuotojen tarkastelu voi tulla yrityksille ajankohtaiseksi esimerkiksi tilanteissa, joissa nykyisen lämmöntuotantoyksikön käyttöikä alkaa lähestyä loppuaan tai nykyinen tuotantoteho ei riitä vastaamaan asiakkaiden tarpeeseen. Kaukolämmön tuotantomuotoa valittaessa tärkeäksi tekijäksi nousee se, että tuotantokustannusten tulee olla sellaisella tasolla, että kaukolämpöä voidaan tarjota kilpailukykyiseen hintaan. Lämmöntuotantomuotoa valittaessa tulee tuntee hyvin tarkasteltava kaukolämpöverkosto ja sen erityispiirteet. Kaukolämpöverkostojen vaihteleva koko, erilaiset asiakkaat ja sijainti asettavat teknisiä ja taloudellisia reunaehdoja tuotantomuotojen valintaan.

Tällä hetkellä kamppailu ilmastonmuutosta vastaan ja sen myötä vaadittava energiamurros koskettavat voimakkaasti koko energiasektoria. Lämmöntuotannon osalta energiamurroksella tarkoitetaan siirtymistä uusiutuviin polttoaineisiin ja hiilineutraaleihin tuotantomuotoihin. Energiamurroksen myötä investointipäätösten tukena on oltava myös selkeä käsitys siitä, että valittu tuotantomuoto on linjassa kaukolämmityksen laajemman kehityskulun kanssa. Päätösten tulee perustua sen hetken parhaaseen tietoon siitä, miten esimerkiksi lainsäädäntö ja verotuspäätökset voivat tulla vaikuttamaan lämmöntuotantokustannuksiin.

Opinnäytetyön toimeksiantaja on energiayhtiö, jonka liiketoiminta-alueisiin kuuluu kaukolämpö. Toimeksiantajan kaukolämpöverkoston kuuluu tällä hetkellä neljä erillisverkkoa, joista yhtä käsitellään tässä opinnäytetyössä. Erillisverkko sijaitsee alueella, jossa etenkin yritystoiminnan odotetaan tulevaisuudessa kasvavan. Tämän myötä joudutaan todennäköisesti tekemään investointipäätöksiä, jotta tarvittava kapasiteetti pystytään kattamaan.

1.2 Työn tavoitteet

Kehittämistutkimuksen tavoitteena oli tutkia, mikä lämmöntuotantomuoto olisi teknistaloudellisesti paras vaihtoehto tarkastellun erilliskaukolämpöverkon kasvavan tehontarpeen kattamiseen.

Teknitaloudellisen tarkastelun pohjalle oli tavoitteena luoda tulevaisuuden skenaario, jossa kar-
toitetaan alueelle mahdollisesti syntyvää rakennuskantaa ja sen aiheuttamaa lisätehon tarvetta.
Opinnäytetyön tavoitteena on tarjota toimeksiantajalle selkeä ja konkreettinen kuva siitä, miten
eri tuotantomuotojen kannattavuus vertautuu tarkastellussa kaukolämpöverkossa. Opinnäytetyön
tavoitteena oli myös tarkastella nykyisen tuotantolaitoksen hukkalämpöjen hyödyntämismahdolli-
suuksia.

Alan laajemman kehityksen kannalta työn tavoitteet nähdään hyvin ajankohtaisena. Teknitalou-
delliseen tarkasteluun haluttiin kytkeä vahvasti kaukolämmityksen laajempi kehitys ja tätä myöten
myös kestävä kehityksen näkökulmat. Työssä haluttiin tuoda esiin sitä, miten metsähakkeen
käyttö lämmöntuotannon polttoaineena vertautuu sähköä käyttäviin tuotantomuotoihin. Työn ta-
voitteena on peilata alan laajempaa kehitystä ja siihen liittyviä tavoitteita siihen, millaisia realiteet-
teja nykyinen toimintaympäristö asettaa investoinneille.

1.3 Tutkimuskysymykset ja aiheen rajaus

Opinnäytetyössä vastattiin seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

-Mikä tarkastelluista tuotantomuodoista on kohteen kannalta teknisesti ja taloudellisesti paras?

-Kannattaako nykyinen hakelämpökeskus säilyttää?

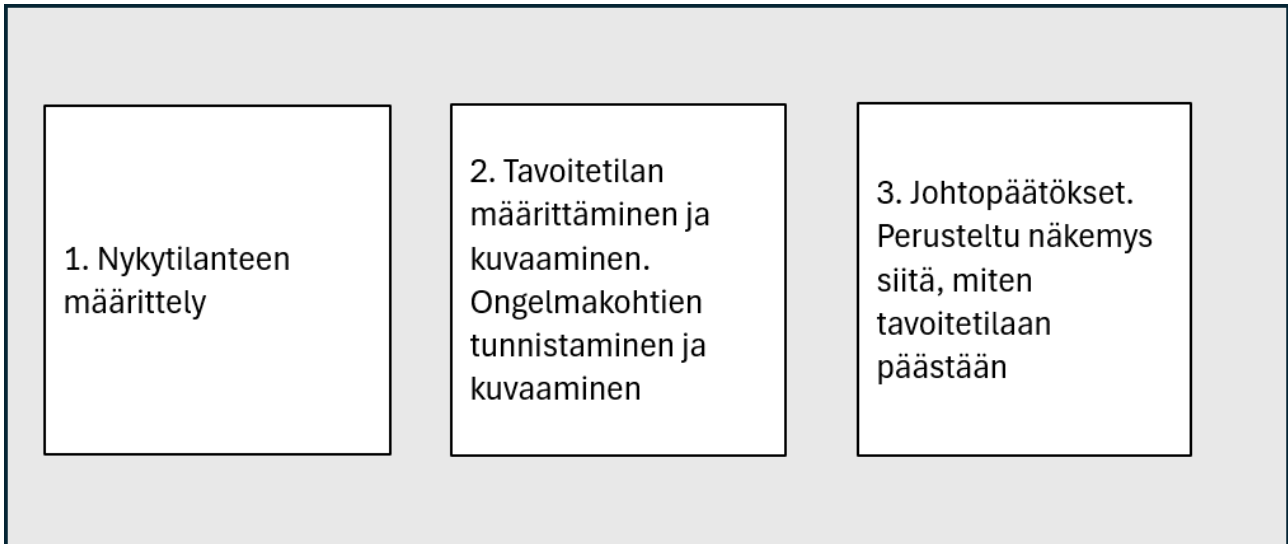
Opinnäytetyössä tarkasteltuja tuotantomuotoja olivat kiinteän polttoaineen kattila, sähkökattila
sekä lämpöpumppuratkaisu. Lämpöpumpun osalta tarkasteltiin mahdollisuutta hyödyntää nykyi-
sen 0,99 MW hakekattilan synnyttämää hukkalämpöä. Opinnäytetyössä tutkittiin mahdollisuutta
hyödyntää hakekattilan savukaasujen hukkalämpöä savukaasupesurin avulla sekä mahdollisuutta
hyödyntää hakekattilan lämpökeskukseen synnyttämää tuntuvaa lämpöä. Näiden osalta tutkittiin
erityisesti sitä, miten eri lämpötilatasoissa oleva lämpö vaikuttaa lämpöpumpun lämpökerto-
meen. Kiinteän polttoaineen kattilan osalta tarkasteltiin kattilaa, joka käyttää polttoaineena pää-
asiassa metsähaketta. Kaikkien tarkasteltujen tuotantomuotojen oletetaan tulevan osaksi perus-
kuormantuotantoa, eli työssä ei oteta kantaa huippu- ja varatehontuotantoon.

Teknitaloudelliseen tarkasteluun kytkeytyvät tiiviisti taloudellisen ja ekologisen kehityksen näkökulmat. Tänä päivänä näiden nähdään liittyvän yhä voimakkaammin toisiinsa. Taloudellisesti kannattava investointi mahdollistaa myös muiden kestäväen kehityksen periaatteiden toteutumisen. Yrityksen vakaa talous mahdollistaa reagoimisen tarvittaviin muutoksiin ja toiminnan kehittämisen yhä vastuullisempaan ja kestävämpään suuntaan. Teknisesti ja taloudellisesti kannattava investointi lämmöntuotantoon mahdollistaa myös asiakkaille kohtuuhintaisen ja varman lämmöntoimituksen.

Tarkasteltavat tuotantomuodot valikoituivat toimeksiantajan kanssa käydyn keskustelun pohjalta. Kaikki tarkasteluun valitut tuotantomuodot ovat uusiutuvalla energialla tuotettuja ja vastaavat näin ekologisen kestävyden tavoitteisiin. Nykyisen hakekattilan tuottamien hukkalämpöjen hyödyntämismahdollisuuksien tarkastelu nähtiin myös osana lämmöntuotannon resurssitehokkuuden parantamista. Viimeaikaisen keskustelun ja uutisoinnin myötä voidaan todeta valittujen tuotantomuotojen olevan alan kannalta ajankohtaisia. Kokonaisuudessaan kehittämistutkimuksen ja tietoperustan aiheen ja sen rajauksen nähdään vastaavan kaukolämpöalalla käytävään ajankohtaiseen keskusteluun ja kysymyksiin.

2 Tutkimusmenetelmät

Opinnäytetyö toteutettiin kehittämistutkimuksena. Kehittämistutkimusta ei luokitella omaksi, erilliseksi tutkimusmenetelmäksi, vaan siinä yhdistyvät kvalitatiiviset ja kvantitatiiviset tutkimusotteet. Toteutustavaksi valikoitui kehittämistutkimus, sillä monimenetelmäinen tutkimusote sopii aiheen käsittelyyn. Kehittämistutkimus lähtee aina muutostarpeesta, ja tämä muutostarve on tunnistettu työn aiheesta. Kehittämistutkimuksen tunnusmerkkinä on se, että tutkija toimii ulkopuolisena havainnoijana (Kananen 2012). Kehittämistutkimuksen vaiheisiin liittyy usein myös toimenpide ehdotuksen kokeilu, arviointi ja testaus. Tässä opinnäytetyössä keskitytään kuitenkin vain kehittämistutkimuksen kehittämissyklin kolmeen ensimmäiseen vaiheeseen, jotka on avattu kaaviossa 1. (Kananen 2012, muokattu) Rajaus kolmeen ensimmäiseen vaiheeseen on tehty siksi, että opinnäytetyön tarkoituksena on olla selvitys, eikä toimenpide ehdotusta ole tarkoitus toteuttaa opinnäytetyöprosessin aikana.



Kuvio 1. Kehittämistutkimus prosessi

Toisena syynä kehittämistutkimuksen valintaan oli se, että kehittämistutkimus tukee opinnäytetyön eettisyyteen liittyviä vaatimuksia. Työssä käsitellään todellista energiantuotantojärjestelmää, joka kuuluu kriittisen infrastruktuurin piiriin. Tästä syystä toimeksiantajan toiveena oli pitää heidät ja tarkasteltava kaukolämpöverkko tunnistamattomana.

2.1 Aineiston ja tietoperustan rooli

Kehittämistutkimuksen aikana aineistoa kerättiin kaikkiin kuviossa 1 nähtäviin kohtiin. Aineiston keräämisessä ja analysoinnissa yhdistettiin kehittämistutkimukselle ominaiseen tapaan kvalitatiivisia ja kvantitatiivisia tutkimusotteita. Aineiston keräämisen pohjana oli saavuttaa mahdollisimman syvä ymmärrys tutkittavan kohteen nykytilanteesta ja tavoitetilan määrittelyyn liittyvistä tekijöistä. Tätä varten kvalitatiivista aineistoa kerättiin dokumenttien ja vapaamuotoisten keskustelujen muodossa. Aineiston keräämiseksi keskustelua käytiin suullisesti ja sähköpostitse sekä toimeksiantajayrityksen asiakkuus- ja myyntipäällikön ja kaukolämpömasterin, että kaupungin tonttivastaavan kanssa. Kvalitatiivisen aineiston pohjalta pystyttiin esittämään tarkempia kysymyksiä kvantitatiivisen aineiston keräämiseksi. Kvantitatiivinen aineisto muodostuu tyypillisesti numeroista ja tilastoista. Näitä voidaan analysoida erilaisilla laskennallisilla ja tilastollisilla menetelmillä. (Määrällinen analyysi n.d.) Laskennallista analyysiä varten aineistoa kerättiin sähköpostitse toimeksiantajan, suunnittelutoimiston sekä laitteistoja tarjoavien yritysten edustajilta. Kaikkien ai-

neistojen analysointi toteutettiin teorialähtöisesti. Aineistonkeruuprosessi vastasi enemmän syklistä kuin lineaarista prosessia. Kun kerättyä aineistoa analysoitiin yhdistämällä sitä aiheeseen liittyvään teoriaan, pystyttiin aineistoa tarvittaessa laajentamaan tai tarkentamaan. Aineiston analysointi teorialähtöisesti mahdollisti myös sen, että kerätystä aineistosta voitiin karsia pois tietoa, joka ei tuo työhön lisäarvoa.

Opinnäytetyössä esitetty tietoperusta on pyritty rajaamaan siten, että se mukailee kehittämistutkimuksen rajausta. Tietoperusta rakentuu pitkälti tarkasteltavien tuotantomuotojen teoriapohjaan. Tietoperusta tukee käytännön kehitystutkimusta antamalla lukijalle käsityksen siitä, mitä teknisiä ja taloudellisia tekijöitä kuhunkin tuotantomuotoon liittyy. Tietoperusta tukee myös työn luotettavuutta, avaamalla laskentaan vaikuttavia tekijöitä. Tietoperusta muodostuu pääosin kotimaisista lähteistä, sillä opinnäytetyön aiheen ja rajauksen kannalta relevantteja kansainvälisiä lähteitä oli hyvin vähän.

3 Kaukolämmön tuotannon ja mitoituksen periaatteita

3.1 Kaukolämpö Suomessa

Kaukolämmityksellä tarkoitetaan keskitettyä lämmöntuotanto ja -jakelujärjestelmää. Kaukolämpöverkosto voi kattaa laajoja alueita, kuten esimerkiksi kokonaisia kaupunkeja ja niiden osia. Keskitetysti tuotettu lämpö johdetaan asiakkaille pumppaamalla kuuma kiertovesi kaukolämpöverkkoa pitkin. Asiakkaan rakennuksessa on lämmönjakokeskus, jonka kautta lämpöenergia siirtyy kaukolämmön kiertovedestä rakennuksen lämmitysjärjestelmään. Kaukolämpövesi palaa jäähtyneenä lämmöntuotantolaitokselle, missä se lämmitetään uudelleen. Kaukolämpöä voidaan tuottaa CHP-laitoksissa (Combined Heat and Power) ja lämpökeskuksissa. Näiden erona on se, että CHP-laitos on yhteistuotantolaitos, jossa samassa prosessissa tuotetaan sekä lämpöä että sähköä, kun taas lämpökeskuksissa tuotetaan pelkästään lämpöä. (Mäkelä & Tuunanen 2015, 11, 24–25.)

Kaukolämmityksellä on tärkeä rooli Suomen asuin- ja palvelurakennusten lämmityksessä, sillä esimerkiksi vuonna 2018 niiden lämmitysenergiasta tuotettiin 46 % kaukolämmöllä. Kaukolämpö onkin Suomen yleisin lämmitysmuoto. Kaikkiaan 166 Suomen kunnasta löytyy kaukolämpöverkkoa. (Kaukolämpö 2024.) Vuonna 2023 kaukolämpöä käytettiin lämpötilakorjattuna 33,7 TWh, joka on hieman vähemmän kuin edellisvuonna (Energia vuosi 2023 kaukolämpö 2024.).

3.2 Kaukolämmön tuotantoa ohjaavat tekijät

Kaukolämmöntuotannossa tärkeimpiä ohjattavia tekijöitä ovat kaukolämpöverkoston meno- ja paluuputkien välillä vallitseva paine-ero sekä kaukolämpöveden menolämpötila. Menoveden lämpötilaa määrittää ulkolämpötila. Tällä hetkellä ylin lämpötila kaukolämmön menovedelle on 115°C. Kesäaikaan, kun rakennusten lämmitystarve on pienempi, menoveden lämpötilaa ohjaa lämpimän käyttöveden valmistus. Käyttöveden lämmönsiirtimillä ensiöpuolen mitoituslämpötilana on 70°C. Kaukolämpöverkoston voi kuitenkin kuulua esimerkiksi teollisuuslaitoksia, jotka vaativat myös kesäaikaan korkeampaa lämpötilatasoa. (Mäkelä & Tuunanen 2015, 22–23.) Tulevaisuudessa tavoitteena on laskea kaukolämpöveden menolämpötilaa. Tämä toteutetaan käytännössä siten, että rakennusmääräyksessä lasketaan lämmityksen ja ilmanvaihdon lämmönsiirtimien mitoituslämpötila 90°C. Uutta mitoituslämpötilaa käytetään uudisrakennusten lämmitysjärjestelmää suunniteltaessa sekä olemassa olevien rakennusten lämmönsiirtimiä vaihdettaessa. (Rakennusten kaukolämmitys, määräykset ja ohjeet, julkaisu K1/21 2021, 8.)

3.3 Tuotanto- ja tilaustehon määrittäminen

Kaukolämpölaitoksen tehontarvetta mitoitettaessa hyödynnetään usein pysyvyyssäyrää. Pysyvyyssäyrän avulla voidaan tarkastella vuoden ajalta sitä, kuinka monta tuntia vuodessa tiettyä tehotasoa vaaditaan. Pysyvyyssäyrältä voidaan määrittää mikä osuus tehontarpeesta kannattaa tuottaa peruskuormalaitoksella ja mikä osuus huippu- ja varalämpökeskuksissa. Pienemmissä kaukolämpöverkoissa peruskuorma tuotetaan usein yksittäisessä kiinteän polttoaineen lämpökeskuksessa. Huippu- ja varateho tuotetaan usein öljyllä tai maakaasulla. (Mäkelä & Tuunanen 2015, 30–32.) Keskitetyissä järjestelmissä päästään yleensä edullisimpaan lopputulokseen, kun lämmön hankinta jaetaan eri tuotantomuotojen kesken. Pienemmissä järjestelmissä kapasiteetin jakaminen moneen tuotantoyksikköön ei ole teknisesti järkevää. Kuitenkin perus- ja huipputeho on kannattavaa tuottaa erillisillä yksiköillä. (Koskelainen, Saarela & Sipilä 2006, 259.)

Kaukolämpöverkkoa suunniteltaessa otetaan nykyisen tehontarpeen lisäksi huomioon tarpeet, joita ilmenee kaavoituksen ja muiden vastaavien suunnitelmien pohjalta noin 10–15 vuoden tähtämellä. Alueellisen tehontarpeen yleissuunnittelussa merkittävä tekijä on suurin yhtäaikaisesti tarvittava tuntiteho (Koskelainen, Saarela & Sipilä 2006, 153.) Kaukolämpöverkon tehontarpeen

arvioimisessa voidaan käyttää hyödyksi tietoa siitä, millaisia tilaustehoja verkkoon liittyvät rakennukset tarvitsevat. Tilausteholla tarkoitetaan suurinta tuntista lämpötehoa, joka on varattu asiakkaan käyttöön. Tilausteho koostuu rakennuksen lämmitystehosta, ilmanvaihtotehosta, käyttövesipiiriin liitettyjen lisälaitteiden ja käyttöveden tuntisesta lämpötehosta. (Tilausteho ja -vesivirta 1998, 1, 6.) Erilaisten rakennustyyppien lämmitystehontarpeen arviointiin voidaan hyödyntää kaukolämmön käsikirjassa listattuja ominaislämpötehoja, jotka on listattu seuraavassa taulukossa (Koskelainen, Saarela & Sipilä 2006, 154, muokattu).

Taulukko 1. Rakennustyyppien ominaislämpötehoja

| Rakennustyyppi | Ominaislämpöteho (W/m ³) | Alueellinen verrannollisuuskerroin 1,09 huomioituna (W/m ³) |
|-----------------------|--------------------------------------|--|
| Liikerakennukset | 20–30 | 21,8–32,7 |
| teollisuusrakennukset | 15–25 | 16,35–27,25 |
| Pientalot | 18–20 | 19,62–21,8 |

Käytännössä ominaislämpötehoon vaikuttaa paljon uusien rakennusten merkittävästi parantunut energiatehokkuus. Nykyisin myös erilaiset hybridiratkaisut ovat yleistyneet merkittävästi, joka myös vähentää lämmitystehon tarvetta. Erityisen haastavaa on käyttöveden tuntisten tehontarpeiden arvioiminen, kun suunnitellut rakennustyyppit ovat pääasiassa liike-, teollisuus- ja varastorakennuksia. Asuinrakennusten tuntisten käyttövesitehojen arvioiminen on helpompaa, kun taas liike- ja teollisuusrakennuksissa käyttövesitehot voivat olla hyvin yksilöllisiä toiminnan luonteesta riippuen. (Mäkelä & Tuunanen 2015, 53.) Käyttöveden tuntisen tehon määrittämiseksi tarvitaan rakennuksen lämpimän käyttöveden mitoitusvirtaama. Seuraava taulukko on tehty Energiateollisuus ry:n suosituksen K15/1998 liitteen 1 mukaan ja siitä voidaan tarkastella mitä luokkaa tuntitehot ovat eri mitoitusvirtaamilla ei asuinrakennuksissa (Tilausteho ja -vesivirta 1998, liite 1, muokattu).

Taulukko 2. Lämpimän käyttöveden mitoitusvirtaamat

| Lämpimän käyttöveden mitoitusvirtaama dm ³ /s | Käyttöveden tuntinen teho kW |
|--|------------------------------|
| 0,30–0,82 | 5–30 |
| 0,84–1,62 | 31–60 |
| 1,64–2,44 | 61–90 |
| 2,46–3,28 | 91–122 |

4 Sähkökattilat

Sähkökattiloita käytetään kuuman veden tuottamiseen suoraan sähkön avulla. Sähkökattiloita on kahden tyyppisiä, elektrodikattiloita ja vastuskattiloita. Vastuskattilat toimivat samalla periaatteella kuin vedenkeitin, eli veden lämmittämiseen käytetään sähkövastusta. Vastuskattiloita hyödynnetään tyypillisesti pienemmissä järjestelmissä, joissa tehontarve on 1–2 MW. Elektrodikattiloiden toiminta perustuu siihen, että veteen johdetaan elektrodijärjestelmän luomaa suurjännitteistä vaihtovirtaa, joka saa veden lämpenemään. (Pardo Garcia, Vatopoulos, Krook-Riekkola, Perez Lopez & Olsen 2012, 14.) Elektrodikattiloita on hyödynnetty ensisijaisesti höyryntuotantoon, mutta erillisen lämmönsiirtimen avulla sitä voidaan hyödyntää myös kaukolämmön tuotantoon (Mäkelä & Hietala 2021, 24).

Yksinkertainen toimintaperiaate mahdollistaa kompaktin koon, edullisen hinnan ja nopean säätömahdollisuuden. Sähkökattiloiden joustavalla käytöllä nähdään olevan tärkeä rooli tulevaisuudessa. Sähkökattiloiden edullisuus mahdollistaa sen, että niitä voidaan ottaa käyttöön vaihtoehtoisen tehon rinnalle. Toisen lämmöntuotantomuodon rinnalla käytettäessä sähkökattiloiden ajaminen voidaan ajoittaa hetkiin, jolloin sähkö on edullista. Sähkökattiloiden nopean säätömahdollisuuden ansiosta sähkökattila voi olla osana kaikkia säätömarkkinoita. Tällä voidaan olla apuna kantaverkon tasapainottamisessa. (Joronen, Salhoja, Seppälä & Vähätiitto 2023, 26–27.) Sähkökattilajärjestelmän käytettävyys paranee, mikäli kaukolämpöjärjestelmän yhteyteen saadaan lämpöakku. Tyypillisesti kaukolämpöakkuna käytetään lieriön muotoista vesisäiliötä, joka voi varastoida satoja megawattitunteja energiaa. (Laihanen, Karhunen, Föhr & Ranta 2024, 26.) Sähköverkon siirtomaksuilla on tärkeä rooli sähkökattilainvestointien kannattavuudessa. Sähkökattilaa varten olisi

hyvä olla olemassa oma tariffi, joka huomioi sähkökattilan verkkoon tarjoaman jouston. Tariffin hinta voi nousta liian korkeaksi, mikäli siirron hinnoittelu tapahtuu pelkän verkkoon kytketyn tehon perusteella. (Joronen ym. 2023, 28.)

5 Lämpöpumput

Yksinkertaistettuna lämpöpumpun tarkoituksena on kerätä lämpöä lämmönlähteestä, nostaa sen lämpötilaa ja luovuttaa lämpö haluttuun kohteeseen. Lämmönlähteitä ovat esimerkiksi ilma, vesi, maa ja hukkalämmöt. Lämpöpumpun toiminta perustuu kylmäaineeseen, joka kiertää koko lämpöpumpppu-prosessin läpi. Kylmäaine kerää lämpöä käytetystä lämmönlähteestä ja höyrystyy jo alhaisessa lämpötilassa lämpöpumpun höyrystimessä. Höyrystymisen jälkeen kompressori nostaa höyrystyneen kylmäaineen lämpötilan lähes 100 asteeseen puristamalla sen korkeaan paineeseen. Tästä kylmäaine siirtyy lauhduttimelle, jossa kylmäaine tiivistyy takaisin nesteeksi, luovuttamalla samalla lämpöä haluttuun kohteeseen. Ennen kuin sama kierto lähtee uudelleen käyntiin, kylmäaine kulkee paisuntaventtiilin läpi, joka alentaa sen painetta voimakkaasti. (Perälä 2013, 28–29.)

Lämpöpumpppu-prosessi vaatii sähköä. Lämpöpumpun tehon tarkastelu perustuu siihen kuinka suuren määrän lämpöä pumppu voi tuottaa itse suhteessa sen kuluttamaan energiamäärään. Tästä voidaan laskea lämpöpumpun lämpökerroin, josta käytetään yleisesti lyhennettä COP (Coefficient of performance). Mitä suuremmaksi lämpötilaero lämmönlähteen ja lämmitykseen tarvittavan lämpötilan välillä nousee, sitä enemmän lämpöpumpun kompressori ja apulaitteet joutuvat käyttämään sähköä lämpötilan nostamiseen. Lämpökertoimia tarkasteltaessa on huomioitava se, että usein teoreettisesti määritetty lämpökerroin ei vastaa täysin todellisuutta. Teoreettista lämpöarvoa heikentää muun muassa kompressorin ja muiden laitteiden itse kuluttama energia, sekä se mistä kohtaa prosessia laskelmien lämpötilat on otettu. (Perälä 2013, 30–31.) Kompressorin häviöt huomioon ottava lämpökerroin voidaan laskea aineen tunnettujen energiasisältöjen, eli entalpia-arvojen avulla seuraavalla kaavalla.

$$COP = \frac{(H_2 - H_4)}{(H_2 - H_1)} \quad (1)$$

Missä H_1 on kylmäaineen entalpia-arvo höyrystymisen jälkeen, H_2 on kylmäaineen entalpia-arvo kompressorin puristustyön jälkeen ja H_4 on kylmäaineen entalpia-arvo lauhtumisen jälkeen.

5.1 Lämpöpumppujen hyödyntäminen kaukolämpöverkossa

Lämpöpumppujen käyttöönottoon jo olemassa olevissa kaukolämpöverkoissa liittyy teknisiä haasteita, jotka vaikuttavat myös niiden taloudelliseen kannattavuuteen. Kaukolämmön tuotantoon liittyy paljon sellaisia erityispiirteitä, jotka on otettava huomioon lämpöpumppuratkaisua mietittäessä. Merkittävin haaste lämpöpumppujen käyttöönottoon on kaukolämpöverkon korkea lämpötilataso. Etenkin hyödynnettäessä luonnon lämmön lähteitä lämpöpumpun lämpökerroin kärsii. Tästä syystä lämpöpumppujen hyödyntäminen kaukolämmöntuotannossa kytkeytyy voimakkaasti tavoitteeseen madaltaa kaukolämpöverkoston lämpötilaa. (Kauppila 2018, 17.)

Ilma-vesilämpöpumppuja voidaan hyödyntää isossa mittakaavassa ilman erillistä lämmönlähdettä. Ilma-vesilämpöpumpputeknologian kaukolämpöhyödyntämisen haasteena on kuitenkin saatavuuden käänteinen suhde tarpeeseen. Tampereen Energian selvityksen perusteella IVLP-laitoksen COP on keskimäärin noin 2, kun tarkastellaan vuoden aikana tuotettua lämpöä. Fortum on ilmoittanut Vermon IVLP-laitoksen COP-arvoksi 1–4. (Joronen ym. 2023, 36.) Heikolla lämpökertoimella on luonnollisesti vaikutusta lämpöpumpulla tuotetun lämmön tuotantokustannuksiin (Kauppila 2018, 15).

Pienen kokoluokan kaukolämpöjärjestelmissä lämpöpumppuihin investoiminen on potentiaalisin silloin, kun niillä voidaan korvata kallis, fossiilinen polttoaine. Lämpöpumppujen osalta on kuitenkin mahdotonta luoda yleistystä siitä, milloin investointi on kannattava. Jokaisen kaukolämpöverkon osalta on huomioitava sen erityispiirteet, joita ovat esimerkiksi koko, tuotantopaletti, rakenne ja lämpötilatasot. Myös lämmönlähteiden saatavuus ja sijainti kaukolämpöverkossa ovat kannattavuuteen merkittävästi vaikuttavia tekijöitä. Lämpöpumppujen etuna ovat pienet käynnistyskustannukset sekä se, että käynnistys onnistuu melko nopeasti. (Kontu, Rinne & Junnila 2018, 867.) Lämpöpumppuratkaisun kannattavuutta lisää se, että parhaimmillaan sillä päästään edullisiin tuotantokustannuksiin. Lämpöpumppuratkaisu on myös oikein suunniteltuna tuotannolliselta käyttöikänsä pitkä. Kaikista optimaalisin lämpöpumppuratkaisu on uudisalueiden tilanteessa, joissa koko järjestelmä on mahdollista suunnitella kokonaisuutena. (Kauppila 2018, 24, 28.)

5.2 Hukkalämmöt

Euroopan Unionin uusiutuvan energian direktiivissä RED II, hukkalämmöllä tarkoitetaan sellaista lämpöä, jota syntyy teollisuus- tai sähköntuotantolaitoksissa tai palvelualoilla sivutuotteena, ja joka ilman kaukolämpöön hyödyntämistä johdettaisiin käyttämättömänä ilman tai veteen. Suurin osa yleisistä hukkalämmöistä on lämpötilatasoltaan liian matalaa hyödynnettäväksi suoraan kaukolämpöverkostoon. Tällöin tarvitaan lämpöpumppua nostamaan lämpötila vaaditulle tasolle. (Rämä & Klobut 2020, 7, 20.)

Hukkalämpöjen käyttäminen lämpöpumpun lämmön lähteenä on usein toimivin ratkaisu. Lämpötilataso on ylijäämälämpövirroissa korkeampi, joka mahdollistaa paremman lämpökertoimen. Ylijäämälämpövirroista lämmön keräämisellä ei myöskään ole samanlaisia tila- ja ympäristövaatimuksia kuin maalämmön vaatimilla lämmönkeräysputkistoilla. Haasteena hukkalämpöjen hyödyntämiselle on niiden vaihteleva käytettävyys. Hukkalämpöjen hyödyntämiseen liittyvien epävarmuuksien takia onkin oltava jokin varajärjestelmä, jolla tuottaa varalämpöä kohtuuhinnalla. Ylijäämälämpövirtoina lämpöpumpuille on hyödynnetty muun muassa yhdyskunnan jätevettä, teollisuusprosessien ylijäämälämpöä, savukaasujen hukkalämpöä, jäähdyttämisestä syntyvää lauhdelämpöä ja erilaisissa laiteloissa syntyvää lämpöä. (Kauppila 2018, 22.) Hukkalämpöjen osuus kaukolämmöntuotannossa onkin kasvanut Suomessa. Vuonna 2023 hukkalämpöjen osuus kokonaistuotannosta oli 14 %. (Energiavuosi 2023 kaukolämpö 2024.)

5.2.1 Energiateollisuuden hukkalämmöt

Energiateollisuudessa merkittävimmät hukkalämmönlähteet ovat savukaasujen lämmöntalteenotto yhteistuotanto- ja kattilalaitoksista, kaukolämmön paluuvirtauksen hyödyntäminen sekä lämpöväylien talteenotto sähkölaitoksilta (Rämä & Klobut 2020, 14).

Lämpölaitoksen kattilasta syntyvää lämpöä voidaan hyödyntää kahdella tavalla. Lämpö voidaan ottaa talteen suoraan, tuntuvana lämpönä tai latenttilämpönä savukaasuista. Lämmöntalteenotto savukaasuista on kannattavampaa etenkin sellaisissa kattiloissa, joissa käytetään kosteita polttoaineita kuten haketta ja turvetta. (Rämä & Klobut 2020, 17.) Savukaasupesurit ovat tyypillinen tapa hyödyntää savukaasujen hukkalämpöä. Nykyään savukaasupesurien painopiste onkin siirtynyt en-

tistä enemmän lämmöntalteenoton tehostamiseen kuin pelkkään hiukkaspäästöjen vähentämiseen. Perinteisessä savukaasupesurissa on kaksi peräkkäistä prosessivaihetta. Pesuvaiheessa savukaasu jäähtyy ja siitä poistetaan suurin osa pienhiukkasista. Tämän jälkeen savukaasut johdetaan lauhduttimelle, jossa itse lämmön talteenotto tapahtuu. Savukaasun lämpöenergian luovutus tapahtuu pääasiassa lauhtumalla kiertoveteen, joka valuu vastavirtaan suhteessa savukaasuun. Lämmön talteenoton tehokkuuden kannalta on oleellista, että lauhdutinvyöhykkeellä alitetaan kastepistelämpötila, eli lämpötila, jossa savukaasun sisältämä vesihöyry tiivistyy. (Järvenreuna 2014.) Savukaasun kastepistelämpötila voidaan määrittää seuraavalla kaavalla

$$T_{sk,kp} = \frac{\ln \frac{F_{H2O} * 234,175}{610,78}}{\ln \frac{F_{H2O} - 17,08085}{610,78}} \quad (2)$$

Missä $T_{sk,kp}$ = savukaasun kastepistelämpötila

F_{H2O} = Savukaasussa olevan vesihöyryn pitoisuus

6 Sähköön perustuvat tuotantomuodot

Suomen tavoitteena on tehdä nykyisestä rakennuskannasta hiilineutraali vuoteen 2050 mennessä. Merkittävässä roolissa tavoitteen saavuttamiseksi on hiilineutraali kaukolämmöntuotanto. Tulevaisuudessa polttoon perustumaton teknologia kuten lämpöpumput nähdään suositeltavampana vaihtoehtona kuin kiinteän biomassan hyödyntäminen. Tämä johtuu kestävästi tuotetun biomassan rajallisuudesta. Hallitus on esittänyt tavoitteeksi edistää kaukolämmöntuotannossa polttoon perustumattomia tuotantomuotoja, lämpövarastoja ja teollisuuden hukkalämpöjen hyödyntämistä. (Finland's integrated national energy and climate plan, draft update 2023, 78.)

Sähkökattila- ja lämpöpumppuratkaisuja tarkasteltaessa huomataan, että niiden teknistaloudellinen kannattavuus kytkeytyy pitkälti sähkön hintaan. Sähköön perustuvalla lämmöntuotannolla nähdään olevan merkittävä rooli sähkömarkkinoiden tasapainottamisessa. Sähköön perustuvien tuotantomuotojen osalta on huomioitava, että niiden päästöttömyys edellyttää sitä, että käytetty sähkö on päästöttömästi tuotettua (Mäkelä & Hietala 2021). Yksi konkreettinen asia, jolla kaukolämmöntuotantoa on pyritty ohjaamaan sähköistymiseen, on vuonna 2022 tehty lakimuutos, jossa yli 0,5 MW tehoiset lämpöpumput, sähkökattilat ja konesalit siirtyivät alempaan veroluokkaan.

Muutos on parantanut sähkökattilainvestointien kannattavuutta merkittävästi (Joronen ym. 2023, 15).

Pörssisähkö ja sähkön hinnan kehitys

Pörssisähköstä puhuttaessa tärkeäksi termiksi nousee Spot-hinta. Spot-hinnalla tarkoitetaan sähköpörssissä tulevan vuorokauden jokaiselle tunnille määrittyvää sähkön hintaa. Suomessa Spot-hinnan määrittämiseen käytetään Pohjoismaiden yhteistä Nord Pool -sähköpörssiä. Hinta muodostuu joka tunnille sähkön kysynnän ja tarjonnan mukaan. Käytännössä sähköntuottajat ilmoittavat millä hinnalla he ovat valmiina tuottamaan ja myymään sähköä seuraavan vuorokauden aikana. Sähkönostajat kuten sähkön vähittäismyyjät taas ilmoittavat millä hintaa he ovat valmiita ostamaan sähköä. (Markkinakatsaus 2024.)

Sähkön hinnan muodostumiseen vaikuttaa etenkin se, miten erilaisia sähköntuotantomuotoja on saatavilla. Säystä riippumattomat tuotantomuodot kuten ydinvoima, vesivoima ja sähkön ja lämmön yhteistuotanto tuovat hintoihin vakautta. Säystä riippuvainen tuulivoima taas heiluttaa sähkön hintaa merkittävästi. Sähkön hinta voi nousta korkealle etenkin talvikuukausina, kun sähkön kysyntä on korkeimmillaan. Korkeisiin hintapiikkeihin voivat johtaa muun muassa heikko vesitalanne vesivoiman tuotannossa, katkokset maiden välisissä sähkönsiirtolinjoissa, voimalaitosten viikantumisesta sekä tuulettomat ajanjaksot. (Markkinakatsaus 2024.) Alla olevassa taulukossa on esitetty vuosien 2023 ja 2024 kuukausittaisia toteutuneita sähkön keskihintoja (Day-ahead Prices. n.d, muokattu).

Taulukko 3. Sähköpörssin keskihinnat 2023-2024

| Aika | €/MWH (alv 0%) | | Aika | €/MWH (alv 0%) |
|-------------------|-------------------|--|-------------------|-------------------|
| tammi.23 | 78,76 | | tammi.24 | 106,22 |
| helmi.23 | 80,13 | | helmi.24 | 51,58 |
| maalis.23 | 74,17 | | maalis.24 | 59,38 |
| huhti.23 | 60,55 | | huhti.24 | 48,92 |
| touko.23 | 26,61 | | touko.24 | 35,13 |
| kesä.23 | 43,37 | | kesä.24 | 36,09 |
| heinä.23 | 32,92 | | heinä.24 | 16,74 |
| elo.23 | 66,44 | | elo.24 | 12,53 |
| syys.23 | 32,81 | | syys.24 | 56,02 |
| loka.23 | 37,64 | | loka.24 | 40,64 |
| marras.23 | 69,68 | | marras.24 | 45,34 |
| joulu.23 | 76,24 | | | |
| | | | | |
| keskihinta | 56,61 | | keskihinta | 46,24 |

Tilanteet sähkömarkkinoilla voivat vaihdella paljon ja tarkkojen Spot-hintojen arvioiminen tulevaisuuteen on mahdotonta. Tulevaisuuden hintakehitystä voidaan kuitenkin arvioida futuurihintojen avulla. Futuurit syntyvät johdannaismarkkinoilla, jossa sähkön tuottajat ja ostajat sitoutuvat noteerattujen futuurien avulla tulevaisuudessa ostamaan ja myymään sähköä sovittuun hintaa. Noteerattuja futuureita pidetään sen hetken parhaana näkemyksenä hintakehityksen tulevaisuudesta, mutta ne kuitenkin elävät ja päivittyvät kun saadaan lisää tietoa. (Markkinakatsaus 2024.) Seuraavassa taulukossa nähdään tämänhetkiset futuurihinnat seuraavalle kahdelle vuodelle (Sähköhintakatsaus 2024, muokattu).

Taulukko 4. Sähköpörssin futuurihintoja 2025-2026

| Aika | snt/kWh (alv 25,5 %) | snt/kWh (alv 0 %) | €/MWh (alv 0%) | Aika | snt/kWh (alv 25,5 %) | snt/kWh (alv 0 %) | €/MWh (alv 0%) |
|-----------|-------------------------|----------------------|----------------|-----------|-------------------------|----------------------|----------------|
| tammi.25 | 9,16 | 7,30 | 72,99 | tammi.26 | 8,32 | 6,63 | 66,29 |
| helmi.25 | 10,01 | 7,98 | 79,76 | helmi.26 | 8,32 | 6,63 | 66,29 |
| maalis.25 | 8,85 | 7,05 | 70,52 | maalis.26 | 8,32 | 6,63 | 66,29 |
| huhti.25 | 6,02 | 4,80 | 47,97 | huhti.26 | 4,41 | 3,51 | 35,14 |
| touko.25 | 3,92 | 3,12 | 31,24 | touko.26 | 4,41 | 3,51 | 35,14 |
| kesä.25 | 4,28 | 3,41 | 34,10 | kesä.26 | 4,41 | 3,51 | 35,14 |
| heinä.25 | 3,87 | 3,08 | 30,84 | heinä.26 | 3,69 | 2,94 | 29,40 |
| elo.25 | 3,87 | 3,08 | 30,84 | elo.26 | 3,69 | 2,94 | 29,40 |
| syys.25 | 3,87 | 3,08 | 30,84 | syys.26 | 3,69 | 2,94 | 29,40 |
| loka.25 | 6,89 | 5,49 | 54,90 | loka.26 | 6,46 | 5,15 | 51,47 |
| marras.25 | 6,89 | 5,49 | 54,90 | marras.26 | 6,46 | 5,15 | 51,47 |
| joulu.25 | 6,89 | 5,49 | 54,90 | joulu.26 | 6,46 | 5,15 | 51,47 |
| | | | | | | | |
| | | keskihinta | 49,48 | | | keskihinta | 45,58 |

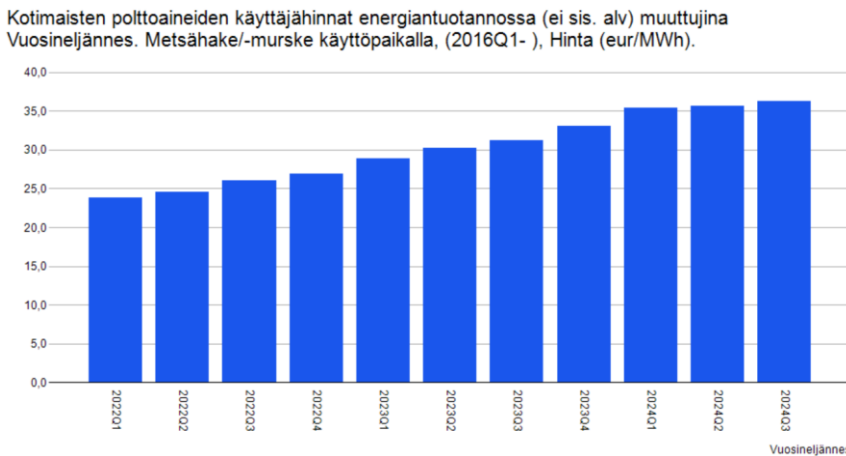
7 Metsähakkeen hyödyntäminen kaukolämmityksessä

7.1 Metsähake

Metsähaketta käytetään yleisnimityksenä hakkeelle, jota valmistetaan kokopuusta, rangoista tai hakkuutähteistä. Hakkuutähteitä ovat esimerkiksi hakkuualueelle jääneet pienpuut, latvukset tai kannot. Hakkeen laatua polttoaineena määrittää sen lämpöarvo. Merkittävimmät hakkeen lämpöarvoon vaikuttavat ominaisuudet ovat puuaineen, kosteuspitoisuus, kemiallinen koostumus ja tiheys, neulasosuus ja tuhkapitoisuus. Tehollinen lämpöarvo puun kuiva-aineessa on suunnilleen 18,5–20 MJ/kg. Tämä toteutuu eri puulajeilla, riippumatta siitä mitä puun osaa tai osia polttoaineen valmistukseen on käytetty. Merkittävimmät erot eri hakkeiden raaka-aineissa tulevat esiin tehollisessa lämpöarvossa saapumistilassa, sillä siinä korostuvat raaka-aineiden erilaiset kosteuspiitoisuudet. Se, kuinka tarkkoja vaatimuksia polttoaineen laadulle on, riippuu paljon lämpölaitoksen koosta. (Putula, Hilli 2017.)

7.2 Metsähakkeen käyttö nyt ja tulevaisuuden kehitys

Metsähakkeen hyödyntäminen lämpö- ja voimalaitoksissa kasvoi vuonna 2023 11 miljoonaan kuutiometriin. Vuosina 2012–2023 metsähaketta on käytetty lämpö- ja voimalaitoksissa vuodessa keskimäärin 8–9 miljoonaa kuutiometriä. (Puupolttoaineet energiantuotannossa 2024.) Lämmöntuotannossa siirtyminen pois fossiilisista polttoaineista ja turpeesta tulee vaikuttamaan lähitulevaisuudessa metsähakkeen tarpeeseen. Merkittävä osa fossiilisilla polttoaineilla ja turpeella tuotetusta lämmöstä tullaan korvaamaan metsähakkeella ja muilla biomassajakeilla. (Metsähakkeen kysynnän kehitys ja riittävyys Suomessa 2021, 1.) Alla olevasta kuviosta voidaan nähdä, miten metsähakkeen ja -murskeen hinta on kehittynyt viimeisten vuosien aikana (12gb -- Kotimaisten polttoaineiden käyttäjähinnat energiantuotannossa (ei sis. alv), 1999Q3-2024Q3. n.d).



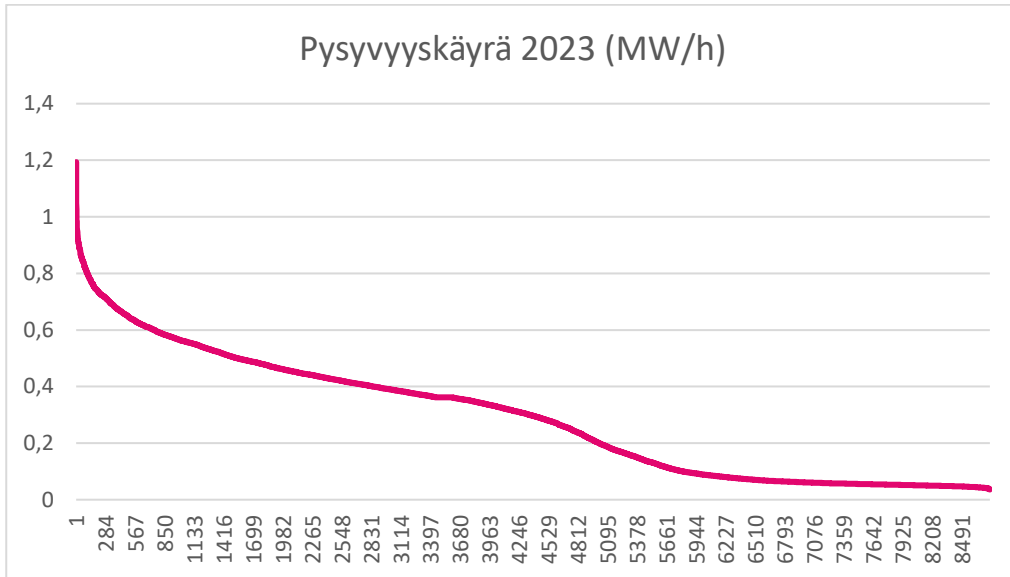
Kuvio 2. Metsähakkeen ja -murskeen hintoja 2022-2024

Afryn tekemässä raportissa työ- ja elinkeinoministeriölle ja huoltovarmuuskeskukselle tarkastellaan kahta mahdollista tulevaisuuden skenaariota ja niiden vaikutusta metsähakkeen hinnankehitykseen sekä riittävyyteen. Perusskenaariossa oletetaan, että polttoon perustumattomat lämmöntuotantomuodot, kuten lämpöpumppuratkaisut ja hukkalämmön hyödyntäminen yleistyvät kaukolämmöntuotannossa. Maksimiskenaariossa nämä eivät yleisty yhtä laajasti. Raportin selvitksen perusteella nykytasosta vuoteen 2030 mennessä eteläisellä ja läntisellä alueella metsähakkeen keskihinta nousee perusskenaariossa 10–15 % ja maksimiskenaariossa 15–20 %. Hintojen nousuun vaikuttaa kiristynvä kilpailutilanne sekä kotimaan hankinnassa pitenevät kuljetusmatkat. (Metsähakkeen kysynnän kehitys ja riittävyys Suomessa 2021, 40.) Biomassan hyödyntämisellä

kaukolämmöntuotannossa tulee olemaan tärkeä rooli sen tarjoaman jouston myötä. Etenkin hetkinä, jolloin sähkön ja lämmön tarve on suurta, biomassan polttamisella voidaan kohtuullistaa lämmöntuotantokustannuksia ja turvata koko energiajärjestelmän toimitusvarmuus. (Muilu, Patronen, Armila, Lehtoranta & Rautalin 2024, 17.) Biomassan hyödyntämistä lämmityskäytössä ei tällä hetkellä veroteta Suomessa. Euroopan komissio julkaisi vuonna 2021 energiaverodirektiivin muutosehdotuksen, joka on osana 55-valmiuspakettia. Muutosehdotuksessa myös kiinteät puupolttoaineet siirtyisivät verotuksen piiriin. Ehdotuksena oli minimivero 1,62 €/MWh sekä nykyistä lämmityspolttoaineiden energiasisältöveroa vastaava 10,33 €/MWh. Ehdotuksen mukaan yhdenmukaistetun verotuksen piiristä kuitenkin rajautuisivat alle 5 MW laitokset. (Muilu ym. 2024, 15, 38.)

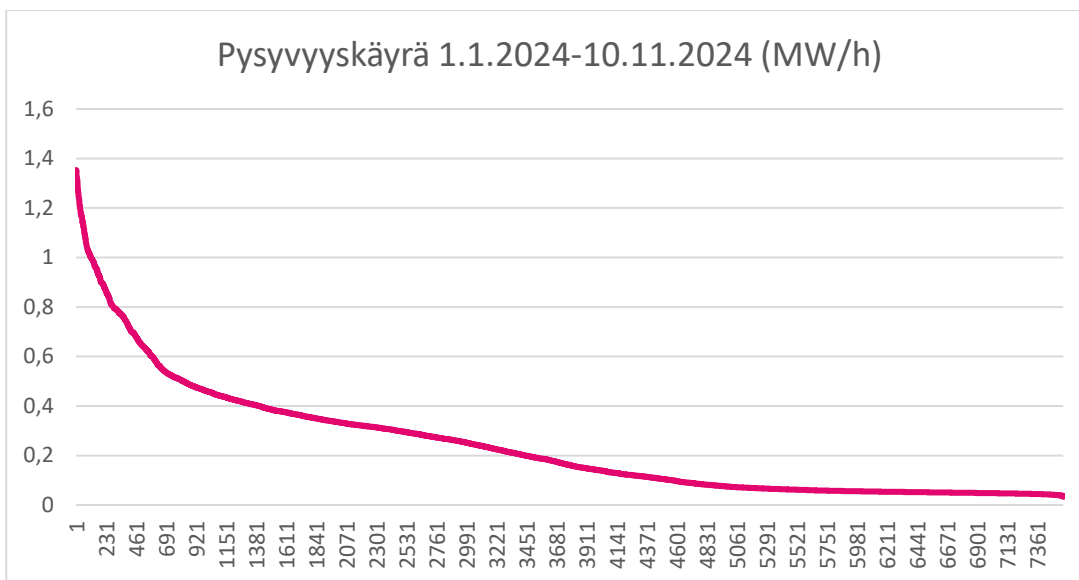
8 Tarkasteltavan kaukolämpöverkon nykytilanne

Tällä hetkellä verkoston peruskuorma tuotetaan 0,99 MW tehoisella kiinteän polttoaineen lämpökattilalla. Kattila on otettu käyttöön vuonna 2007. Viimeisten tarkastusten perusteella kattila on hyvässä kunnossa ja sillä oletetaan olevan vielä käyttöikä. Polttoaineena kattilassa käytetään metsähaketta, joka on pääasiallisesti kokopuuhaketta. Myös puupellettejä voidaan hyödyntää polttoaineena, mikäli metsähake on liian kosteaa. Vara- ja huippukuorma tuotetaan 1,5 MW tehoisella öljykattilalla, jossa käytetään kevyttä polttoöljyä. Verkoston tehontarve pystytään tällä hetkellä kattamaan hyvin käytössä olevalla kiinteän polttoaineen kattilalla. Alla olevista kuvioista nähdään vuoden 2023 ja 2024 pysyvyyskäyrät.



Kuvio 3. Kaukolämpöverkon pysyvyyskäyrä 2023

Vuoden 2023 pysyvyyskäyrää tarkastellessa huomataan, että yli 1 MW tehontarve on hyvin vähäistä. Suurin tuntiteho on ollut 1,19 MW ja yli 1 MW tehon tarpeen ylittäviä tunteja on ollut vain neljä.



Kuvio 4. Kaukolämpöverkon pysyvyyskäyrä 1.1.2024-10.11.2024

Vuoden 2024 pysyvyyskäyrästä voidaan nähdä erityisen kylmän alkuvuoden vaikutus, jolloin tehontarve oli huipussaan. Korkein mitattu tuntiteho oli 1,35 MW ja yli 1 MW tuntitehoja mitattiin

114, joista suurin osa sijoittuu tammikuuhun. Kuitenkin huippuvoimana käytettävää öljykattilaa ei ole tarvinnut hyödyntää näin paljon, vaan sen käyttö on ollut hetkittäistä. Yksi mahdollistava tekijä tälle on se, että kiinteän polttoaineen kattilaa voidaan hetkittäin ajaa hieman yli 1 MW teholla.

Lämpökeskus on toimeksiantajan omistuksessa. Mahdolliseen tehontarpeen kasvamiseen on varauduttu jo lämpökeskuksen rakennusvaiheessa ja lämpökeskukseen rakennettiin tilat ja perustukset kattamaan toinen 0,99 MW kiinteän polttoaineen kattila. Lämpökeskuksen käynnissäpidosta ja polttoaineen hankinnasta vastaa toinen yritys, jolta palvelu on ostettu. Kustannusten osalta merkittävin tekijä on metsähakkeen hinta. Metsähakkeen lisäksi vara- ja huippukuorman tuottamiseen käytettävän kevyen polttoöljyn hinta on sidottu indekseihin ja vaikuttaa lämmön tuotantokustannuksiin. Tuotantokustannuksiin ja lämpölaitoksen hallintaan vaikuttaa merkittävästi lämpökattilan mitoitusteho. Alle 1 MW kattiloiden etuna on se, että niitä voidaan ajaa miehittämättömänä

Alue

Tarkasteltavan kaukolämpöverkon alueella sijaitsee pääasiassa teollisuus- ja liikerakennuksia. Alueen kehittymistä työpaikkakeskukseksi on tavoiteltu jo aiemmin. Vuonna 2006 hyväksyttiin alueen ensimmäinen asemakaava. Tällöin alueelle kaavoitettiin pääasiassa myymälätilaa erikoiskaupalle, joka veisi paljon tilaa, sekä toimitiloja teollisuudelle, joka ei aiheuta ympäristöhäiriötä. Alueen kehitys ei ole kuitenkaan vastannut tämän aikaisiin tavoitteisiin.

9 Määritelty lisätehontarve

Tarkasteltavan alueen kehityssuunnitelmia ja kaavoitusta tarkastellessa huomataan, että aluetta on tarkoitus kehittää pääasiassa työpaikka-alueeksi. Sijaintinsa perusteella tarkasteltava alue nähdään potentiaalisena etenkin logistiikka- ja huolinta-alan yrityksille. Alueen kehittämisen pitkän aikavälin tavoitteena nähdään, että alueelle syntyisi uusia yrityksiä vähintään 25 ja uusia työpaikkoja 70–80.

Taustaoletuksena on, että nykyisen tehontarpeen päälle tuleva tehontarve olisi suurin piirtein jostain seuraavista luokista: 0,25 MW, 0,5 MW ja 1 MW. Laskennan tarkoituksena on kartoittaa kar-

keasti mikä näistä olisi todennäköisin. Käytettävänä on tässä vaiheessa asemakaava, jossa on määritetty ainoastaan tonttien sallittu rakennettava kerrosala, sekä suuntaa antavia rajoituksia sille, minkä tyyppisiä rakennuksia kuhunkin kortteliin sijoittuisi.

Tällä hetkellä kaukolämpöverkkoon kuuluvien rakennusten pinta-alan arvioidaan olevan 20 000 m². Arvio on tehty yritysten nettisivuilta löytyvien tietojen sekä alueen karttakuvien perusteella. Rakennukset ovat liike- ja teollisuusrakennuksia. Asemakaavan ja alueen maankäyttöpäällikön kanssa käydyn keskustelun pohjalta laskettiin alueelle mahdollisten rakennusten ominaislämpöteho.

Taulukko 5. Mahdollisten rakennusten tilaustehon määrittely

| Rakennustyyppi | Rakennusneliöt (m ²) | Huonekorkeus (m) | Ominaislämpöteho W/m ³ | Lämmityksen tehontarve kW | Käyttöveden tuntienergian tehontarve |
|--------------------|----------------------------------|------------------|-----------------------------------|---------------------------|--------------------------------------|
| Teollisuusrakennus | 4000 | 4 | 16,35 | 261,6 | 31–90 |
| Teollisuusrakennus | 2500 | 4 | 16,35 | 163,5 | 31–90 |
| Teollisuusrakennus | 750 | 4 | 16,35 | 49,05 | 31–90 |
| Teollisuusrakennus | 450 | 4 | 16,35 | 29,43 | 31–90 |
| Liikerakennus | 400 | 3 | 21,8 | 26,16 | 5–30 |
| Liikerakennus | 200 | 3 | 21,8 | 13,08 | 5–30 |
| Yhteensä | 8300 | | | 542,82 | 134–420 |

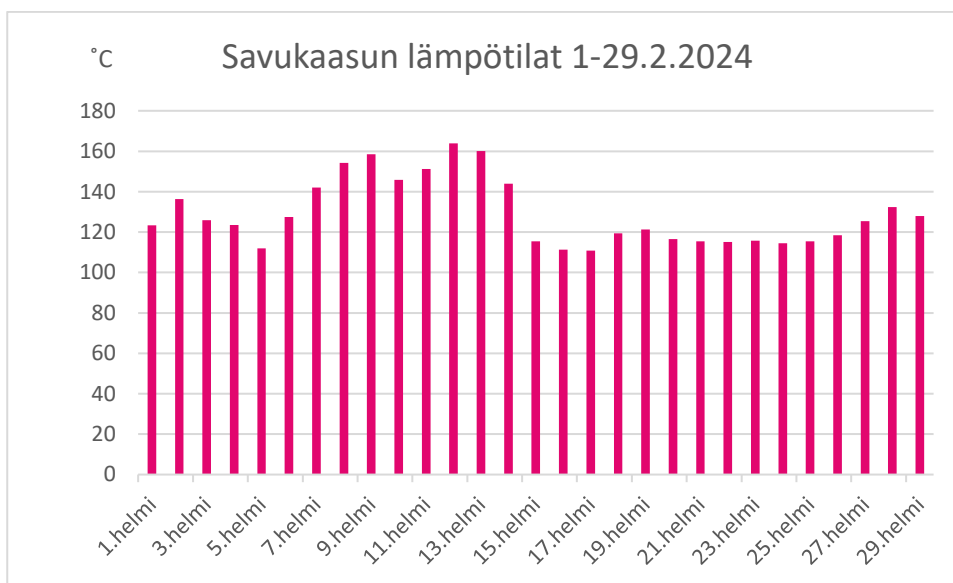
Taulukossa 3 esitettyjen kokoluokkien voidaan olettaa olevan realistisia alueen asemakaavaan ja suunnitteilla oleviin tontteihin nähden. Kun vertaillaan yllä olevan taulukon rakennustyyppisiä ja

kokoluokkia tämänhetkisiin kaukolämpöverkkoon kuuluviin rakennuksiin, voidaan arvioida, että tarvittava tehontarpeen lisäys nykyiseen peruskuorman tuotantoon olisi 0,5 MW.

10 Lämpöpumpun ja hukkalämpöjen hyödyntäminen kohteessa

Tarkasteltavassa kohteessa nykyinen kiinteän polttoaineen kattila tarjoaa lämpövirtoja lämpöpumpun hyödynnettäväksi. Tämä mahdollistaa korkeamman ja tasaisemman lämpötilatason kuin ulkoilman hyödyntäminen.

Mahdollisuutena on hyödyntää kattilan savukaasuista syntyvää hukkalämpöä. Alla olevasta taulukosta nähdään mitä tasoa savukaasun lämpötilat ovat olleet kuukauden aikana. Tarkastelujaksolla kattilan tehot ovat olleet välillä 0,198–1,165 MW.

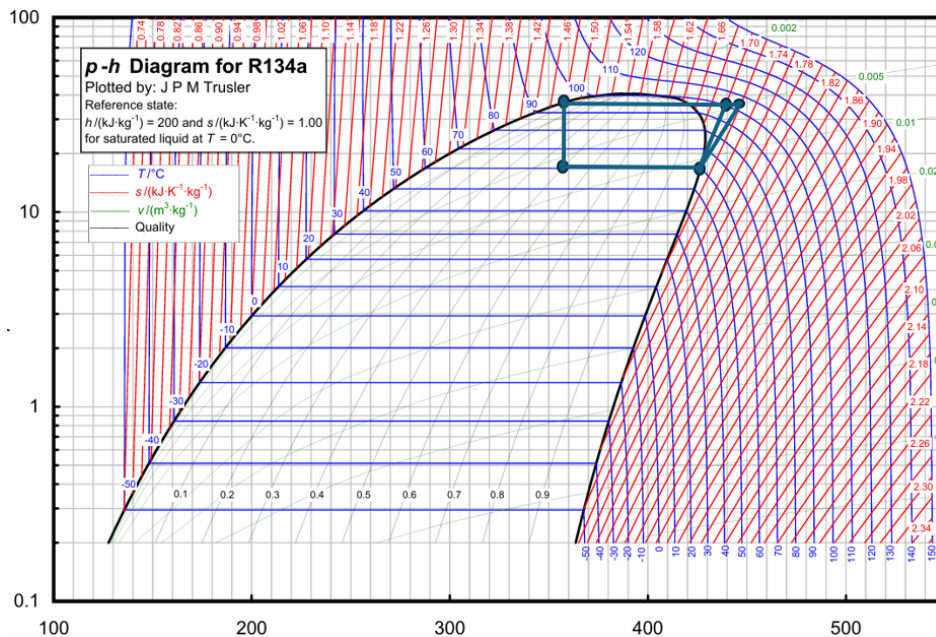


Kuvio 5. Savukaasujen lämpötilat 1.2-29.2.2024

Kun tarkastellaan savukaasujen hukkalämmön hyödyntämistä lämpöpumpun lämmönlähteen, oletetaan, että lämpö kerätään savukaasupesurin lauhdevedestä. Kun arvioidaan, että käytettävä polttoaine on kosteuspitoisuudeltaan noin 50 %, ja metsähakkeen kuiva-aine osuus vastaa metsähakkeen keskimääräistä jakaumaa, voidaan savukaasujen vesihöyrypitoisuuden olettaa olevan noin 30 %. Kun hyödynnetään kappaleessa 5.2.1 esitettyä kaavaa 2, saadaan savukaasujen kaste-

piste lämpötilaksi 72,23 °C. Savukaasupesurilta saatavaan energiamäärään vaikuttaa myös savukaasun määrä ja sen virtausnopeus. On mahdollista, että kattilan ajaminen pienellä kuormalla voi vaikuttaa savukaasupesurin hyödyntämiseen lämpöpumpun lämmönlähteenä.

Seuraavaksi tarkastellaan lämpötilatasojen vaikutusta lämpöpumpun lämpökertoimeen.



Kuvio 6. Kylmäaineen R134a Log p-h kaavio 60-95 astetta

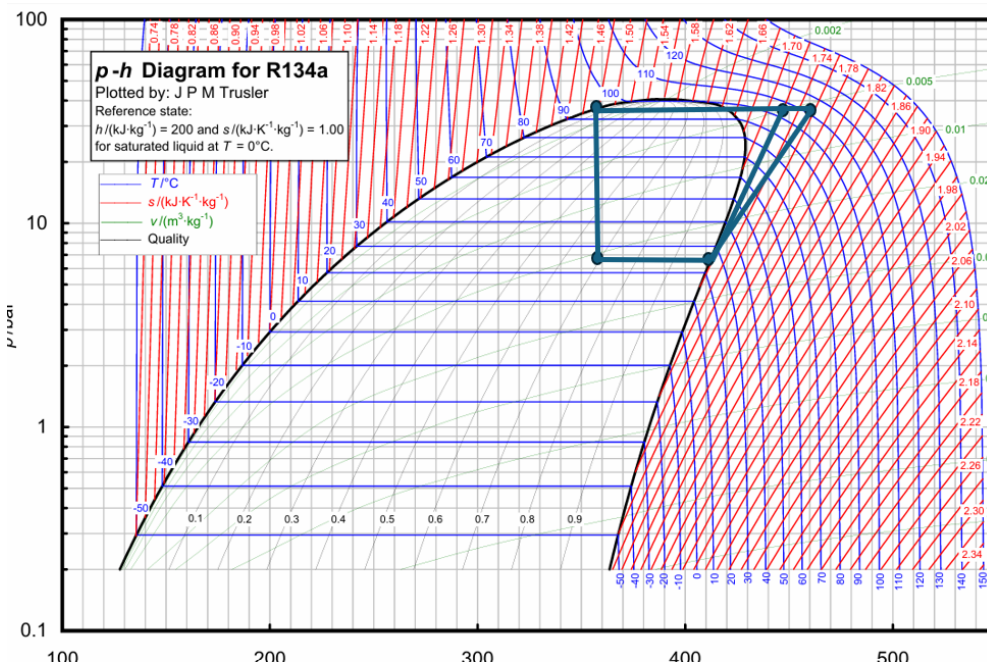
Tarkastelu on tehty kylmäaineella R134A, joka on hyvin yleinen lämpöpumpuissa käytetty kylmäaine. Kylmäaineen Log p-h kuvasta voidaan etsiä entalpiatasot, jotka vastaavat määritettyjä lämpötiloja lämpöpumpun eri prosessivaiheissa. Höyrystyslämpötilaksi on määritetty 60 °C, joka on 10 °C lämmönlähdettä matalampi. Lauhtumislämpötilaksi on määritetty 95 °C. Kompressorin isentrooppiseksi hyötysuhteeksi oletetaan 75 %.

Kuvasta saadaan määritettyä seuraavat entalpiat: $H_1=426$ kJ/kg, $H_{2s}=440$ kJ/kg, $H_4=358$ kJ/kg ja $H_5=358$ kJ/kg. H_2 entalpiaksi saadaan 445 kJ/kg seuraavan kaavan mukaisesti.

$$H_2 = \frac{H_{2s} - H_1}{\eta_{\text{kompressorin isentrooppinen hyötysuhde}}} + H_1 \quad (3)$$

Kylmäaineen p-h kuvasta saatujen entalpia-arvojen perusteella saadaan kappaleessa 5 esitetyn kaavan 1 mukaisesti laskettuna lämpöpumpun COP-arvoksi 4,58.

Toisena mahdollisuutena on hyödyntää kattilan lämpökeskukseen synnyttämää lämpöä. Tässä tapauksessa lämpöpumppu keräisi syntyvän hukkalämmön suoraan ilmasta. Hyödynnettävän lämmön lämpötilatasoksi arvioidaan noin 35 °C. Arvio perustuu lämpölaitoksella vierailulla tehtyihin havaintoihin. Lämpötilatasoon todetaan kuitenkin vaikuttavan kattilan ajoteho, ulkolämpötila sekä se mistä kohtaa ja korkeudelta lämpölaitosta lämmön kerääminen toteutetaan. Tämän lämpötilatason vaikutusta lämpöpumpun lämpökertoimeen tarkastellaan samalla periaatteella kuin savukaasujen kohdalla, ainoana erona on lämpötilaväli, joka on 25–95 °C.



Kuvio 7. Kylmäaineen R134a Log p-h kaavio 25-95 astetta

Kuvasta saadaan entalpia-arvoiksi $H_1 = 412$ kJ/kg, $H_2 = 448$ kJ/kg, $H_4 = 368$ kJ/kg, $H_5 = 368$ kJ/kg ja kaavalla 3 saadaan $H_2 = 460$ kJ/kg. Näiden entalpia-arvojen perusteella saadaan lämpöpumpun lämpökertoimeksi 1,9.

Lämpötilavälin yläraja 95 °C ei riittäisi tällä hetkellä tuottamaan kylmillä keleillä tarvittavia kaukolämpöveden menolämpötiloja. Tarkasteltavassa kohteessa nähdään kuitenkin olevan hyvät edellytykset siirtyä matalampaan lämpötilatasoon jo lähivuosina, jolloin tarkasteltu lämpötilataso vastaa paremmin vaatimuksia.

11 Investoinnin kannattavuuden tarkastelu

Investoinnin kannattavuuden tarkastelemiseksi määritetään jokaiselle tuotantomuodolle korollinen takaisinmaksuaika.

$$a_{n/i} = \frac{(1+i)^n - 1}{i \times (1+i)^n} \quad (4)$$

Missä $a_{n/i}$ = nykyarvotekijä

i = laskentakorko %

n = korollinen takaisinmaksuaika

Kun nettotulot oletetaan yhtä suuriksi joka vuonna, voidaan $a_{n/i}$ laskea seuraavalla kaavalla

$$a_{n/i} = \frac{\text{Investointi}}{\text{nettotulot}} \quad (5)$$

Missä Nettotulot = Kaukolämmön myyntituotot – tuotantokustannukset – huolto- ja kunnossapitokustannukset

Huolto- ja kunnossapitokustannusten osuus on määritetty kokemusperäisten kertoimien avulla. Kaikilla työssä tarkastelluilla tuotantomuodoilla huolto- ja kunnossapitokustannusten on laskettu olevan 3 % kokonaisinvestoinnista. (Huhtala. 2024, 38.) Kaikkien tarkasteltujen tuotantomuotojen vuotuinen tuotantomäärä on määritetty käyttämällä pienelle kaukolämpöverkolle tyypillistä huipunkäyttöaika 2500 h. Huipunkäyttöaika kertoo kuinka monta tuntia kestäisi tuottaa vuotuinen energiantarve ajamalla tuotantolaitosta sen täydellä teholla. (Mäkelä & Tuunanen 2015, 32.) Kaukolämmön myyntituottona on käytetty tarkasteltavan alueen tämänhetkistä kaukolämmön verotonta myyntihintaa. Korkokantana on käytetty toimeksiantajan suosittelemaa 4,5 %.

11.1 Sähkökattila

Sähkökattilan investointi- ja käyttökustannuksiin vaikuttaa se, toteutetaanko sähkökattilan liittämisen järjestelmään pienjännite- vai keskijännitetoteutuksena. Pienjännitetoteutuksessa sähkö siirretään 0,4 kV jännitteellä, mikä voidaan suoraan syöttää sähkökattilaan. Keskijännitetoteutuksessa sähkö siirretään 20 kV jännitteellä. Investointikustannusten osalta eroina pienjännite- ja keskijänniteliittymässä ovat liittymismaksut sekä keskijänniteliittymän vaatimat lisäinvestoinnit. Käyttökustannuksiin vaikuttaa se, että sähkönsiirtomaksut eroavat 0,4 kV ja 20 kV jännitteillä.

Pienjänniteliittymän investointikustannus syntyy liittymismaksusta. Alueella toimivan sähköverkko-yhtiön hinnasto määrittelee asemakaava-alueelle sijaitsevien yli 3 x 100 A liittymien arvonlisäverolliseksi liittymismaksuksi 80,7 €/A. Vaadittava sähkövirta eli A voidaan määrittää kertomalla sähkökattilan teho 1,5. Tästä saadaan tulokseksi 750 A, jolloin liittymismaksuksi muodostuu 60 525 €. Kun tästä poistetaan arvonlisävero 25,5 % saadaan hinnaksi 48 227 €.

Keskijänniteliittymissä liittymismaksu määritetään kapasiteettivarausmaksulla, jonka veroton hinta on 37,9 €/kVA. Mikäli oletetaan, että kilovolttiampeerit, joilla mitataan sähköjärjestelmän kokonaistehoa, vastaavat suoraan sähkökattilan tehoa, saadaan hinnaksi 18 950 €. Koska keskijännitetoteutuksessa sähkö siirretään 20 kV jännitteellä, edellyttää se sitä, että käyttöpaikalla on oltava oma muuntamo. Keskijännitetoteutuksesta aiheutuvan muuntamoinvestoinnin kustannuksia voidaan arvioida Energiaviraston määrittelemillä verkkokomponenttien yksikköhintoilla (Valvontamenetelmät kuudennella 1.1.2024 – 31.12.2027 ja seitsemännellä 1.1.2028 – 31.12.2031 valvontajaksolla n.d. 117, 119). Keskijännitetoteutusta varten taulukosta valitaan kevyt, ulkoa hoidettava 20 kV/0,4 kV puistomuuntamo ja sähkökattilan tehoa hieman korkeampi 630 kVA muuntaja. Taulukosta saadaan puistomuuntamon hinnaksi 13 600 € ja muuntajan hinnaksi 13 000 €, eli yhteishinta investoinnille olisi 26 600 €.

Kokonaisinvestoinniksi pienjänniteliittymälle saadaan 48 227 € ja keskijänniteliittymälle 45 550 €. Kun huomioidaan se, että muuntamoinvestoinnissa on käytetty vain verkkokomponenttien yksikköhintoja, voidaan olettaa, että muuntamon vaatima investointi on todellisuudessa suurempi. Tästä huolimatta nähdään, että sähköverkkoon liittymiskustannuksissa ei ole merkittävää eroa.

Kummankin ratkaisun osalta käyttökustannuksia voidaan tarkastella kuviossa 10 esitetyillä hinnoilla (Verkkopalveluhinnasto. n.d).

Tehosiirto 2

| Siirtomaksu (€/MWh) | Talviarkipäivä 1.11.-31.3. | | Perusmaksu (€/kk) | 75,78 |
|---|-------------------------------|--------------|---------------------------|-------|
| | ma-la klo 07-22 | Muu aika | | |
| Siirto | 42,57 | 20,20 | Tehomaksu (€/kW, kk) | 4,05 |
| Sähkövero, veroluokka 1 | 22,53 | 22,53 | Loistehomaksu (€/kVA, kk) | 7,21 |
| Sähkövero, veroluokka 2 | 0,63 | 0,63 | | |
| Sähköverollinen siirto, veroluokka 1 | 65,10 | 42,73 | | |
| Sähköverollinen siirto, veroluokka 2 | 43,20 | 20,83 | | |

Tehosiirto 3 (20 kV toimitus)

| Siirtomaksu (€/MWh) | Talviarkipäivä 1.11.-31.3. | | Perusmaksu (€/kk) | 361,59 |
|---|-------------------------------|--------------|---------------------------|--------|
| | ma-la klo 07-22 | Muu aika | | |
| Siirto | 32,17 | 15,81 | Tehomaksu (€/kW, kk) | 2,79 |
| Sähkövero, veroluokka 1 | 22,53 | 22,53 | Loistehomaksu (€/kVA, kk) | 6,14 |
| Sähkövero, veroluokka 2 | 0,63 | 0,63 | | |
| Sähköverollinen siirto, veroluokka 1 | 54,70 | 38,34 | | |
| Sähköverollinen siirto, veroluokka 2 | 32,80 | 16,44 | | |

Kuvio 8. Sähköverkkoyhtiön hinnasto

Pienjänniteliittymässä sähkönsiirtokustannukset muodostuvat Tehosiirto 2 -tuotteen hintojen mukaisesti ja keskijänniteliittymässä Tehosiirto 3 -tuotteen mukaisesti. Kaikki kuviossa 10 esitetyt hinnat ovat alv 0 %. Sähköön perustuvia tuotantomuotoja käsittelevässä kappaleessa 6 käsiteltävän lakimuutoksen mukaisesti, voidaan sähkönsiirtomaksuja tarkastella alemman veroluokan hinnoilla. Koska sähkökattilaratkaisun tarkasteluun ei ole otettu mukaan lämpövarastoa, tuotantoa ei voida yhtä tehokkaasti ajoittaa muun ajan edullisempiin siirtohintoihin. Sähkönsiirron hinta määritellään tässä tapauksessa hyödyntämällä yleistä kausitariffin kulutusjakaumaa, jossa kulutuksesta 31 % ajoittuu talvipäivään ja loput 69 % muuhun aikaan. Tehomaksu määrittyy kummallakin tuotteella viimeisen 12 kk suurimpien kuukausitehojen perusteella. Tehosiirto 3 erona on kuitenkin se, että kesäkuukausina suurimmasta kuukausitehosta huomioidaan vain 80 %. Laskennassa oletetaan, että suurin kuukausiteho on 500 kW, eli kattilan nimellistehon verran. Loistehoa ei huomioida tarkastelussa, sillä sähkökattilan synnyttämän loistehon määrää ja siitä aiheutuvia kuukausittaisia kustannuksia on vaikea määrittää. Alla olevassa taulukossa nähdään miten pienjännite- ja keskijänniteratkaisujen tuotantokustannukset vertautuvat.

Taulukko 6. Pien- ja keskijännitetoteutuksen sähkönsiirto kustannukset

| | Tehosiirto 2 (pienjännitetoteutus) | Tehosiirto 3 (keskijännitetoteutus) |
|----------------------|---|--|
| Sähkön-siirto | 27,76 €/MWh | 21,51 €/MWh |
| Perus-maksu | 75,78 €/kk | 361,59 €/kk |
| Tehomaksu | 2025 €/kk | 1395/1116 €/kk |

Taulukosta nähdään, että keskijännitetoteutus on tuotantokustannusten osalta kannattavampi ratkaisu. Vaikka keskijännitetoteutus osoittautuisi arvioitua kalliimmaksi alkuinvestoinniksi, nähdään että pienempien tuotantokustannusten myötä se on pitkällä tähtäimellä kannattavin ratkaisu. Tästä syystä investointilaskelmassa on käytetty keskijännitetoteutukseen perustuvia hintoja.

Itse sähkökattila investoinnille saatiin suunnittelijalta hinta-arvioksi 250 000 €/MW. Tämä hinta-arvio on arvonlisäveroton ja pitää sisällään rakennuksen, putkitukset, automaation sekä perustukset. Oheiskustannukset kuitenkin pienenevät tässä tilanteessa, sillä nykyisessä lämpölaitoksessa oletetaan olevan tilat sähkökattilaa varten. Suunnittelijalta saatujen tietojen perusteella voidaan arvioida, että itse kattilan osuus hinta-arviosta olisi noin 50 000 €. Oheiskustannusten jakautumisesta on kuitenkin hyvin vaikea arvioida, kuinka iso osuus valmiilla tiloilla on. Investoinnin kustannuksena päädyttiin pitämään 200 000 €/MW, joka 0,5 MW kattilan tapauksessa puolittuu 100 000 €.

Alla olevassa taulukossa 4 on esitetty kootusti lukuja, joita voidaan hyödyntää sähkökattilainvestoinnin takaisinmaksuajan laskennassa. Kokonaisinvestointi koostuu sähkökattilalle saadusta hinta-arviosta (100 000 €), sekä keskijänniteliittymästä muodostuvista kustannuksista (45 550 €). Sähkön ostohinta on määritetty laskemalla yhteen arvioidut kustannukset sähkönsiirrosta ja sähkön ostohinnasta. Sähkönsiirtohintana on käytetty ylempänä laskettua keskijänniteliittymän talviarvipäivän ja muun ajan painotettua keskiarvoa 21,51 €/MWh. Ostettavan sähkön osalta on käytetty kuviossa 3 esitettyjen vuosien 2025 ja 2026 futuurihintojen keskiarvoa 47,53 €/MWh. Sähkönsiirron vuotuiset perus- ja tehomaksut on määritetty taulukon 6 pohjalta. Tehomaksu on

laskettu siten, että tehomaksun oletetaan olevan kolmen kesäkuukauden ajan 1116 €/kk ja muina kuukausina 1395 €/kk. Sähkökattiloilla on todella hyvä hyötysuhde ja häviöt ovat yleisesti vain noin 1 % luokkaa. Tästä syystä laskennassa oletetaan kattilan sähkönkulutuksen olevan sama kuin sen vuotuinen tuotto. Nettotulot on laskettu kaavan 5 avulla.

Taulukko 7. Sähkökattila investointi

| | | |
|--------------------------|----------|-------|
| Kokonaisinvestointi | 145550 | € |
| Lämpöteho | 500 | kW |
| Ominaisinvestointi | 291,1 | €/kW |
| Huolto- ja kunnossapito | 4366,5 | €/a |
| Sähkökattilan tuotanto | 1250 | MWh/a |
| Kaukolämmön myyntituotto | 71,30 | €/MWh |
| Sähkön ostohinta | 69,04 | €/MWh |
| Sähkönsiirron tehomaksu | 15903 | €/a |
| Sähkönsiirron perusmaksu | 4339 | €/a |
| Korkokanta | 4,5 | % |
| Pitoaika | 20 | a |
| Nettotulot | -21783,5 | €/a |

Nettotuloja tarkastellessa huomataan heti, että sähkökattilainvestointi ei ole kannattava tarkastelluilla hinnoilla. Ehtoina investoinnin kannattavuudelle ovat kaukolämmön myyntihinnan nostaminen tai sähkönsiirto ja -ostokustannusten madaltuminen. Jotta investoinnin takaisinmaksuaika jäisi alle arvioidun pitoajan, tulisi sähkön ostohinnan laskea alle 42,5 €/MWh tai kaukolämmön myyntituottojen nousta 98 €/MWh. Tarkastelusta huomataan, että korkea tehomaksu nostaa tuotantokustannuksia merkittävästi. Vaikka oletettaisiin, että sähköpörssin keskihinta laskisi tulevina vuosina, voidaan nähdä, että vaadittavan hintatason saavuttamiseksi tuotantoa pitäisi pystyä ohjaamaan tehokkaasti hetkiin, jolloin sähköpörssin Spot-hinta on alhainen ja sähkönsiirtomaksut ovat pienemmät. Tämä edellyttäisi lisäinvestointia lämpöakkuun.

Sähkökattilainvestoinnin kannattavuuden nähdään parantuvan merkittävästi, mikäli sähkökattilalla voidaan osallistua sähkön reservimarkkinoille. Eri reservituotteille on kuitenkin asetettu minimite-

hovaatimuksia. Tarkastellulla 0,5 MW tehoisella sähkökattilalla ei voida tällä hetkellä osallistua esimerkiksi säätösähkö- ja säätökapasiteettimarkkinoille, sillä minimitarjouskokona säätötarjoukselle on 1 MW.

11.2 Lämpöpumppuratkaisu

Myös lämpöpumppuratkaisun osalta tulee tarkastella sitä, kannattaako sähköliittymä toteuttaa pienjännite- vai keskijännitetoteutuksella. Koska investointikustannukset ovat kummassakin hyvin samaa luokkaa, keskitytään siihen, miten tuotantokustannukset eroavat toisistaan. Lämpöpumpun toimintaperiaate mahdollistaa huomattavasti pienemmän sähkönkulutuksen verrattuna sähkökattilaan. Tämä mahdollistaa myös sen, että suurimmat kuukausitehot jäävät pienemmiksi kuin sähkökattilassa, jolloin myös tehomaksut ovat pienemmät. Tehomaksujen määrittäminen lämpöpumpun osalta on haastavampaa kuin sähkökattilan osalta, sillä vaadittu tehontarve riippuu lämpöpumpun COP-arvosta. Pienemmästä sähkönkulutuksesta huolimatta nähdään, että keskijännitetoteutuksella saatavat edullisemmat sähkönsiirtomaksut ja tehomaksut tekevät siitä kannattavamman vaihtoehdon myös lämpöpumppujen osalta.

Lämpöpumppuinvestoinnille saatiin suunnittelijalta hinta-arvioksi 1,2 milj. €/MW, mikäli hyvää lämmönlähdettä ei ole saatavissa. Hinta-arvio on arvonlisäveroton ja se pitää sisällään perustukset, rakennuksen, putkitukset sekä automaation. Suunnittelijalta saadun arvion perusteella kustannukset voivat kuitenkin pudota noin 40 %, mikäli lämpöpumpulle löytyy jo valmiiksi sijoitustila ja järkevä lämmönlähde. Tällöin investoinnille saataisiin hinnaksi 720 000 €/MWh.

Ensiksi tarkastellaan vaihtoehtoa, jossa lämmönlähteenä käytetään hakekattilan synnyttämää tuntuvaa lämpöä. Takaisinmaksuajan laskennassa käytettävät luvut on koottu taulukkoon 5. Kokonaisinvestointi muodostuu lämpöpumppuinvestoinnista, joka 0,5 MW nimellistehon tapauksessa on 360 000 € ja keskijänniteliittymän liittymiskustannuksista, jotka ovat 45 550 €. Lämpöpumpun COP-arvo on määritetty kappaleessa 10 tehtyjen laskelmien pohjalta. Sähkönkulutus on laskettu jakamalla lämpöpumpun tuotanto COP-arvolla 2. Sähkön ostohinta ja nettotulot on määritelty samalla periaatteella kuin sähkökattilainvestoinnissa. Mikäli lämpöpumppua pystyttäisiin ajamaan koko ajan vähintään 2 lämpökertoimella, jäisi suurin kuukausiteho noin 250 kW tasolle. Tämän

pohjalta voidaan määritellä vuotuinen tehomaksu samalla periaatteella kuin ylempänä, jolloin tehomaksussa huomioidaan kolmena kesäkuukautena vain 80 % korkeimmasta kuukausitehosta

Taulukko 8. Lämpöpumppu investointi

| | | |
|--------------------------|----------|-------|
| Kokonaisinvestointi | 405 550 | € |
| Lämpöpumpun nimellisteho | 500 | kW |
| Ominaisinvestointi | 811,1 | €/kW |
| Lämpöpumpun COP | 2 | |
| Huolto- ja kunnossapito | 12166,5 | €/a |
| Lämpöpumpun tuotanto | 1250 | MWh/a |
| Sähkönkulutus | 625 | MWh/a |
| Kaukolämmön myyntituotto | 71,3 | €/MWh |
| Sähkön ostohinta | 69,04 | €/MWh |
| Sähkönsiirron perusmaksu | 4339 | €/a |
| Sähkönsiirron tehomaksu | 7951 | €/a |
| Pitoaika | 20 | a |
| Nettotulot | 21517,92 | €/a |

Näillä lähtöarvoilla saadaan kaavan 5 avulla nettohyötyarvoksi 18,85 vuotta ja kaavan 4 avulla takaisinmaksuajaksi 42,84 vuotta. Näiden perusteella nähdään, että näillä tarkastelu hinnoilla investointi ei ole kannattava, sillä se ylittää merkittävästi arvioidun pitoajan. Jotta takaisinmaksuaika jäisi alle pitoajan, vaatisi se kaukolämmön myyntihinnan nostamista 79,5 €/MWh tai sähkön ostohinnan putoamista alle 53,5 €/MWh.

Seuraavaksi tarkastellaan vaihtoehtoa, jossa lämpöpumpun lämmönlähteenä käytetään hakekattilan savukaasuista savukaasupesurilla kerättävää hukkalämpöä. Koska kohteessa ei ole valmiiksi savukaasupesuria, kysyttiin myös siihen suuntaa antavaa hinta-arviota savukaasupesuriratkaisuja tarjoavalta yritykseltä. Hinta-arvioksi savukaasupesurille matalalla märkäpiipulla saatiin 80 000 €. Savukaasupesurin osuus on takaisinmaksuajan laskennassa huomioitu ainoastaan kokonaisinvestoinnissa. Kokonaisinvestointi muodostuu samoista investointikustannuksista kuin aiempi vaihtoehto (405 550 €) sekä savukaasupesurin arvioidusta kustannuksesta. Sähkönkulutus on laskettu jakamalla lämpöpumpun tuotanto COP-arvolla 4,5. Mikäli lämpöpumppua pystyttäisiin ajamaan

koko ajan vähintään 4,5 lämpökertoimella, jäisi suurin kuukausiteho noin 120 kW tasolle. Tämän pohjalta voidaan määritellä vuotuinen tehomaksu samalla periaatteella kuin ylempänä.

Taulukko 9. Lämpöpumppu savukaasupesurilla -investointi

| | | |
|--------------------------|----------|-------|
| Kokonaisinvestointi | 485550 | € |
| Lämpöpumpun nimellisteho | 500 | kW |
| Ominaisinvestointi | 971,1 | €/kW |
| Lämpöpumpun COP | 4,5 | |
| Huolto- ja kunnossapito | 14566,5 | €/a |
| Lämpöpumpun tuotanto | 1250 | MWh/a |
| Sähkön kulutus | 278 | MWh/a |
| Kaukolämmön myyntituotto | 71,3 | €/MWh |
| Sähkön ostohinta | 69,04 | €/MWh |
| Sähkönsiirron tehomaksu | 3816,72 | €/a |
| Sähkönsiirron perusmaksu | 4339 | €/a |
| Pitoaika | 20 | a |
| Nettotulot | 47209,68 | €/a |

Näillä lähtöarvoilla saadaan kaavan 5 avulla nettonykyarvoksi 10,28 vuotta ja kaavan 4 avulla takaisinmaksuajaksi 14,11 vuotta. Tästä nähdään, että korkeasta alkuinvestoinnista huolimatta, lämpöpumpun korkean COP-arvon ansiosta pienemmät tuotantokustannukset tekevät tästä vaihtoehdosta mielekkään. Mikäli selvitettäisiin tarkemmin minkälainen savukaasupesuri kohteeseen, kannattaisi hankkia, saataisiin selville savukaasupesurin omakäytösähkön kustannukset ja arvioida sen huolto- ja kunnossapitokustannuksista. Nämä luonnollisesti tuovat lisäkuluja, jotka vaikuttavat takaisinmaksu-aikaan. Tarkastelussa huomataan sähkönsiirron tehomaksun merkittävä vaikutus investoinnin kannattavuuteen. Mikäli kuukausiteho nousisi lähelle lämpöpumpun nimellistehoa, nostaisi se investoinnin takaisinmaksuajan niin korkeaksi, että se ei ole kannattava.

Kummankin lämpöpumppuratkaisun suhteen voidaan investoinnin takaisinmaksu-aikaan todeta vaikuttavan sähkökustannusten lisäksi lämpöpumpun huipunkäyttöaika. Mikäli huipunkäyttöaika nousisi 3000 tuntiin ja täten vuotuinen tuotantomäärä 1500 MWh, laskisi se kummankin vaihtoehdon takaisinmaksu-aikaa. Korkeampi huipunkäyttöaika edellyttää luonnollisesti sitä, että kaukolämpöverkon tehontarve on riittävän suurta suhteessa mitoitettuun 0,5 MW lisätehoon. Kummankin

lämpöpumppuratkaisun osalta tulee huomioida myös muuttuvien lämpötilatasojen vaikutus COP-arvoon ja tämän myötä tuotantokustannuksiin.

11.3 Hakekattila

Kiinteän polttoaineen kattilan osalta tarkastellaan hakekattilaa, jossa voidaan hyödyntää samaa polttoainetta kuin nykyisessä 0,99 MW kattilassa. Hakekattila nähdään siinä mielessä selkeimpänä vaihtoehtona lisätehon kattamiseen, sillä se on ollut ajatuksena nykyisen lämpölaitoksen rakennusvaiheessa. Kiinteän polttoaineen kattilan etuna on se, että se pystyy vastaamaan kaukolämpöverkon vaatimiin menoveden lämpötiloihin. Kun huomioidaan myös huolto- ja toimitusvarmuuden näkökulma, nähdään että etenkin kriittisimpinä hetkinä metsähakkeen hyödyntäminen on varmempi vaihtoehto.

Hinta-arviota 0,5 MW hakekattilasta kysyttiin biolämpölaitoksia toimittavan yrityksen edustajalta. Investointikustannuksesi saatiin 170 000–200 000 €. Hinta on arvonlisäveroton ja pitää sisällään pitkälti kaiken tarvittavan laitteiston, automaation ja asennuksen. Hinnassa on huomioitu olemassa olevat perustukset ja se, että polttoaineelle ei tarvita erillistä varastoa. Takaisinmaksuajan laskennassa päädyttiin käyttämään kokonaiskustannuksena 200 000 €. Hakekattilan vuosihyötysuhteena on käytetty 85 %. Kattilan hyötysuhteeseen vaikuttaa paljon se, kuinka kosteaa polttoainetta käytetään ja joudutaanko kattilaa ajamaan pienellä osateholla (Kotimaista polttoainetta käyttävien 0,5...30 MW kattilalaitosten tekniset ratkaisut sekä palamisen hallinta 2012, 35–36). Hakkeen hintana on käytetty 35 €/MWh, jonka nähdään kuvion 4 perusteella vastaavan vuoden 2024 hintatasoa. Hakkeen vuosikustannukset on laskettu jakamalla kattilan vuosituotanto sen hyötysuhteella.

Taulukko 10. Hakekattila investointi

| | | |
|-------------------------------|--------|-------|
| Kokonaisinvestointi | 200000 | € |
| Kattilan teho | 500 | kW |
| Ominaisinvestointi | 400 | €/kW |
| Kattilan hyötysuhde | 85 | % |
| Huolto- ja kunnossapito | 6000 | €/a |
| Kattilan tuotanto | 1250 | MWh/a |
| Kaukolämmön myynti- tuotto | 71,3 | €/MWh |
| Hakkeen hinta | 35 | €/MWh |
| Korkokanta | 4,5 | % |
| Pitoaika | 20 | a |
| Nettotulot | 31654 | €/a |

Investoinnin takaisinmaksuajaksi saadaan kaavoilla 4 ja 5 laskettuna 7,6 vuotta. Takaisinmaksuajasta nähdään, että investointi on kannattava tarkastelluilla hinnoilla. Takaisinmaksuajan kannattavuutta voidaan tarkastella myös kappaleessa 7.2 käsiteltyjen skenaarioiden kautta. Mikäli metsähakkeen hinta nousisi 20 % nykytasosta, olisi hinta noin 42 €/MWh. Tällä polttoaine hinnalla takaisinmaksuaika nousisi 12,42 vuoteen, mikä jäisi vielä merkittävästi alle pitoajan. Kuten lämpöpumppuratkaisujen osalta, myös hakekattilan kannattavuuteen vaikuttaa sen huipunkäyttöaika. Tarkastelussa ei ole huomioitu kattilan vaatimaa omakäyttösähköä, mutta voidaan olettaa, etteivät siitä aiheutuvat vuotuiset kustannukset nouse takaisinmaksuajan suhteen ratkaisevaksi. Tarkastelusta on jätetty pois myös kattilan käyttökustannukset. Tämän todetaan olevan merkittävämpi kustannuserä, joka nostaa takaisinmaksuaikaa.

12 Tulokset ja johtopäätökset

Eri ratkaisujen teknistaloudellisen tarkastelun perusteella voidaan päätellä, että paras ratkaisu lisääntyvän tehontarpeen kattamiseen on metsähaketta polttoaineena hyödyntävä kiinteän polttoaineen kattila. Teknisen toteutuksen osalta hakekattilassa ei nähty nousevan esiin merkittäviä haasteita. Nykyisen lämpölaitoksen puitteet tarjoavat hyvän pohjan investoinnille. Taloudellisen kannattavuuden osalta nähdään, että tämänhetkisillä hinnoilla lämmöntuotanto metsähakkeella on kannattavampaa kuin sähköllä. Kun tarkasteluun otettiin mukaan teoriaosuudessa esitetty maksimiskenaario metsähakkeen hinnan noususta, nähtiin, että investoinnin takaisinmaksuaika nousee, mutta ei kuitenkaan niin paljon, että hakekattilan mahdollisuus kannattaisi sulkea pois.

Tämänhetkisen tiedon pohjalta vaikuttaa myös siltä, että mikäli metsähakkeen käyttöä alettaisiin verottamaan tulevaisuudessa, ei verotus koskisi näin pieniä tuotantoyksiköitä. Myös huolto- ja toimitusvarmuuden osalta kiinteän polttoaineen kattilan nähdään olevan sähköön perustuvia tuotantomuotoja varmempi ratkaisu.

Kilpailukykyiseksi vaihtoehdoksi nousi nykyisen hakekattilan savukaasujen hukkalämpöä hyödyntävä lämpöpumppuratkaisu. Tämän ja hakekattilan investointeja vertaillen huomataan, että mikäli metsähakkeen hinta nousisi merkittävästi tai metsähakkeen verotusta päädyttäisiinkin laajentamaan myös näin pieniin tuotantoyksiköihin, nousisi lämpöpumppuratkaisu kannattavammaksi. Teknisen tarkastelun osalta nähtiin kuitenkin, että lämpöpumppuratkaisuun liittyy enemmän haasteita. Lämmöntuotanto korkealla COP-arvolla on riippuvaista hakekattilan ja savukaasupesurin toiminnasta. Mikäli kaukolämmön paluveden lämpötila on liian korkea, ei savukaasun lauhtuminen toteudu. Lämpöpumpun haasteena on myös tuottaa lämpötilatasoltaan korkeampaa menovettä kaukolämpöverkkoon. Myös itse investointiin liittyy epävarmuustekijöitä, joita käsitellään tarkemmin kappaleessa 13. Näiden tekijöiden vuoksi hakekattila nähdään suositeltavampana vaihtoehtona.

Sähkökattilainvestointi ilman lämpöakkua osoittautui kannattamattomaksi ratkaisuksi. Sähkön keskihinnan tulisi laskea merkittävästi, jotta sähkökattila nousisi kilpailukykyiseksi vaihtoehdoksi. Myös lämpöpumppuratkaisu, joka hyödyntää nykyisen hakekattilan synnyttämää tuntuva lämpöä, osoittautui kannattamattomaksi. Jotta lämpöpumppu, jonka COP-arvo on 2 luokkaa, nousisi kannattavammaksi, vaatisi se matalampaa sähkön ostohintaa tai lämpöpumpun mitoitus siten, että saavutettaisiin korkeampi huipunkäyttöaika.

Toisena tutkimuskysymyksenä oli kannattaako nykyinen hakekattila säilyttää? Kehittämistutkimuksesta saatujen tulosten perusteella voidaan nähdä, että nykyisellä hakekattilalla on hyödyllinen rooli kaukolämpöverkon peruskuorman tuottamisessa vielä tulevaisuudessakin. Tämänhetkisen tiedon perusteella voidaan olettaa, että biopolttoaineiden mahdollinen verotus ei tulisi koskemaan tämän kokoluokan lämpölaitoksia. Nykyisellä hakekattilalla nähtiin myös olevan hyödyntämätöntä potentiaalia sen tuottamien savukaasujen osalta. Lämmön talteenoton sisältävällä savukaasupesurilla voitaisiin hyödyntää muuten hukkaan menevää energiaa myös ilman

lämpöpumppua. Tämän avulla voitaisiin vähentää polttoaineen kulutusta. Mikäli vaadittava lisäkapasiteetti päädyttäisiinkin toteuttamaan sähköön perustuvalla tuotantomuodolla, voitaisiin hakekattilan tarjoamalla laajemmalla tuotantopaletilla mahdollisesti tasoittaa tuotantokustannuksia.

Kun työssä saatuja tuloksia peilataan tavoitteeseen siitä, että kaukolämmitys siirtyisi yhä enemmän sähköisten tuotantomuotojen hyödyntämiseen, nähdään että tämänhetkiset hinnat eivät ohjaa siirtymään markkinaehtoisesti. Työn tuloksista huomattiin se, että etenkin tehopohjainen sähkönsiirron hinnoittelu vaikuttaa sähköön perustuvien tuotantomuotojen kannattavuuteen.

13 Pohdinta ja tulosten hyödynnettävyys

Investointien teknistaloudellisen tarkastelun osalta tiedostetaan se, että tarkastelussa on jouduttu tekemään paljon yksinkertaistuksia, jotka vaikuttavat siihen, kuinka todenmukaisia kustannukset ovat. Koska opinnäytetyössä käsiteltiin useampaa tuotantomuotoa, ei opinnäytetyöprosessin rajallinen aika mahdollistanut yksityiskohtaisempaa selvitystä. Yksinkertaistuksia jouduttiin tekemään myös siitä syystä, että monet tuotanto- ja investointikustannukset perustuvat osapuolien keskinäisiin, luottamuksellisiin sopimuksiin, joita ei voida hyödyntää julkisessa työssä. Työssä pyrittiin kuitenkin siihen, että kaikissa tarkasteluissa tehdyt arvioinnit on tehty samoilla periaatteilla.

Lähtökohdat teknistaloudellisen tarkastelun pohjalle muodostuivat pitkälti työssä määritellyn tulevaisuuden skenaarion pohjalle. Tämän skenaarion muodostaminen osoittautui yllättävän vaikeaksi. Suunnitelmat alueen kehittymisestä ovat hyvin alkuvaiheessa, ja tämän takia on tiedostettava mahdollisuus siitä, että alue ei tule kehittymään suunnitellusti ja täten tarvetta lisäkapasiteettiin ei synny. Lähtötietojen pohjalta oli myös mahdotonta arvioida, milloin investointi lisäkapasiteetin tuottamiseen olisi ajankohtainen.

Kun työn lähtökohdat tiedostetaan, voidaan nähdä, että työstä saatuja tuloksia voidaan hyödyntää hyvänä pohjana siinä vaiheessa, kun investointitarve konkretisoituu. Työssä saatuja tuloksia ja kootun tietoperustan pohjalta pystyttiin antamaan selkeitä jatkotoimenpide ehdotuksia.

Opinnäytetyössä saatujen tuloksien laajempi hyödyntäminen alalla voi olla haasteellista, sillä kaukolämpöverkkojen yksilöllisyyden vuoksi investoinneissa joudutaan aina ottamaan erilaisia tekijöitä huomioon. Suomessa kuitenkin on todennäköisesti monia hyvin samankaltaisia pienempiä kaukolämpöverkkoja, joissa peruskuorma tuotetaan metsähakkeella. Tällaisten verkkojen kohdalla opinnäytetyössä saatuja tuloksia ja etenkin koostettua tietoperustaa voidaan hyödyntää hyvänä pohjana, kun harkitaan uusia investointeja.

Teoriaosuuden sähkökattiloita käsittelevässä kappaleessa 4 nostettiin esiin sähköverkkoyhtiöiden rooli sähkökattilainvestointien kannattavuudessa. Kehittämistutkimuksesta saadut tulokset ovat tältä osin linjassa tietoperustan kanssa, sillä sähkönsiirrosta aiheutuvien tuotantokustannusten nähtiin olevan merkittävä osa tuotantokustannuksista. Olisi todella mielenkiintoista nähdä, miten tilanne muuttuisi, jos tarkasteltava kaukolämpöverkko sijaitsisi toimeksiantajan oman sähköverkon alueella tai alueen sähköverkkoyhtiöllä olisi tarjota erillinen tariffi sähkökattiloita ja lämpöpumpuja varten.

Hyödynnettävyyteen liittyvät epävarmuudet

Työn toteutuksen ja tuloksien osalta tulee tiedostaa investointikustannuksiin liittyviä epävarmuustekijöitä. Sähkökattilan ja lämpöpumppuratkaisun osalta hinta-arvio saatiin suunnittelijalta €/MWh muodossa, joka skaalattiin tarkasteltavaan kokoluokkaan. On hyvin todennäköistä, että investointi ei todellisuudessa skaalaudu näin suoraviivaisesti, sillä investointiin liittyy aina myös tehotasosta riippumattomia kustannuksia. Hinta-arvioita pyydettiin myös eri henkilöiltä, jotka pohjasivat arvionsa tuntemiinsa projekteihin. Työssä pyrittiin avaamaan mahdollisimman selkeästi mistä tekijöistä hinta-arvio muodostuu ja millä perusteilla sitä on arvioitu. COP-arvolla nähtiin olevan kriittinen osuus lämpöpumppu investoinnin kannattavuuteen. Lämpöpumppuratkaisujen osalta COP-arvojen laskenta on tehty arvioitujen lämpötilatasojen pohjalta. Tältä osin tiedostetaan, että lämpövirtojen hyödyntämiseen lämpöpumpun lämmönlähteenä liittyy monia vaikuttavia tekijöitä, kuten virtausmäärät. Lämmönlähteen hyödyntämisen kannattavuuden varmistamiseen vaadittaisiin siis vielä tarkempaa selvitystä.

Investointikustannuksissa ei ole otettu huomioon käyttökustannuksia, mikä luonnollisesti lisää tuotantokustannuksia ja täten nostaa takaisinmaksuaikaa. Tämä jätettiin tarkastelusta pois, sillä

hakekattilan osalta käyttökustannukset ovat luottamuksellista tietoa ja todennäköisesti myös sähkökattilan ja lämpöpumpun osalta näitä tietoja ei olisi saatu käyttöön.

13.1 Jatkotoimenpiteet

Kun lisäkapasiteetin tarve tulee todella ajankohtaiseksi, tulee tarkastelu vaadittavasta tehontarpeesta tehdä uudelleen. Tässä vaiheessa voidaan todennäköisesti määrittää tarvittava tilausteho todellisten rakennusten ja pidemmällä olevien suunnitelmien pohjalta. Kuten investointien kannattavuuden tarkastelussa tuli ilmi, on tuotantotehon oikea mitoitus todella tärkeää.

Opinnäytetyössä sähkökattilainvestointia tarkasteltiin ilman lämpöakkuja, ja todettiin, että tarkastelluilla sähköhinnoilla se ei ole kannattava vaihtoehto. Työssä käy kuitenkin ilmi se, että kaikista optimaalisin ratkaisu olisi hyödyntää lämpöakkuja sähkökattilan rinnalla siten, että sähkökattilan ajoa voitaisiin ajoittaa hetkiin, jolloin sähkönhinta on edullisinta. Tästä syystä voisi olla kannattavaa tutkia erilaisten simulaatiotyökalujen avulla sitä, miten paljon tuotantoa on mahdollista ajoittaa haluttuihin hetkiin ja kuinka paljon sillä olisi vaikutusta tuotantokustannuksiin.

Savukaasupesurin hukkalämpöä hyödyntävä lämpöpumppuratkaisu osoittautui työssä kilpailukykyiseksi ratkaisuksi. On kuitenkin selkeää, että investointikustannuksiin liittyy jonkin verran epävarmuuksia. Jotta investoinnista saataisiin mahdollisimman todenmukainen kuva, tulisi lämpöpumpusta ja savukaasupesurista pyytää yksityiskohtaisempi tarjous laitteiden toimittajilta. Toimittajalta saataisiin myös tarkempia teknisiä tietoja esimerkiksi lämpöpumpun COP-arvosta tai savukaasupesurin sähkönkulutuksesta.

13.2 Tutkimuksen luotettavuus ja eettisyys

Kun tarkastellaan kehittämistutkimuksen luotettavuutta, tulee tarkastelu tehdä tarkastelua kohdistaa työn tutkimusasetelmaan, toteutukseen ja tuloksiin. Kehittämistutkimuksen laadullisen osuuden luotettavuuden tarkasteluun käytettäviä kriteereitä ovat muun muassa vahvistettavuus, tulkinnan ristiriidattomuus ja riittävä dokumentaatio. Määrällisen osuuden luotettavuuden tarkastelun kriteerinä voidaan pitää sisäistä validiteettia, eli oikeaa syy-seuraussuhdetta. (Kananen 2015, 111–119.)

Laadullista aineistoa pyrittiin keräämään etenkin lähtötilanteen kartoittamiseen ja tulevaisuuden skenaarion muodostamiseen. Tarkasteltavan kaukolämpöverkon nykytilaa ja mahdollisuuksia tarkastelevien osuuksien oikeellisuus voidaan vahvistaa toimeksiantajalta. E erityisen haasteelliseksi nousi tulevaisuuden skenaarioon liittyvän aineiston tulkitseminen. Asemakaavaa ja alueen kehitysuunnitelmaa tarkasteltaessa oli todella vaikeaa hahmottaa, kuinka paljon alueelle tulnaisiin realistisesti rakentamaan. Aineistoa analysoitaessa tuli myös esiin se, kuinka paljon oma näkemys tutkijana vaikuttaa tulkintaan. Tämän haasteen myötä päädyttiin käymään keskustelua alueen tonttivastaavan kanssa, jotta saataisiin vielä toinen, asiantuntijanäkemyks käytettyyn aineistoon.

Määrällisen tutkimuksen osalta tärkeintä on osoittaa tutkimuksessa tehtyjen laskujen oikeellisuus perustelemalla se, miten saatuun lopputulokseen on päädytty. Tämä on pyritty toteuttamaan työssä mahdollisimman kattavasti avaamalla laskuissa käytetyt kaavat, laskuvaiheet ja se millä perusteella lähtöarvot on valittu.

Kehittämistutkimus toteutettiin noudattaen eettisiä periaatteita. Toimeksiantajan toiveiden mukaisesti heidät ja tarkasteltu kaukolämpöverkko pidettiin tunnistamattomana. Aineiston keruun osalta eettisyys varmistettiin kertomalla kaikkien yhteydenottojen lomassa tiedusteltujen tietojen tulevan opinnäytetyötä varten. Opinnäytetyössä ei ole avattu kenenkään osapuolen osalta luottamuksellista tietoa. Käytettyjä aineistoja myös käsiteltiin huolellisesti ja luottamuksellisesti koko kehittämistutkimuksen ajan.

Lähteet

12gb -- Kotimaisten polttoaineiden käyttäjähinnat energiantuotannossa (ei sis. alv), 1999Q3-2024Q3. N.d. Tilastokeskuksen maksuttomat tilastotietokannat. Verkkojulkaisu. Viitattu 22.12.2024. https://pxdata.stat.fi/PxWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin_ehi/stat-fin_ehi_pxt_12gb.px/chart/chartViewColumn/

Day-ahead Prices. N.d. Nord Poolin verkkosivut. Viitattu 6.12.2024. <https://data.nordpoolgroup.com/auction/day-ahead/prices>

Energiavuosi 2023 kaukolämpö. 2024. Energiateollisuus Ry:n julkaisu. Verkkojulkaisu. Viitattu 9.10.2024 https://energia.fi/wp-content/uploads/2024/01/Kaukolampovuosi-2023_ennakkograa-fit-1.pdf

Finland's integrated national energy and climate plan. 2023. Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisu. Luonnoksen päivitys. Julkaistu kesäkuussa 2023, 78. Viitattu 9.10.2024 <https://tem.fi/documents/1410877/2132096/Suomen+kansallinen+energia+ja+ilmastosuunnitelman+p%C3%A4ivitysluonnos+2023.pdf/eed2f312-f9a2-1e11-6e9a-82c0b906c4d2/Suomen+kansallinen+energia+ja+ilmastosuunnitelman+p%C3%A4ivitysluonnos+2023.pdf?t=1692094778414>

Huhtala, M. 2024. Lämpöhuollon kehittäminen. Opinnäytetyö, AMK. Oulun ammattikorkeakoulu, energiatekniikka. Viitattu 10.12.2024. <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/855372/Minna%20Huhtala.pdf?sequence=2>

Joronen J., Salhoja P., Vähätiitto J. & Seppälä, V. 2023. Selvitys polttoon perustumattomaan ja hiilinegatiiviseen kaukolämpöön siirtymisestä. Versio 2.0. Tampereen sähkölaitos. Verkkojulkaisu, 15, 26–28, 36. Viitattu 7.10.2024 <https://www.tampereenergia.fi/julkaisut/uusi-selvitys-polttoon-perustumattomaan-ja-hiilinegatiiviseen-kaukolampoon-siirtymisesta-2023/>

Järvenreuna, J. 2014. Savukaasupesuri parantaa lämpöyhtiön kannattavuutta. Promaint-lehti 21.10.2014. Viitattu 9.10.2024 <https://promaintlehti.fi/Tuotantotehokkuuden-kehittaminen/Savukaasupesuri-parantaa-lampoyhtion-kannattavuutta>

Kaukolämpö. 2024. Motivan julkaisu. Päivitetty 26.7.2024. Verkkojulkaisu. Viitattu 23.10.2024 https://www.motiva.fi/koti_ ja_ asuminen/energiatehokas_pientalo/lammitysjarjestelman_valinta/lammitysmuodot/kaukolampo

Kauppila, K. 2018. Energiaväylä. Pienen aluelämpöverkon hyödyntäminen matalalämpöisenä sekä lämmönlähteiden ja säästöjen tarkastelu, osa 1 yleistarkastelu. EnerSys CM Oy. Verkkojulkaisu, 15, 17, 22, 24, 28. Viitattu 3.10.2024. <https://sykli.fi/wp-content/uploads/2018/06/mlt-raportti-osa-1-20180528-20180506.pdf>

Kontu, K. Rinne, S & Junnila, S. 2018. Introducing modern heat pumps to existing district heating systems - Global lessons from viable decarbonizing of district heating in Finland. Energy, Volume 166, 2019, Pages 862-870, ISSN 0360-5442, 867, Viitattu 10.10.2024 <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.10.077> ScienceDirect

Koskelainen, L. Saarela, R & Sipilä, K. 2006. Kaukolämmön käsikirja, 153-154, 259. Helsinki: Energiateollisuus

Kotimaista polttoainetta käyttävien 0,5...30 MW kattilalaitosten tekniset ratkaisut sekä palamisen hallinta. 2012. Energiateollisuus Ry:n ja Ympäristöministeriön raportti. 35-36. Viitattu 20.12.2024 35-36 <https://www.ymparisto.fi/sites/default/files/documents/Kotimaista%20polttoainetta%20k%C3%A4ytt%C3%A4vien%20kattilalaitosten%20tekniset%20ratkaisut%20Energiateollisuus%20ymp%C3%A4rist%C3%B6ministeri%C3%B6%202012.pdf>

Laihanen, M. Karhunen, A. Föhr, J. Ranta, T. 2024. Kaukolämmön tulevaisuuden ratkaisut. Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT. Loppuraportti, 26. Viitattu 17.10.2024 <https://lut-pub.lut.fi/bitstream/handle/10024/167189/LUT%20Raportti%20129.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Markkinakatsaus. 2024. Julkaisu Fortumin nettisivuilla. Julkaistu 7.10.2024. Viitattu 18.10.2024 <https://www.fortum.fi/media/fortum-markkinakatsaus>

Metsähakkeen kysynnän kehitys ja riittävyys Suomessa. 2021. Afry. Raportti työ- ja elinkeinoministeriölle ja huoltovarmuuskeskukselle, 1, 40. Viitattu 30.9.2024 https://afry.com/sites/default/files/2021-05/afry_metsahakkeen_kysynnän_kehitys_ja_riittavyys_suomessa_loppuraportti.pdf

Muilu, I. Patronen, J. Armila, N. Lehtoranta, I. & Rautali, J. 2024. Biomassan verotuksen laajentamisen mahdollisuudet ja haasteet. Afry Management Consulting Oy. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 2024:7. 15, 17, 38. Viitattu 1.10.2024 https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/165507/VNTEAS_2024_7.pdf

Mäkelä, V.-M. & Hietala, R. 2021. Kaukolämpötuotannon sähköistyvä tulevaisuus. Oulun ammattikorkeakoulun tekniikan ja luonnonvara-alan lehti: Oamk_telulainen, 2(2), 15, 24. Viitattu 17.10.2024 https://issuu.com/telu_oamk/docs/oamk_telulaine

Mäkelä, V-M. Tuunanen, J. 2015. Suomalainen kaukolämmitys. Mikkelin ammattikorkeakoulu. Opimateriaalia, 11, 22–25, 30-32, 53. Viitattu 30.9.2024. <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/97138/URNISBN9789515885074.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Määrällinen analyysi. N.d. Jyväskylän Yliopiston verkkojulkaisu. Viitattu 10.12.2024. <https://sites.app.jyu.fi/mehu/fi/metelmapolku/aineiston-analyysimenetelmat/maarallinen-analyysi>

Pardo Garcia, N. Vatupoulos, K. Krook-Riekkola, A. Perez Lopez, A & Olsen, L. 2012. Best available technologies for the heat and cooling market in the European Union. Publications Office of the European Union, 14. Viitattu 18.10.2024 <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC72656>

Perälä, O. Perälä, R. 2013. Lämpöpumput. Suomalainen käsikirja aikamme lämmitysjärjestelmästä. Tallinna: Alfamer Oy. 3. uudistettu painos. 27–31.

Putula, J. Hilli, A. 2017. Hakkeen laatuun vaikuttavat tekijät. Oulun ammattikorkeakoulun tutkimus- ja kehitystyön julkaisut. Viitattu 30.9.2024 https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/134175/ePooki%2030_2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Puupolttoaineet energian tuotannossa. 2024. Maa- ja metsätalousministeriön julkaisu. Verkkojulkaisu. Viitattu 23.10.2024 <https://mmm.fi/metsat/puun-kaytto/puun-energiakaytto>

Rakennusten kaukolämmitys, määräykset ja ohjeet, julkaisu K1/2021. 2021. Energiateollisuus Ry. Verkkojulkaisu, 8. Viitattu 16.10.2024 https://energia.fi/wp-content/uploads/2016/08/Julkaisu_K1_2021_Rakennusten_kaukolammitus_Maaraykset_ja_ohjeet_pdf-1.pdf

Rämä, M & Klobut, K. 2020. Hukkalämpö kaukolämpöjärjestelmissä. VTT:n asiakasraportti. VTT Technical Research Centre of Finland. Verkkojulkaisu, 7, 14, 17, 20. Viitattu 9.10.2024 https://energia.fi/files/4831/Hukkalampo_kaukolampojarjestelmissa_-_maarittely_ja_luokittelu_VTT_2020.pdf

Sähkön hintakatsaus. 2024. Julkaisu Lumme Energian nettisivuilla. Viitattu 6.12.2024. <https://www.lumme-energia.fi/sahkon-hintakatsaus>

Tilausteho ja –vesivirta. Määrittely ja tarkistaminen. 1998. Suositus K15/1998. Energiateollisuus ry. Viitattu 17.10.2024. <https://docplayer.fi/3804437-Tilausteho-ja-vesivirta-maari-tys-ja-tarkistaminen.html>

Valvontamenetelmät kuudennella 1.1.2024 – 31.12.2027 ja seitsemännellä 1.1.2028 – 31.12.2031 valvontajaksolla. N.d. Liite 1. Energiaviraston julkaisu. 117,119. Viitattu 9.12.2024. <https://energia-virasto.fi/documents/11120570/12766832/S%C3%A4hk%C3%B6n+jakelu+-+Menetelm%C3%A4liite.pdf/bc07b3d7-9b1b-e970-9be9-f46f1c1dfc94/S%C3%A4hk%C3%B6n+jakelu+-+Menetelm%C3%A4liite.pdf?t=1703848648980>

Verkkopalveluhinnasto. N.d. Elenian verkkopalveluhinnasto suurasiakkaille 1.1.2025 alkaen. Viitattu 11.12.2024. <https://www.elenia.fi/files/4fed358ee58c0b99416ea9f954d730d9089b2df6/suurasiakkaat-hinnasto-fi.pdf>

Kananen, J. 2012. Kehittämistutkimus opinnäytetyönä: kehittämistutkimuksen kirjoittamisen käytännön opas. Jyväskylä; Jyväskylän ammattikorkeakoulu.

Kananen, J. 2015. Kehittämistutkimuksen kirjoittamisen käytännön opas. Jyväskylä; Jyväskylän ammattikorkeakoulu