

Minna Huhtala

LÄMPÖHUOLLON KEHITTÄMINEN

Kaukolämpö

LÄMPÖHUOLLON KEHITTÄMITTÄMINEN

Kaukolämpö

Minna Huhtala
Opinnäytetyö
Kevät 2024
Energiatekniikka
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Energiatekniikka

Tekijä(t): Minna Huhtala

Opinnäytetyön nimi: Lämpöhuollon kehittäminen

Title of thesis: Development of Heat Maintenance

Työn ohjaaja(t): Timo Kiviahde

Työn valmistuslukukausi ja -vuosi:

Sivumäärä: 49

Tässä opinnäytetyössä toimeksiantajana oli Planora Oy, jonka yhtenä osaamisalueena on lämpölaitosten laajennus-, korjaus- ja saneeraussuunnittelu sekä lämpöhuollon kehittämissuunnitelmien tekeminen erilaisille kaukolämmön tuottajille. Työn tarkoituksena oli kertoa yleisesti lämmöntuotannon kehittämissuunnitelman teosta.

Opinnäytetyössä kartoitettiin tulevaisuuden vaihtoehtoisia kaukolämmön tuotantomuotoja polttavan lämmöntuotannon rinnalle tai sen tilalle. Lisäksi tarkasteltiin vaihtoehtoja hiilineutraalin lämmöntuotannon lisäämiseen ja fossiilisten polttoaineiden korvaamiseen. Nämä tuotantomuodot jaettiin kahteen pääluokkaan: polttamattomiin järjestelmiin pohjautuviin ja polttoon perustuviin vaihtoehtoihin. Tässä opinnäytetyössä keskityttiin enemmän polttoon perustumattomiin tuotantomuotoihin.

Työssä käytiin läpi tulevaisuuden toimenpiteitä lämpöhuollon kehittämiseen. Aineiston keräämiseen käytettiin erilaisia lähteitä aiheeseen liittyen. Opinnäytetyössä myös sivuttiin reservimarkkinoita ja erilaisia vaihtoehtoja niille osallistumiseen. Lisäksi syvennyttiin tarkemmin muutamaan polttoon perustumattomaan lämmöntuotantomuotoon, joita yleensä mallinetaan Planora Oy:n kehittämissuunnitelmissa. Ilma-vesilämpöpumpulaitoksen sekä sähkökattilan ja varaajan osalta esitettiin periaatetta niiden mitoituksiin liittyen.

Selvityslaskelmista ja mallinnoista annettiin muutama konkreettinen esimerkki. Omakustannushinta- ja kannattavuuslaskelmista käytiin periaatteita läpi keskittyen laskelmissa tarvittaviin arvoihin. Lisäksi kerrottiin myös savukaasupäästöjen raja-arvoista ja laitosten ympäristösuojeluvaatimuksista. Koska opinnäytetyö tehtiin jo aiemmin tehtyjen selvitysten ja laskelmien pohjalta yhdistelemällä useammalle lämmöntuottajalle tehtyjä energiataselaskelmia, mitään yksittäisiä tuloksia ei esitetä.

Asiasanat: kaukolämpö, lämpölaitos, sähkökattila, savukaasupesuri, hukkalämpö, lämpöpumppu

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	6
2	TOIMEKSIANTAJAN ESITTELY	7
3	KAUKOLÄMMÖSTÄ	8
4	LÄMPÖHUOLLON JATKUVAN KEHITTÄMISEN HUOMIOITA.....	11
4.1	Matalalämpöverkosto	11
4.2	Kysyntäjousto	12
4.3	Kaukolämmön varastointi	13
4.4	Kaksisuuntainen kaukolämpö.....	14
5	VAIHTOEHTOISIA TUOTANTOMUOTOJA JA KEHITYSKOhteITA	15
5.1	Polttoon perustuva lämmöntuotanto.....	15
5.2	Polttoon perustumaton lämmöntuotanto.....	18
5.2.1	Lämpöpumppulaitos.....	18
5.2.2	Sähkökattila	19
5.2.3	Hukkalämmön hyödyntäminen lämpöpumppujen lämmönlähteenä	20
6	SÄHKÖVERKON RESERVIMARKKINAT.....	23
6.1	Vuosituoton arvioiminen	23
6.2	Reservimarkkinoille osallistuminen.....	24
6.3	Sähkökattilat ja akkuvaraajat reservimarkkinoilla	25
7	MITTAUSTRENDIT	27
7.1	Trendikäsitteily	27
7.2	Mitoitustehojen määrittäminen.....	29
7.2.1	Lämpöpumpun mitoitusteho.....	29
7.2.2	Sähkökattilan mitoitusteho ja akun koko	30
8	ESIMERKKEJÄ MALLINNUKSISTA.....	31
8.1	Lämpöpumppu	31
8.2	Sähkökattila ja akkuvaraaja.....	32
8.3	Savukaasupesuri.....	33
8.4	Hukkalämpö	34
9	KEHITYSSUUNNITELMAN TEKEMINEN JA HUOMIOITAVAT ASIAT.....	35
9.1	Nykytilanne.....	35
9.2	Tarkasteluun valitut vaihtoehdot.....	36

9.3	Vaihtoehtojen investointikustannukset	37
9.4	Omakustannushinnat ja kannattavuus	38
9.5	Herkkyystarkastelu	39
10	PIPO-ASETUKSEN VAIKUTUKSET	40
11	YHTEENVETO	43
	LÄHTEET	45

1 JOHDANTO

Suomen asettama kunnianhimoinen tavoite olla vuoteen 2035 mennessä ensimmäinen fossiilivapaa yhteiskunta vaatii tietoisuutta vaihtoehtoisista päästöttömistä energiantuotantomuodoista. Kaukolämpöä on aikojen alusta asti tuotettu pääsääntöisesti polttamalla. Energian tuottamisen kannalta polttaminen on varsin tehokas tuotantotapa, mutta sen ongelmana ovat kuitenkin siitä syntyvät hiilidioksidipäästöt ja erilaiset pienhiukkaset. Tiukentuneet päästörajoitukset ajavat laitoksia energiantuotannossa kohti ympäristöystävällisempää suuntaa.

Laitosten pyrkimys mahdollisimman suureen hyötyn energiantuotannossa näkyy keskittymisenä laiteinvestointeihin ja energiatehokkuuteen. Näillä taataan myös ympäristönsuojelua koskevien määräysten noudattaminen ja täytyminen. Tosin päästörajoitusten noudattaminen ja päästöjen hallinta saattavat aiheuttaa lisää kustannuksia tuotannossa, mikä näkyy myös kuluttajille energiahinnan nousuna.

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on kertoa lämpöhuollon kehittämisestä yleisesti ja siitä kuinka kehityssuunnitelmaa tehtäessä otetaan huomioon investointien ja laitehankintojen kannattavuus asiakkaan näkökulmasta. Opinnäytetyössä kartoitetaan tulevaisuuden vaihtoehtoisia kaukolämmön tuotantomuotoja polttavan lämmöntuotannon rinnalle tai sen tilalle. Lisäksi tarkastellaan vaihtoehtoja hiilineutraalin lämmöntuotannon lisäämiseen ja fossiilisten polttoaineiden korvaamiseen. Suunnitelmia tehdessä pyritään kuitenkin löytämään edullisimmat vaihtoehdot juuri fossiilivapaaseen lämmöntuotantoon ottaen huomioon laitoksen nykyisen kalustuksen kunto sekä mahdolliset investointitarpeet.

Asiakkaalta saatujen lähtötietojen pohjalta muodostetaan lämmöntuotantojakauma niin nykyhetkeen kuin tulevaisuuteenkin. Energiataselaskenta perustuu kaukolämmöntuotannon energiamäärään tulevaisuuden näkökulmasta ja toimii alustana erilaisille vaihtoehtoisille lämmöntuotantomuodoille.

Vaihtoehtoisille tuotantomuodoille tehdään mallinnuksia, joissa huomioidaan kattiloiden minimisäätötehot sekä kaukolämmön liittymistehon kasvu. Mallinnusten lisäksi tarkastellaan kannattavuus- ja herkkyyslaskelmia, joiden pohjalta asiakkaan on helpompi tehdä päätöksiä tulevaisuuden investoinneista.

2 TOIMEKSIANTAJAN ESITTELY

Työn toimeksiantaja on Planora Oy. Planora Oy on vuonna 1987 Ouluun perustettu yhdyskuntatekniikkaan ja teollisuuden erikoistunut suunnittelu- ja konsultointitoimisto, jolla on pitkäaikainen ja laaja kokemus suunnittelusta ja projektinhallinnasta. Yritys konsultoi lukuisia asiakkaita Suomessa ja ulkomailla sekä osallistuu aktiivisesti kansainvälisiin projekteihin. Planora Oy:n henkilöstöön kuuluu 25 asiantuntijaa, jotka palvelevat asiakkaitaan muun muassa selvityksien, lämpölaitoksien ja verkostojen parissa. (1.)

Yhdyskuntatekniikassa Planora Oy:n erityisosaamista on kaukolämpöjärjestelmien suunnittelu. Yritys suunnittelee kokonaisia lämpölaitoksia ja niiden osia (kattilat, kuljettimet, polttoainevarastot, säiliöt ja prosessilaitteet) sekä kaukolämpöverkostoja ja niiden osia (runkolinjat, putkisillat, kannakointi, pumppaamot ja kaukolämpökaivot). Yhteistyössä muiden yritysten, tutkimus-, oppi-, ja rahoituslaitosten sekä viranomaisten kanssa Planora Oy on ollut mukana toteuttamassa lukuisia kotimaisia ja kansainvälisiä hankkeita. (1.)

Työn tarkoituksena on käydä läpi kehittämissuunnitelman tekemistä tulevaisuuden lämmöntuotantoon. Selvityksessä kartoitetaan nykyisten tuotantomuotojen rinnalle tai korvaamiseksi vaihtoehtoisia ja taloudellisesti kannattavia lämmöntuotantomuotoja.

3 KAUKOLÄMMÖSTÄ

Suomessa yleisin lämmitysmuoto on kaukolämpö. Kaukolämpöverkossa on yleensä useampia laitoksia ja lämpöenergia tuotetaan joko pelkästään lämpönä tai yhdessä sähkön kanssa. Asiakasta lähellä tuotetun kaukolämmön tuotannossa pyritään kohti hiilineutraalia tulevaisuutta ja nykyään yli 60 % kaukolämmöntuotannosta onkin päästötöntä. (2.)

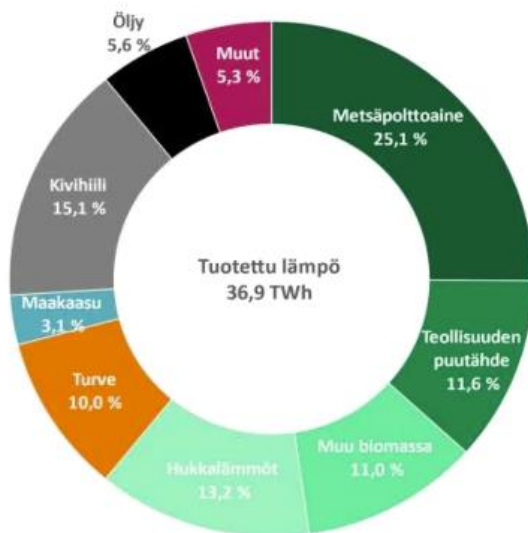
Kaukolämpöverkossa kuuma vesi kulkee menoputkessa voimalaitokselta, lämpölaitokselta tai lämpökeskukselta asiakkaiden lämmönsiirtimiin ja palaa jäähtyneenä takaisin paluuputkessa laitokselle uudelleen lämmitettäväksi. Kulkiessaan lämmönsiirtimissä kaukolämpövesi lämmitteää verkossa olevat kiinteistöt sekä niiden lämpimän käyttöveden. Sään vaihtelujen vuoksi kaukolämpöveden lämpötila vaihtelee ja on alimmillaan kesällä. (3.)

Kaukolämmössä ohjaavina osatekijöinä toimivat verkoston meno- ja paluuputkien välinen paine-ero sekä kaukolämpöverkoston menoveden lämpötila. Jotta alhaisimman paine-eron vaikutusalueen asiakkaalla verkostossa on käytössään 60 kPa (minimipaine-ero), säädetään paine-eroa pumppauksella. Menoveden lämpötilan säätö puolestaan tapahtuu säätämällä lämpölaitoksen polttoaineen tehoa ulkolämpötilan mukaan muuttamalla kattilaan syötettävän polttoaineen määrää. Normaaleissa käyttötilanteissa kaukolämmön ylin menoveden lämpötila on 115 °C. (4.)

Lämmönlähteiden osalta kaukolämpö on lämmitysjärjestelmänä erittäin joustava järjestelmä. Tällaisia lämmönlähteitä ovat muun muassa CHP-laitokset, joissa voidaan tuottaa sähköä ja lämpöä yhdessä. Kaukolämmön muita lämmönlähteitä ovat myös muun muassa teollisuuden hukkalämpö ja erilliset lämpökeskukset. Teholtaan erikokoisten lämmöntuotantolaitosten optimaalinen yhdisteleminen tehontarpeen, verkoston siirtokapasiteetin ja polttoaineiden hintasuhteen mukaan lisää tuotannon luotettavuutta ja pienentää tuotantokustannuksia. (4.)

Kaukolämmön tuotannossa polttoaineena on paikkakunnasta ja laitoksista riippuen puu tai muu biomassa. Lisäksi lämpökeskuksissa ja -laitoksissa käytettäviä polttoaineita ovat muun muassa öljy, turve, jäte ja maakaasu. Polttoainetta valittaessa on syytä huomioida sen saatavuus, hinnanmuutokset sekä vaikutukset ympäristöön. (4.)

Hiilineutraalia lämmöntuotantoa tavoiteltaessa on useammalla paikkakunnalla kaukolämmön tuotannossa käytössä pelkästään kotimaisia polttoaineita. Lisäksi fossiilisten polttoaineiden käyttö lämmöntuotannossa on vähentynyt selvästi kymmenen vuoden aikana. (2.) Kuvassa 1 esitetään kaukolämmön tuotannon energialähteet vuonna 2022, jolloin kaukolämmön tuotannosta jopa 61 % on tuotettu hiilidioksidineutraalilla biomassalla ja 13,2 % hukkalämmöllä. Fossiilisilla tuontipolttoaineilla tuotettiin 24 % kaukolämmöstä. (5.)



KUVA 1. Kaukolämmöntuotannon energialähteet vuonna 2022 (5)

Polttamattomaan järjestelmään perustuvat lämmöntuotantomuodot alkavat lisääntyä kaukolämpölaitoksilla. Tällaisia vaihtoehtoja ovat esimerkiksi erilaiset lämpöpumput. Myös hybridiratkaisut, joissa yhdistetään polttoon perustuvia ja perustumattomia järjestelmiä, ovat yleistyneet. Mahdollisesti saatavilla olevaa hukkalämpöä voidaan myös hyödyntää kaukolämmöksi. (2.)

Samassa kaukolämpöverkossa olevien lämmöntuotantolaitosten yhtäaikaiselle ajamiselle on perusteita ja vaatimuksia. Kaukolämpöverkoston vuotuisesta energiantarpeesta pääosan tuottavat käyttöiältään pitkäaikaisiksi suunnitellut peruskuormalaitokset. Tällaisia lämmöntuotannon peruskuormalaitoksia voivat olla voimalaitokset tai lämpökeskukset, ja suurimmissa järjestelmissä niitä voi olla samassa verkostossa useampia. Pienemmissä verkostoissa yksittäinen kiinteän polttoaineen lämpökeskus voi toimia peruskuorman tuottajana. Oli kyseessä iso tai pieni järjestelmä, tarvitaan kummassakin peruskuorman tuotannon lisäksi huippu- ja varatehoa. Huippu-

ja varatehon lämpökeskusten sijainnilla ei ole merkitystä. Niiden sijainnin verkossa määrää muun muassa verkoston rakenne, tehontarve sekä pumppauskustannukset. (4.)

Kaukolämmön peruskuormaa tuotetaan laitoksilla, joilla on matalat käyttökustannukset. Tämä johtuu siitä, että niiden huippukäytönajat voivat olla noin 4000–4500 tuntia. Vara- ja huippukuormat puolestaan tuotetaan nopeasti käynnistyvillä ja helposti säädettävillä lämpölaitoksilla, joiden polttoaineina yleensä toimivat maakaasu ja kevyt polttoöljy (POK). Ajettaessa käyttötunneiltaan vähäisempää vara- tai huippukuormaa polttoaineiden korkeammat hinnat eivät tuota ongelmia. (6.)

4 LÄMPÖHUOLLON JATKUVAN KEHITTÄMISEN HUOMIOITA

Tulevaisuudessa kaukolämmön suunnittelussa yhdistetään lämmön varastointi, energialähteiden muutokset, älykäs verkoston säätely sekä matalalämpöinen lämmönjakeluverkko. Osa näistä käytännöistä on jo osittain käytössä, eli vanhaa infrastruktuuria korvataan nykyaikaisimmilla ja energiatehokkaimmilla ratkaisuilla. (7.) Tässä luvussa esitellään muutamia lämpöhuollon kehittämiseen liittyviä huomioita. Kaukolämmöntuotannon kehittämiseen voidaan luetella ainakin lämmön varastointi kiinteistöjen rakenteisiin, kaukolämmön kysyntäjousto sekä verkoston akuttaminen. Lisäksi käsitellään muista kaukolämmönkehittämisen kohteista esimerkkinä kaksisuuntaista kaukolämpöä.

4.1 Matalalämpöverkosto

Yhdessä keskeisessä roolissa tulevaisuuden kaukolämpöverkoissa on matalalämpöinen lämmönjakeluverkosto (7). Energiategollisuuden rakennusten kaukolämmityksen määräyksissä ja ohjeissa on menoveden osalta suositeltu sen muuttamista aiemmasta 115 °C:n lämpötilasta 90 °C:n lämpötilaan (8). Vanhojen verkkojen muuttamisessa matalalämpöiseksi kaukolämpöverkoksi on haasteensa muutostöiden vaatiessa parannuksia asiakkaan kaukolämpölaitteisiin sekä lämmitysjärjestelmiin. Muutostöiden haittapuolena on siis kustannusten kohdistuminen pääosin kiinteistöihin. (6.)

Kiinteistöihin kohdistuvien kustannusten lisäksi matalalämpöiseen verkkoon siirtyminen tulee aiheuttamaan muutoksia tuotantoon ja mahdollisesti myös kaukolämpöverkoston. Menoveden lämpötilan alentaminen kaukolämpöverkossa pienentää asiakaslaitteiden lämpötilaeroja, mikä puolestaan johtaa pumppaustarpeen lisääntymiseen. Pumppauksen lisääntyessä verkon tilavuusvirrat kasvavat ja painehäviöt suurenevät. Verkoston putkikokoja pitää kasvattaa tilavuusvirran nousun vuoksi, mikä vaatii jo olemassa olevan verkon kannalta suuria investointeja. (6.)

Matalalämpöverkoston alempi lämpötila ja lämmönvarastointikapasiteetti mahdollistavat alhaisempien hukkalämpöjen hyödyntämisen (7). Menoveden lämpötilan alentaminen pienentää ympäristön ja verkoston lämpötilaeroa, mikä puolestaan alentaa verkoston lämpöhäviöitä. Myös

lämmön varastoinnin kannattavuus parantuu varaston ja ympäristön pienemmän lämpötilaeron vähentäessä lämpöhäviöitä. Lämpötilaeroista aiheutuva verkostoon kohdistuva rasitus pienenee ja sen seurauksena myös huoltokustannukset pienenevät. (6.) Matalalämpöverkosto mahdollistaa myös suuremman tehokkuuden muun muassa savukaasujen talteenotossa, lämpöpumpuissa ja CHP-laitoksissa. Lisäksi se tulee avaamaan lisää uusia tuotantomuotoja esimerkiksi matalalämpöisistä teollisuuden prosesseista. (7.)

Matalalämpöisen kaukolämpöverkon tekniikan on todettu toimivan jopa Suomessa, ja uusia kaukolämpöverkostoja on rakennettu. Uudet ja modernit lämmityslaitteet eivät tarvitse yhtä korkeita lämpötiloja kuin vanhemmat kaukolämpölaitteet, joten kokonaan uusien kaukolämpöverkkojen rakentaminen matalalämpöiseksi on mahdollista. (6.)

4.2 Kysyntäjousto

Lämmön kysyntä on vuorokausitasolla varsin epätasaista ja kulutuksen suurimmat huiput sijoittuvat aamuihin ja iltapäiviin. Kaukolämmön kysyntäjoustossa asiakkaan energian kokonaiskulutusta ei pyritä vähentämään, vaan näitä kulutuspiikkejä tasoitetaan. Lämmönkulutusta voidaan siirtää ajallisesti automatisoinnin ja etäohjauksen avulla. Lämmön kysynnän ollessa vähäistä, esimerkiksi yöaikaan, asiakas voi ladata lämmönvaraajaansa ja käyttää tämän ladatun energian aamuhuipun aikana. Näin saadaan tasoitettua kulutuspiikkejä ja vähennettyä polttavien tuotantotapojen, esimerkiksi öljykattiloiden, tarvetta. Samalla vähennetään myös lämmöntuotannossa polttotekniikan aiheuttamia päästöjä. (7.)

Kysyntäjoustoa voidaan toteuttaa myös kuluttajan joustavalla lämmönkulutuksella, jolloin rakennusten lämpötiloja säädetään kysynnän huippujen mukaan. Rakennusten lämpötilaa voidaan hetkellisesti laskea ennen kulutushuippua ja nostaa takaisin tavalliseen sen jälkeen. Tällainen sisätilojen hetkellinen lämmityksen lasku on riippuvainen lämmöstä, jota on varastoituneena rakennuksen rakenteisiin ja sisäilmaan. (7.)

Kaukolämmön tuotannossa kysyntäjouston hyödyntäminen on kuitenkin haastavaa kaukolämpöjärjestelmien toimiessa pääsääntöisesti pitkällä aikavakiolla. Lämmityksen lisäämiset sekä vähentämiset näkyvät viiveellä asiakkaiden sisälämpötiloissa, ja niihin vaikuttavat myös sääolosuhteet. (6.)

Suurimmat hyödyt kysyntäjoustolla saavutetaan syksyisin ja keväisin ulkolämpötilojen vaihdellessa vuorokausitasolla suuresti. Kokonaisenergiankulutusta jousto ei kuitenkaan välttämättä pienennä, mutta kulutusta se kuitenkin tasaa. Näin ollen on mahdollista, ettei kaukolämpöä tuottaessa tarvitse käynnistää vara- tai huippulämpölaitoksia ollenkaan. (6.)

4.3 Kaukolämmön varastointi

Lämmön varastointi lisää kaukolämmön joustavuutta. Kaukolämmön varastointia voidaan toteuttaa erilaisissa kokoluokissa. Lämpöä voidaan varastoida päiviksi, viikoiksi tai kuukausiksi. Kaukolämpövarastoilla mahdollistetaan sähkön varastoiminen lämpöenergiana.

Suuren luokan varastointia voidaan toteuttaa esimerkiksi maanalaisissa luolissa. (9.) Kaukolämmön lyhytaikaisvarastointia voidaan toteuttaa esimerkiksi kaukolämpöakuissa tai olomuodon muutoksiin perustuvissa lämpövarastoissa. Molemmat varastointimuodot vaativat järjestelmien lisäinvestointeja, kun taas esimerkiksi verkkoon liittyneiden rakennusten käyttäminen varastoinnissa onnistuu ilman erillisiä järjestelmiä tai suurempia lisäinvestointeja. (6.)

Kaukolämpöakkuja käytetään jo yleisesti lämpövarastoina, mutta olomuodon muutoksiin perustuvat lämpövarastot eivät ole vielä lyöneet läpi kaupallisella tasolla. Kaukolämmön kausivarastoinnin ongelmana on sen suuret lämpöhäviöt, joita ei lyhytaikaisessa varastoinnissa juurikaan ole. Lyhytaikaisen varastoinnin lämpöhäviöt jäävät alle 5 %:iin. (6.)

Kausivarastointiin verrattuna lyhytaikaisen varastoinnin lämmön purkamisen ja lataamisen sykli on selvästi lyhyempää. Lämmön lyhytaikaisvarastointi voi kestää päiviä tai vain tunteja, ja sillä pyritään parantamaan lämmöntuotantoa. Optimoitu lämmöntuotanto puolestaan parantaa sen hyötysuhdetta ja alentaa tuotantokustannuksia. Lisäksi varastoinnin avulla lämmöntuotannossa pystytään hyödyntämään halvan sähkön tunteja varastoimalla yöaikana tuotettu sähkö käytettäväksi aamun kulutushuippuina. Näin ollen kaukolämmössä niin kysyntäjousto kuin lyhytaikainen lämmönvarastointikin tasaavat tuotannon kulutushuippuja, mutta heikentävät yhdessä toisista saatavia hyötyjä. Investoiminen molempiin ei siis ole kannattavaa. (6.)

4.4 Kaksisuuntainen kaukolämpö

Kaksisuuntainen kaukolämpö on toimintamalli, joka on kehitetty lämmitysmarkkinoille. Tämä toimintamalli mahdollistaa sen, että asiakkaat voivat myydä kaukolämpöverkkoon lämpönsä, joka on ylimääräistä tai jota asiakkaat eivät itse käytä. (10.) Perinteisesti vain kaukolämpöyrittäjä on voinut toimittaa lämpöä asiakkailleen. Kaksisuuntainen kaukolämpö mahdollistaa kaukolämmön kauppaamisen useamman lämmöntuottajan toimesta sekä antaa asiakkaalle mahdollisuuden valita, keneltä lämpönsä ostaa. (11.)

Kaksisuuntaisen kaukolämmön toteuttaminen ja liiketoiminnan muuttaminen kaksisuuntaiseksi tulee vaatimaan uusien hinnoittelumallien kehittämistä, mutta myös investointeja. Teknisesti kaukolämmön kaksisuuntaisuus on toteutettavissa ja siihen löytyy ratkaisuja esimerkiksi suurempien datakeskusten osalta. Suurempien asiakkaiden kohdalla toteuttaminen on helpompaa kuin pienten asiakkaiden, koska kaukolämmön menopuolelle asiakkaan tuottaman lämmön tulee olla tarpeeksi lämmintä. (6.)

Potentiaalia kaksisuuntaisessa kaukolämmössä on, mutta pienasiakkaille kaksisuuntainen kaukolämpö voi olla taloudellisesti kannattamatonta sen vaatiessa resursseja ja takaisinmaksuajaltaan järjettömiä investointeja. Aluksi kaksisuuntaisen kaukolämpöliiketoiminnan mahdollisuutta voitaisiin tarjota vain suuremmille asiakkaille. Kunhan tekniset ratkaisut kehittyvät ja tietämys asiasta kasvaa, voitaisiin mahdollisesti tarjota pienemmillekin asiakkaille mahdollisuutta liittyä mukaan. (6.)

5 VAIHTOEHTOISIA TUOTANTOMUOTOJA JA KEHITYSKOhteITA

Lämpöhuollon kehittämissuunnitelmaa tehtäessä tarkastellaan uusia lämmöntuotanto- ja -varastointivaihtoehtoja sekä nykyjärjestelmän kehittämisvaihtoehtoja, joista luokitellaan ja karsitaan kunkin asiakkaan tuotantorakenteeseen soveltuvimmat vaihtoehdot lopputarkasteluun. Kehittämissuunnitelmassa uusien lämmöntuotanto- ja varastointivaihtoehtojen luokittelussa otetaan huomion asiakasriippuvaiset tekijät kuten esimerkiksi verkon koko, nykylaitteiden kunto sekä polttoaineen ja sähkön hinta. Esimerkiksi sähkökäyttöisten lämmitysmuotojen, kuten sähkökattiloiden ja ilma-vesilämpöpumppujen, käyttöä tuotannossa määritetään laskelmissa tapahtuvaksi halvan sähkön aikana.

Kaukolämpöyhtiön nykykaluston ollessa ikääntynyttä ja teknisen käyttöikänsä päässä otetaan laskelmissa huomioon kaluston saneerauksen tarve tai vaihtoehtoisesti uuteen laitokseen investoiminen. Vaihtoehtoisia tuotantomuotoja karsiessa on huomioitava lämpölaitoksen polttoaineen saatavuus ja hinta, koska energiakriisi on nostanut sen hintoja ja vaikeuttanut saatavuutta.

Polttoaineen ja sähkön hinta saattavat merkittävästi nostaa vaihtoehtojen omakustannushintaa, joten karsinnassa pyritään esittämään vain asiakkaalle sopivia ja kannattavia vaihtoehtoja. Tästä syystä jokainen suunnitelma on yksilöllinen. Jokainen tuotantomuotojen karsinta tehdään kullekin kohteelle sopivaksi ja karsinnassa valituille tuotantomuodoille tehdään mallinnukset. Tässä luvussa kerrotaan lyhyesti muutamista lämmöntuotanto- ja -varastointivaihtoehtoista keskittyen enemmän polttoon perustumattomien lämmöntuotantovaihtoehtojen esittelyyn.

5.1 Polttoon perustuva lämmöntuotanto

Polttoon perustuvassa lämmöntuotannossa kaukolämpölaitokset hyödyntävät tuotannossaan polttoprosesseja. Polttoon perustuvista lämmöntuotantovaihtoehtoista fossiilisia polttoaineita käyttävät esimerkiksi öljy-, kivihiili-, turve-, sekä maakaasulämpölaitokset. Turve luokitellaan fossiiliseksi polttoaineeksi, koska se on hitaasti uusiutuva polttoaine. (12.) Lämmöntuotannon pyrkiessä päästöttömään tuotantoon on näiden lämmöntuotantomuotojen kohdalla jo imagosyistä pyrittävä korvaaviin polttoaineisiin.

Biomassan osuus on suuressa määrin nousemassa luovuttaessa fossiilisten polttoaineiden käytöstä. Biolämpölaitosten polttoaineita ovat esimerkiksi puupelletti, hake, metsätähdde ja kasvipohjaiset polttoaineet, ja ne kuuluvat uusiutuviin energialähteisiin. Niistä vapautuu hiilidioksidipäästöjä vain sen verran, mitä niihin on kasvuaikana sitoutunut. (13.)

Edellisten lisäksi polttoon perustuvia laitoksia ovat muun muassa jätepolttolaitosten (Recovered fuel, REF ja Solid recovered fuel, SRF) polttoon perustuvat lämpölaitokset. Lämpöhuollon kehittämissuunnitelmaa tehtäessä on huomioitava, että vielä tällä hetkellä polttoon perustuva lämmöntuotanto on usein edullisempaa verrattuna polttamattomaan lämmöntuotantoon. Uusia vaihtoehtoisia lämmöntuotantomuotoja luokitellessa ja karsiessa on otettava huomioon kunkin asiakkaan kohdalla polttoaineen saatavuus sekä hinta.

Savukaasupesuri

Savupiipuista taivaalle menetetään edelleen valtavia määriä lämmityksessä hyödynnettävissä olevaa energiaa, ja siksi savukaasupesuritekniikka tuo kaukolämpöyhtiölle taloudellista hyötyä. Nykyaikainen savukaasupesuri suodattaa lämpölaitosten hiukkaspäästöjä sekä ottaa hukkalämmön talteen. Kaukolämpölaitoksille savukaasupesuri investointina on taloudellisesti järkevää sekä varsin pienimuotoinen investointihanke. Lämmöntuotannossa savukaasupesurihankinnalla voidaan nostaa laitosten energiatehokkuutta sekä rajoittaa päästöjä nykyisten vaatimusten tasolle. (14.)

Savukaasupesurilla puhdistetaan savukaasuista poltossa syntyvät hiukkaset. Seinäjoen energian artikkelissa mainitaan, että yhdistämällä savukaasupesuri lämpöpumppuun voidaan savukaasujen hukkalämpöä ottaa talteen ja säästää polttoainetta jopa yli 30 prosenttia. Savukaasupesurin käytössä vesihöyry muutetaan takaisin vedeksi. Höyryn lauhtuessa vedeksi vapautuu paljon lämpöpumpun avulla talteen otettavaa hyödynnettävää energiaa, joka on mahdollista siirtää kaukolämmön käyttöön. Savukaasupesuriin yhdistetty lämpöpumppu mahdollistaa kaksi kertaa tehokkaamman hukkalämmön hyödyntämisen verrattuna perinteisiin pesureihin. (15.)

Kun savukaasupesuriin yhdistetään lämpöpumppu, saadaan kaukolämmön tuloveden lämpötilaa laskettua. Tämä lisää lämmönsiirtimen lämpötilaeroa ja tehostaa lämmöntalteenottoa. Näin saadaan varmistettua savukaasujen lauhteen energian siirtäminen paluuveteen. Lämpöpumpun kannattavuuden määrittelee sen COP-arvo eli tehokerroin. Lisäksi kannattavuuteen vaikuttavat lämpölaitoksen sähkön ja polttoaineen hintasuhde. Jos lämpölaitoksen käyttämän sähkön ja

polttoaineen hintasuhte on pienempi kuin pumpun tehokerroin, on lämpöpumpun käyttö savukaasupesurin yhteydessä kannattavaa. (16.)

Savukaasupesuria hyödynnettäessä kaukolämmöntuotannossa voi pesurin tuottama energia olla jopa 20 % kaukolämmön kokonaistehosta. Pesurin avulla lämpölaitos saavuttaa merkittäviä säästöjä polttoaineen kulutuksen laskiessa. Talvikuukausina, jolloin lämmön kulutus on suurimmillaan, saadaan savukaasupesurista suurin hyöty ja sen tuottama teho kaukolämmön kokonaistehosta on edellä mainitun 20 %:n luokkaa. Muina kuin talvikuukausina pesurin tuottama teho on noin 10–20 %. (16.)

Paluuveden lämpötilalla on vaikutusta savukaasupesurin toimintaan (17). Kylmänä palaavaan kaukolämpövedeen saadaan sidottua enemmän savukaasujen lämpöenergiaa kuin lämpimämpään paluuveteen (18). Paluuveden lämpötilaa saadaan nostettua muutamalla asteella savukaasuista saatavan lauhteen avulla, ja sillä on suuri merkitys lämpölaitoksen kokonaishyötysuhteen kannalta (16).

Savukaasupesurin lämmöntalteenotossa on tärkeää saada laskettua savukaasujen lämpötila vesihöyryn kastepisteeseen (16). Liian lämmin paluuvesi lämmönsiirtimellä voi aiheuttaa ongelmia savukaasupesurin kastepisteen alittumisessa. Yhdistettäessä lämpöpumppu savukaasupesuriin tehostetaan lämmöntalteenottoa. Samalla saadaan alennettua pesurille tulevan paluuveden lämpötilaa ja näin varmistetaan savukaasupesurissa kastepisteen alittaminen. (17.)

Savukaasujen kosteudella on merkitystä pesurista saatavaan lämpötehoon. Mitä suurempi savukaasun kosteuspitoisuus on, sitä korkeammassa lämpötilassa se tiivistyy vedeksi. Savukaasupesuriin kytketyllä palamisilman kostuttimella saadaan savukaasuihin enemmän vesihöyryä. Palamisilman kosteuttamisella on vaikutuksensa myös pesurin toiminnan tehostumiseen. Tästä voidaankin päätellä, että savukaasupesurista otettavaan lämpötehoon vaikuttaa myös polttoaineen kosteus. (17.) Kosteammalla polttoaineella muodostuu enemmän savukaasuja. Biopolttoaineet ovat yleensä kosteita, ja niiden savukaasuvirta sisältää runsaasti vesihöyryä. Vesihöyryn lauhtuessa savukaasupesurin lämmöntalteenotto tehostuu, eikä kaukolämpövettä tarvitse lämmittää niin paljon. (18.)

Savukaasupesurilla varustetun lämpölaitoksen polttoaineen kosteuspitoisuudella ei ole kovinkaan suurta merkitystä verrattuna laitokseen, jossa pesuria ei ole. Polttoaineen kosteuden höyrystyessä

savukaasuihin saadaan pesurista enemmän tehoja irti, eli palamisilman kostutuksella on samanlainen vaikutus kuin polttoaineen kosteuspitoisuudella. Tosin polttoaineen kosteudella on palamista heikentävä vaikutus, koska sen kosteus höyrystyy ennen palamista. Näin ollen polttoaineen lämpöarvo pienenee. (17.)

5.2 Polttoon perustumaton lämmöntuotanto

Päästötön lämmöntuotanto 2030-luvun loppuun mennessä edistää polttoon perustumattomien lämmöntuotantomuotojen käyttöönottoa ja kehittämistä. Siirtyminen kohti hiilineutraalia lämmöntuotantoa on alkanut ja tulevaisuudessa lämpöä hankitaan sieltä, mistä sitä tehokkaimmin on saatavilla. Sähköön perustuvat älykkäät, hukkalämpöä hyödyntävät ratkaisut tulevat tulevaisuudessa korvaamaan fossiiliset polttoaineet. Lisää joustoa lämmöntuotantoon tulee tulevaisuudessa lisäämään myös se, että lämmönkuluttajista voi mahdollisesti tulla lämmöntuottajia. (19.)

Polttoon perustumattomia lämmöntuotantomuotoja ovat muun muassa lämpöpumppulaitokset, sähkökattilat varaajilla, hukkalämmön hyödyntäminen, aurinkoenergiajärjestelmät ja kaukolämpöakut. Muutamia edellä mainittuja tuotantomuotoja käsitellään tässä luvussa omissa alakappaleissaan.

5.2.1 Lämpöpumppulaitos

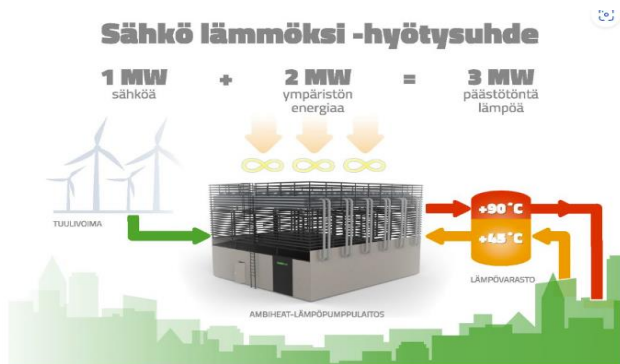
Kaukolämmöllä on keskeinen rooli energiaverkossa ja -huollossa etenkin, kun järjestelmään liitetään lämpöpumppuja. Lämpöpumput muun muassa edistävät fossiilisista polttoaineista luopumista ja tasapainottavat sähköverkkoa. (20.) Lämpöpumppujen integrointi kaukolämpöverkkoihin ei ole uutta. Teollisen mittakaavan ilma-vesilämpöpumppujärjestelmä (IVLP) ottaa lämmitysenergian ulkoilmasta, jota on käytössä rajattomasti kaikkialla. (21.)

Suuren mittakaavan ilma-vesilämpöpumppulaitokset ovat isossa roolissa pyrkiessämme kohti hiilineutraalia kaukolämmöntuotantoa. Uuden tekniikan edelläkävijänä pidettävän ilma-vesilämpöpumpun hyötysuhde on riippuvainen ulkolämpötilasta. Vaikka tekniikka kehittyy ja ilma-vesilämpöpumppuja kehitetään, vielä tällä hetkellä niitä ei pystytä hyödyntämään kovilla pakkasilla, jolloin kaukolämmön kysyntä on suurinta. (21.)

Kesäajan lämmöntuotannossa ilma-vesilämpöpumppu on lupaava vaihtoehto, mutta talviolosuhteissa sen hyötysuhde on kesäaikaa huonompi. Talvikäytön kannattavuutta laskee myös sähköhinnan nousu talviaikoina. (22.)

Ilma-vesilämpöpumpun COP-arvo eli lämpökerroin ilmaisee kulutetun ja tuotetun energian suhteen. Lämpökerrointa kutsutaan myös hyötysuhteeksi, eli mitä isompi COP-arvo on, sitä parempi on pumpun tehokkuus. COP-arvo kertoo kulutetun sähköenergian lämpöenergiaksi muuttamisen tehokkuudesta. (23.)

Lämpöpumpputekniikalla lämmön tuottaminen tuo joustavuutta energian varastointiin ja kysyntään. Suomessa sähköntuotannon näkymät ovat positiiviset, sillä hiilidioksidivapaa sähköntuotanto tulee lähiaikoina lisääntymään huomattavasti. Polttoaineiden hinnannousu aiheuttaa kustannuksia lämmöntuotantoon. Kustannusten nousuun auttaa ainoastaan energiatehokkuuden parantaminen nykYTEKNOLOGIALLA. Ilma-vesilämpöpumpputekniikalla on mahdollista tuottaa yhdellä yksiköllä kolme-neljä yksikköä puhtaasti tuotettua lämpöä yhteiskunnan käyttöön ja teollisuuden tarpeisiin (kuva 2). Toisin sanoen teollisuuden hukkalämpöä ja ympäristön energiaa hyödyntäen puhdas sähkö jalostetaan lämpöpumppulaitoksessa. (24.)



KUVA 2. Sähkö lämmöksi -hyötysuhde (24)

5.2.2 Sähkökattila

Suoraa sähkölämmitystä sähkökattiloilla voidaan myös pitää yhtenä varteenotettavana vaihtoehtona kaukolämmön huippukuormien tuotannossa etenkin halvan sähkön aikana (6). Sähkökäyttöinen lämpökattila toimii kuin vedenkeitin tuottaen teollisen mittakaavan vesisäiliöön

sähköstä lämpöä. Sähkökattila tuo lämpöjärjestelmään lisää toimitusvarmuutta ja lisää joustavuutta. (25.)

Sähkökattilan ja akkuvaraajan käyttö kaukolämmössä hyödyntää pörssisähkön edullisia tunteja. Sähkökattilat voidaan esimerkiksi käynnistää tuulisena päivänä, jolloin sähköä on tarjolla paljon ja hinta on alhaalla. Suuri sähkön tarjonta markkinoilla aiheuttaa myös ongelmallista ylikapasiteettia. Tällöin on järkevää ohjata sähköllä tuotettu lämpö varaajaan ja purkaa lämpö akusta kalliimpien sähkönhintojen aikana. Ylitarjonnan hetkillä sähkökattilan ja akkuvaraajan yhdistelmä tasoittaa sähkön kysyntää ja on kustannustehokasta. (25.) Koska energiamurroksen myötä sähköjärjestelmässä tarvitaan joustavuutta, ovat lämmöntuotantoon investoidut sähkökattilat ja niihin liitetyt akkuvaraajat yksiä reservimarkkinoiden edelläkävijöitä (26).

Tulevaisuudessa kaukolämmöntuotanto sähköllä yleistyy tuuli- ja aurinkovoiman lisääntyessä. Sen kannattavuuteen vaikuttaa kuitenkin useampi tekijä, joista yksi on sähkön hinta. Lämpöpumppuja on mahdollista käyttää sähkökattiloiden sijasta. Lämpöpumpuilla saadaan tuotettua enemmän lämpöenergiaa samalla määrällä sähköenergiaa, mutta verrattuna lämpöpumppuun sähkökattilan investointikustannukset jäävät huomattavasti pienemmiksi. Jos käyttötunteja on vähän, on sähkökattila lämpöpumppua järkevämpi vaihtoehto. (6.)

5.2.3 Hukkalämmön hyödyntäminen lämpöpumppujen lämmönlähteenä

Hukkalämpö on suurissa prosesseissa sivutuotteena syntyvää lämpöä, joka ilman sen hyödyntämistä haihtuisi ilmaan tai veteen (27). Hukkalämpöä voidaan hyödyntää joko suoraan luovuttavasta kohteesta tai lämpöpumpun kautta kaukolämpöverkkoon. Suoraan hyödynnettävä hukkalämpö on lämpöpumpun kautta johdettavaa hukkalämpöä käyttökelpoisempaa. (6.) Mitä korkeammassa lämpötilassa hukkalämpö on, sitä käyttökelpoisempaa sen on. Hukkalämmön lähteitä, joita ovat muun muassa teollisuus, kylmälaitteet ja julkiset rakennukset, on esitelty kuvassa 3. (27.)



KUVA 3. Hukkalämmön lähteet ryhmiteltynä alkuperän mukaisesti (27)

Rakennusten lämmönlähteitä ovat muun muassa harmaa vesi (viemäriin valuva käyttövesi) ja poistoilman lämmöntalteenotto. (27.) Asuinrakennusten hukkalämmön teho on huomattavasti pienempi kuin esimerkiksi kylmälaitteiden, teollisuuden ja julkisten rakennusten hukkalämmön teho. Siksi asuinrakennuksista saatavaa hukkalämpöä kannattaa käyttää lämpöpumpun avulla suoraan kohteessa. (6.)

Kylmälaitteiden lauhdelämpö johdetaan usein ulkoilmaan ja näin syntynyt hukkalämpö jää hyödyntämättä (27). Kauppojen ja kylmävarastojen hukkalämmön teho voi olla 10 kW – 1 MW, ja niistä saatavan hukkalämmön lämpötila on välillä 0 – 40 °C. Tämän potentiaalisen hukkalämmön hyödyntäminen kaukolämpöverkossa vaatii väliin esimerkiksi lämpöpumpun. (6.) Kylmälaitteiden ohella jäähallit, kylmävarastot ja pakastamot ovat samanlaisia hukkalämmönlähteitä. Näitä lauhdelämmön hukkalämpöjä on mahdollista kerätä kaukojäähdytysverkkoon. (27.)

Julkiset kohteet, kuten torialueet, maanalaisten tilojen ilmanvaihto sekä jäteveden puhdistamot ovat myös hyviä hukkalämmönkohteita (27). Erityisesti kaupunkialueilla, joihin rakennusten lämmöntarve on pääosin keskittynyt, on jätevesi yksi korkeapotentiaalinen hukkalämmön lähde ja sitä on saatavilla kaikkialla. Tuoreen tutkimuksen mukaan Euroopassa lähes 4000 jätevedenpuhdistamo sijaitsee alle 2 kilometrin päässä kaukolämpöverkosta. Nämä laitokset voivat yhdessä toimittaa lämpöpumpuilla verkkoon 175 TWh lämpöä vuodessa, mikä vastaa viidesosaa Euroopan nykyisestä kaukolämmön tarjonnasta. (28.)

Puhdistetun jäteveden lämpöä voidaan hyödyntää lämpöpumpujen lämmönlähteinä. Lisäksi jäähtynyttä jätevettä voidaan lämmön talteenoton jälkeen käyttää kaukojäähdytyksen tuotannossa.

(27.) Lämpöpumppuja voidaan hyödyntää myös muissa hukkalämmön lähteissä, kuten datakeskuksissa, teollisuuslaitoksissa tai elektrolyysilaitteissa (28).

Hyväksi esimerkiksi maanalaisten tilojen ilmanvaihdosta voidaan ottaa metron ilmanvaihto ja sen yhteydessä tehtävä lämmöntalteenotto. Torialueiden toimiminen aurinkokeräiminä ja siitä saatavan lämmön hyödyntäminen lämpöpumpun lämmönlähteenä toimii myös hyvin hukkalämmön hyödyntämisessä. (27.)

Teollisuudessa hukkalämpöä syntyy prosesseissa, datakeskuksissa, kasvihuoneissa sekä maataloudessa. Eri alojen teollisuuden prosessien lämmönlähteet vaihtelevat suuresti. Hukkalämmönlähteistä potentiaalisen edustuksen antavat jäähdytystä vaativat datakeskukset ja niiden jäähdytysratkaisut. Datakeskusten yleisin jäähdytystapa on ilmajäähdytys, jossa ilman lämpötila saattaa nousta 25–45 °C:n tasolle. Tämän tasoisen lämpötilan omaava hukkalämpö on hyödynnettävissä hetkittäin suoraan kaukolämpöjärjestelmässä. Kasvihuoneiden ja maatalouden rakennusten tilojen jäähdyttämisen tarpeesta syntyy hukkalämpöä. Kasvihuoneiden kohdalla hukkalämpöä syntyy lähinnä yllämmön talteenotosta. (27.)

Sähköasemien lämpöhäviöiden talteen ottaminen, kaukojäähdytyksen lämmönlähteet sekä muun muassa kattilalaitosten savukaasujen lämmön talteen ottaminen ovat energiateollisuuden hukkalämmön hyödyntämisen potentiaalisia kohteita. Savukaasujen lämmöntalteenoton hukkalämmön hyödyntämisen mahdollistaa lämpöpumppu. Sähköasemien lämpöhäviöt ovat varsin pieniä, mutta niitä on kaupunkialueilla paljon. Osa näistä sähköasemista ja muuntamoista ovat kapasiteetiltaan kuitenkin isoja ja niiden potentiaali voi kasvaa lämmityskauden sähkönkulutuksen noustessa. (27.)

6 SÄHKÖVERKON RESERVIMARKKINAT

Sähköntuotannon ja kulutuksen on oltava tasapainossa. Fingrid tasapainottaa reservimarkkinoiden avulla sähkön tuotantoa ja kulutusta. Sähköverkon taajuuden tasapainotila on 50 Hz. Kulutuksen ja tuotannon tasapaino suunnitellaan etukäteen sähkömarkkinaosapuolten toimesta. Reservit tasapainottavat käyttötunnin aikaisia poikkeamia. Reserveihin Fingridin ylläpitämillä markkinoilla luetaan voimalaitokset, kulutuskohteet ja energiavarastot, jotka pystyvät muuttamaan tehoaan tarpeen mukaan. Reservilajeja on erilaisia ja ne voidaan jakaa kolmeen ryhmään. Näitä ovat taajuuden vakautusreservit, taajuuden palautusreservit sekä korvaavat reservit. (29.)

Reservitoimittajilta vaaditaan säätökykyisen resurssin omistamista tai olemista säätökykyisen resurssin avoimen sähkön toimitusketjun osapuolena joko sähkönmyyjän tai tasevastaavan roolissa. Lisäksi vaaditaan sopimusta reservimarkkinoille osallistumisesta. Sopimus tehdään Fingridin kanssa. Reservikohteelta puolestaan vaaditaan kyseisen reservituotteen markkinapaikan edellytysten sekä teknisten vaatimusten täyttymistä. Lisäksi reservikohteen tulee sijaita Suomessa tai vaihtoehtoisesti sen tulee olla suoraan kytkettävissä Suomen sähköverkkoon. Reservitoimittaja voi tarjota säätökykyistä kapasiteettiaan vuosi- ja/tai tuntimarkkinoille. Vuosi- ja/tai tuntimarkkinoilla on samat tekniset vaatimukset. (30.)

6.1 Vuosituoton arvioiminen

Olettaen, että kaikki markkinoille jätetyt tarjoukset hyväksytään, on mahdollisen vuosituoton arvioimiseksi olemassa laskentakaava: Vuosituotto (€) saadaan kauppojen mukaisen hyväksytyt reservikapasiteetin (MW), ka-hinnan (€/MWh) ja pysyvyyden (h) tulolla. Laskentakaavassa käytetään keskihintana volyymipainotettua keskihintaa, joka saadaan tuontihinnoista painottaen hankintamäärää. Kaavan pysyvyys voi vaihdella 0–8760 h:n välillä. Pysyvyyden arvoon vaikuttavat muun muassa reservikohteen saatavuus ja hankintatunnit vuoden aikana. (31.)

6.2 Reservimarkkinoille osallistuminen

Osallistuminen reservimarkkinoille vaatii oikealla tavalla toteutettua ja oikeanlaista tiedonvaihtoa Fingridin ja reservitoimittajan välillä. Reservimarkkinoille osallistumista on useammanlaista. Kuvassa 4 on esitetty yksinkertainen kaavio reservimarkkinoille osallistumisesta. Kohde voi osallistua taajuusohjattuun käyttöreserviin, taajuusohjattuun häiriöreserviin, nopeaan taajuusreserviin, automaattiseen taajuudenhallintareserviin, säätösähkömarkkinoille ja säätökapasiteettimarkkinoille. (30.)



KUVA 4. Yksinkertaistettu reservimarkkinoilletuloprosessi (30)

Taajuusohjattuun käyttöreserviin (FCR-N) voi osallistua kohde, jonka sähkötehoa voidaan sekä lisätä että vähentää useasti tunnin aikana. FCR-N:n normaalitaajuusalue on 49,9–50,1 Hz. Taajuusohjatun käyttöreservin on pystyttävä ylös- ja alassäätöön. Ylössäädössä lisätään sähköntuotantoa ja vähennetään kulutusta. Alassäädössä toimitaan päinvastoin eli vähennetään tuotantoa ja lisätään kulutusta. (32.)

Taajuusohjattuun häiriöreserviin (FCR-D) on mahdollista osallistua sellaisten kohteiden, joiden sähköntuotannon kulutusta voidaan vähentää tai lisätä nopeasti. Taajuusohjatun häiriöreservin taajuus on taajuuden poiketessa normaalitaajuudelta enintään 50,5 Hz ja vähintään 49,5 Hz ja se aktivoituu automaattisesti taajuudenmuutoksista. (32.)

Nopeaa taajuusreserviä (FFR) Fingrid hankkii kansallisilta markkinoilta pienen inertian tilanteiden hallintaan. Markkinoille voi osallistua, kun on tehnyt FFR-markkinasopimuksen sekä suorittanut hyväksytysti säätökokeen. (33.) Pohjoismaisilta kapasiteettimarkkinoilta Fingridin hankkima automaattinen taajuuden palautusreservi (a FRR) on otettu käyttöön pohjoismaissa vuonna 2013.

Sen tehtävänä on sähköjärjestelmän taajuuden säätöalueen tehotasapainon palauttaminen suunniteltuun arvoon sekä taajuuden palauttaminen nimellistaajuuteen. (34.)

Säätösähkö- ja kapasiteettimarkkinat (m FRR) on Fingridin yhdessä muiden pohjoismaiden kantaverkkoyhtiöiden kanssa ylläpitämä pohjoismainen säätösähkömarkkina (35). Sähkönsäätömarkkinoille voi osallistua kohde, jonka säätäminen on mahdollista 15 minuutin kuluessa. Säätökapasiteettimarkkinoilla toimiva ja osallistuva reservitoimittaja jättää sitovat alas- ja ylössäätötarjoukset säätökykyisestä kapasiteetista säätösähkömarkkinoille. Jos tarjous käytetään, saavat reservitoimittajat tästä kapasiteettikorvauksen. (31.)

Säätökapasiteetilla varmistetaan taajuuden palautusreservin riittävä kulutuksen ja tuotannon välisen tasapainon ylläpitäminen sekä muiden siirtoverkkojen käyttövarmuuden takaamisen edellyttämät tarpeet. Näille markkinoille osallistuminen vaatii säätösähkömarkkinasopimuksen tekemistä Fingridin kanssa. (33.)

6.3 Sähkökattilat ja akkuvaraajat reservimarkkinoilla

Suomen ollessa yhä useammin sähkön viejänä tarvitaan alassäätöresurssia. Sitä ei voi ostaa naapurimailta, jos vientisuuntaan ei ole siirtokapasiteettia jäljellä. Tällainen niukkuus sähköjärjestelmän joustossa vaikuttaa sähkön hintaan. Niin sähkön vuorokausimarkkinoilla kuin reservimarkkinoillakin on nähty sekä negatiivisia hintoja että suurta heiluntaa sähkön hinnoissa. Erityisesti tuulivoiman lisääntyessä tuulisina päivinä muu sähköntuotanto käy minimiteholla. Tällöin alassäätöä eli tuotannossa alaspäin joustamista on niukasti tarjolla. Tuulettomina ja vähätuulisina päivinä puolestaan ylössäädössä eli ylöspäin joustossa on niukkuutta. (26.)

Sähköverkot hyötyvät sähkökattiloiden käytöstä kaukolämpöverkossa, koska sähköverkon kulutuksen ja tuotannon tasaaminen on helpompaa kattiloiden mahdollistaessa hetkellisen ylimääräsähkön käytön lämmöntuotantoon. Näin ollen sähkökattilat toimivat sähköverkojen automaattisina taajuuksien palautusreserveinä. (6.)

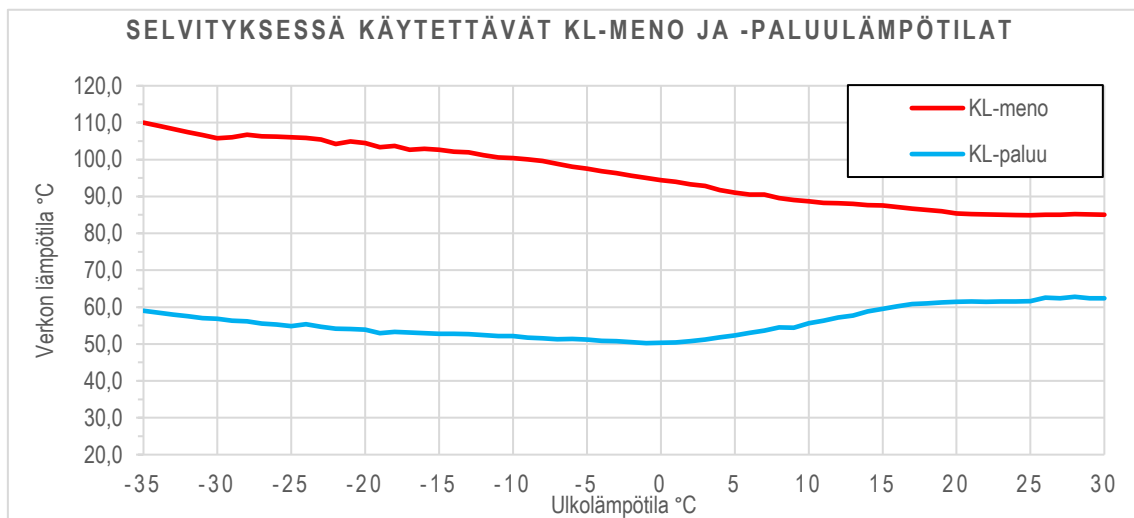
Reservin roolina on sähköjärjestelmän taajuuden palauttaminen nimellistaajuuteen ja taajuudensäätöalueen tehotasapainon palauttaminen suunniteltuun arvoon. Kun sähkökattilaa

tarjotaan automaattiseen taajuuden palautusreserviin, saadaan kapasiteettikorvausta ja käytetystä ylös- tai alassäätökapasiteetista saadaan energiakorvausta. Sähkökattila nostaa investointi- ja käyttökustannuksia, koska kaukolämmön suuret tehot vaativat kattilalle mittavan sähköliittymän.

(6.)

7 MITTAUSTRENDIT

Kaukolämmöntuottajalta pyydetään laskelmiin laitosten mittaustrendit, kuten aikaleimat, ulkolämpötila, lämmöntuotantopisteiden syöttötehot (ostolämpökohteet, bio-, öljy- ja kaasukattilat, pesuri jne.). Lisäksi tarvitaan päälämpölaitoksen meno- ja paluuveden lämpötilat sekä meno- ja paluupaineet verkkoon päin. Kuvassa 5 on esitetty eräässä lämpöhuollon kehittämisselvityksessä käytettävät kaukolämmön meno- ja paluuveden lämpötilat.



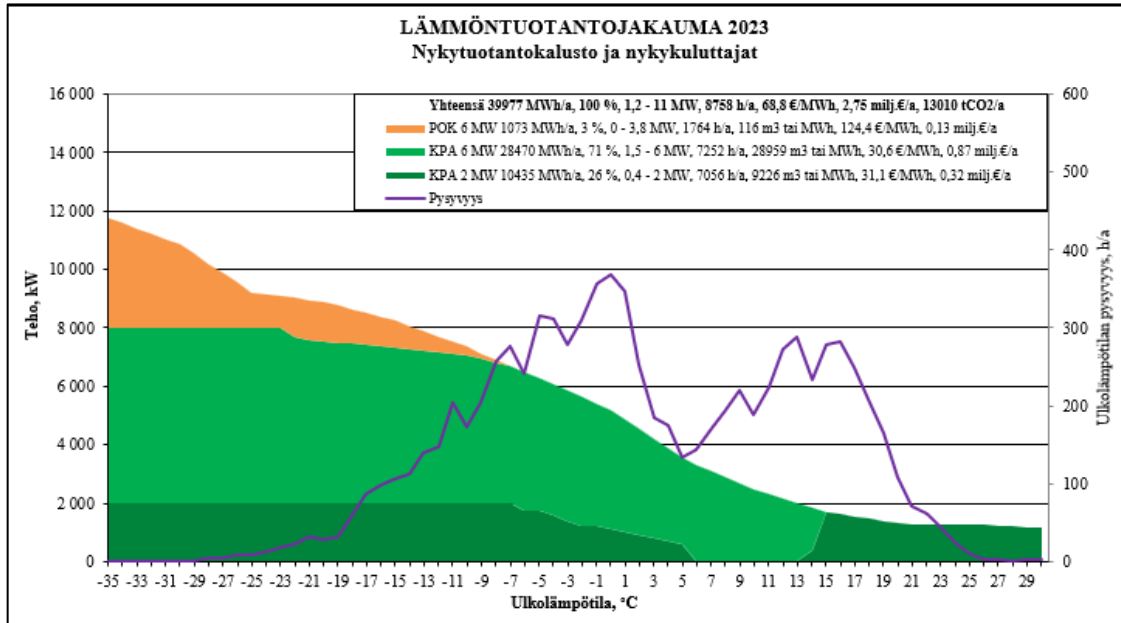
KUVA 5. Kaukolämmön meno- ja paluuveden lämpötilat (36)

Jos laitoksella on savukaasupesuri, tarvitaan myös pesurin jälkeinen paluulämpötila. Muita laitoksilta tarvittavia tietoja ovat muun muassa kattiloiden nimellistehot, minimisäätötehot, käytettyjen polttoaineiden hinnat, sähkön sisäänostohinta eriteltynä, verkoston liittymistehon kasvunopeus sekä nykyisen lämpöhuollon tilinpäätöstiedot.

7.1 Trendikäsittely

Saaduille lähtötiedoille tehdään trendikäsittely, jossa mittaustrendit koostetaan Planora Oy:n sisäisessä järjestelmässä ja analysoidaan sekä muodostetaan niistä teho- ja lämpötilakäyrät. Planora Oy:n sisäiseen järjestelmään syötetyistä arvoista Excel-ohjelma muodostaa valmiit teho-, energia-, kokonaistuotanto-, lämpötila- ja painekoosteen graafeineen.

Koosteista välitetään selvityslaskelmiin tehon ja ulkolämpötilan pysyvyydet sekä meno- ja paluuvedenlämpötilat. Saaduista arvoista koostetaan ensin laskentamalli, joka kuvastaa asiakkaan nykyistä tuotantotilannetta kalustoineen ja kuluttajineen. Jokaisesta vertailumallinnuksesta tehdään lämmöntuotantojakaumagraafi, jonka selitekentästä selviää energiatase- ja omakustannushintalaskelmien tulokset. Kuvassa 6 on esitetty laitoksen nykyinen lämmöntuotantojakauma.



KUVA 6. Lämpölaitoksen lämmöntuotantojakauma vuonna 2023 (36)

Selitekentästä nähdään koko lämmöntuotantojärjestelmän vuosituotantomäärän olevan 39977 MWh, kokonaistuotannon tuotanto-osuus on 100 %, tehoalue on 1,2–11 MW, tuotannon yksikköhinta on 68,8 €/MWh, tuotantokustannukset ovat 2,75 miljoonaa euroa ja tuotannon hiilipäästöt 13010 tCO₂/a. Tehoalue määritellään kattilan vuoden aikaisen tehon minimi- ja maksimitehoista.

Lisäksi kunkin mallinnuksen selitekentästä selviää kattilakohtainen vuosituotantomäärä, kokonaistuotannon tuotanto-osuus, tehoalue, käyttötuntimäärä, polttoaineen kulutus yksikköä kohti, tuotannon yksikköhinta ja tuotantokustannukset.

7.2 Mitoitustehojen määrittäminen

Muu kuin polttoon perustuva lämmöntuotantomuoto kannattaa mitoittaa kesäajalle, koska kaukolämmön menoveden priimaus (menoveden lämpötilan nostaminen verkon tarvitsemalle tasolle) on talvella haasteellista. Lämpöpumpuinvestoinnit tarvitsevat yleensä menoveden priimauksen. Vaihtoehtomallinnuksissa olevissa vaihtoehdoissa voi olla ratkaisuina muun muassa ilma-vesilämpöpumppu ja sähkökattila yhdistettynä akkuvaraajaan sekä näiden kombinaatio.

Vaihtoehtomallinnuksia tehtäessä on syytä ottaa huomioon muutamia tärkeitä mitoituksia. Tällaisia ovat muun muassa kaukolämpöverkoston kohdistuvissa muutoksissa tai uuden linjan rakentamisessa mitoittavat putkilinjojen lämpöhäviöt, jotka huomioidaan energiatase- ja kannattavuuslaskelmissa.

7.2.1 Lämpöpumpun mitoitus-teho

Mitoituksessa määritetään lämpöpumppulaitoksen maksimaalinen lauhdutusteho, virtaama ja priimaustehon tarve. Lämpöpumpun maksimilauhdutustehoa mitoittaessa otetaan laskelmissa huomioon kaukolämpöverkon paluuveden lämpötila, lämpöpumpulta saatava menoveden lämpötila, menoveden lämpötila priimauksen jälkeen sekä kaukolämmön tehontarve.

Priimaustehon tarve riippuu matalalämpötilaverkkoalueen mahdollisesta olemassaolosta sekä lämpöpumppulaitoksen syöttötehosta. Priimauksen tarve lisää kustannuksia. Primaustarvetta saadaan laskettua alentamalla menoveden lämpötilaa. Lämpöpumpun tarvitsema ”priimausteho” saadaan huomioimalla laskelmissa paluuveden lämpötila, lämpöpumpulta saatava menoveden lämpötila, menoveden lämpötila optimoinnin jälkeen sekä maksimilauhdutusteho. Maksimissaan priimaustehoa tarvitaan, kun menoveden lämpötila on korkein eli kulutushuipun aikana.

Planora Oy:n sisäisen järjestelmän Excel-taulukkoa tulkitaan tulosten osalta ja määritetään taulukon avulla lämpölaitoksen yhteyteen asennettavan lämpöpumppulaitoksen mitoitus-teho sekä lämpötila, johon asti ilma-vesilämpöpumpun kaukolämpöverkon kesäajan lämmöntuotanto riittää.

Parhaimmillaan ilma-vesilämpöpumpun COP-arvo voi olla noin 3 ja vuositasolla jatkuvalla käytöllä sen on arvioitu olevan 2,0-2,4. Laskelmissa käytetään COP-arvoa 2,1 ja näin ollen huomioidaan

ilma-vesilämpöpumpun lämmöntuotannon ajoittuminen lähes koko vuoden ajalle, myös ihanteellisten ulkolämpötilojen ulkopuolelle.

7.2.2 Sähkökattilan mitoitusteho ja akun koko

Mittaustrendien perusteella määritellään sähkökattilan teho ja akun koko tietyillä kriteereillä. Sähkökattilaa ja teräsakua mitoittaessa huomioidaan muun muassa akun lataus- ja purkuaika vuorokaudessa, paluuveden lämpötila kaukolämpöverkosta akkuun, akun latausteho ja purkuteho (kulutuksen keskiteho). Teräsakun mitoitus tapahtuu yhden vuorokauden toimintajaksoissa sekä ilta- tai yöaikaan sähkökattilalla tapahtuvalla latauksella. Teräsakun lataustehoon vaikuttavat akun latausaika sekä latausenergia (= akun varauskapasiteetti). Latausteho määrittää sähkökattilan tavoitetehon.

Lämpöakun varauskapasiteettia sekä akua lataavan sähkökattilan mitoitustehoa määriteltäessä huomioidaan akun kesällä tarvitsema vuorokautinen lämpöenergia. Lisäksi huomioidaan kaukolämpöakun teoreettiset vuosilämpöhäviöt, jotka välitetään energiataselaskelmiin.

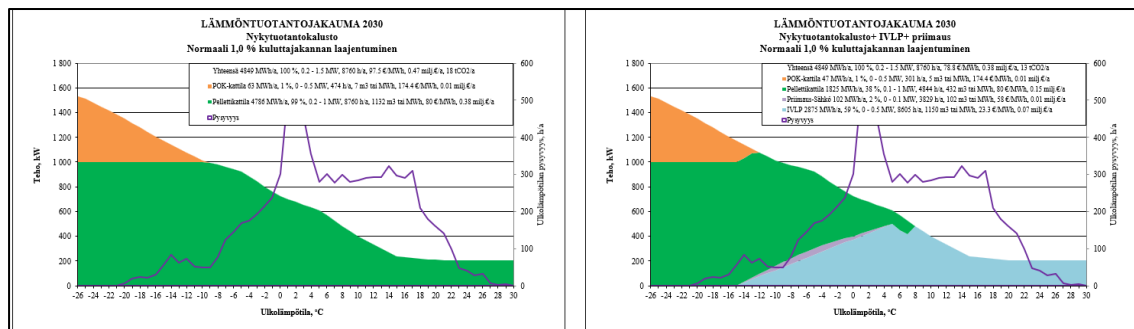
Akun mitoituksella pyritään siihen, että se kattaa kesäaikaisen lämpöenergiantarpeen. Kohteeseen valittavan teräsakun keskimääräinen purkuteho määräytyy lataus- ja purkuaikojen suhteessa. Halvemman markkinasähkön vuoksi on kannattavaa ladata akua iltaisin ja öisin ja purkaa sen varaus päivisin.

8 ESIMERKKEJÄ MALLINNUKSISTA

Tulevaisuuden lämmöntuotannon jakauma keskiarvotehoiseen ja tuotantokustannuksineen muodostetaan mittaustrendien mukaisen nykytuotantojakauman pohjalta. Mallinnuksissa huomioidaan eri kattiloiden käynnistymisjärjestys, minimisäätötehot sekä liittymistehon kasvunopeus tulevaisuudessa. Tulevaisuuden lämmöntuotannon kaukolämpöenergiämäärään perustuva energiataselaskenta toimii pohjana tarkasteltaville uusille lämmöntuotannon vaihtoehdoille. Tässä luvussa esitetään muutama esimerkki erilaisista lämpöhuollon kehittämissuunnitelman mallinnuksista.

8.1 Lämpöpumppu

Ilima-vesilämpöpumppu toimii peruskuorman tuotannossa kesällä. Tehontuotto hiipuu ulkolämpötilan laskiessa ja loppuu noin $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$:ssa. Järkevällä lämpöpumpun COP-arvolla voidaan kaukolämmön verkkoon syöttämän veden lämpötilaa nostaa noin $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$:een. Tyypillisesti kaukolämpöverkossa käytetyllä menoveden lämpötiläkäyrällä riittää ilma-vesilämpöpumpun tuottama kaukolämmön menoveden lämpötila 85-asteisena ilman priimausta noin $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$:n ulkolämpötilaan saakka. Menoveden lämpötilaa nostavaa priimausta tarvitaan tästä lämpötilasta eteenpäin. Kuvassa 7 esitetään laitoksen nykytuotantokaluston sekä nykytuotantokalustoon lisätyn ilma-vesilämpöpumpulaitoksen lämmöntuotantojakauma tulevaisuudessa.



KUVA 7. Lämmöntuotantojakauma vuonna 2030 nykytuotantokalustolla sekä nykytuotantokalustoon yhdistettynä IVLP (36)

Lämmöntuotantojakauman graafista nähdään ilma-vesilämpöpumpun toimintalämpötilat. Kesäaikana aina $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$:n ulkolämpötilaan saakka ilma-vesilämpöpumppu jaksaa pyörittää

peruskuormaa verkkoon. Kovimmilla pakkasilla sen teho hiipuu. Lisäksi graafin selitekentästä nähdään priimaustehon arvo ja vaihteluväli.

Ilma-vesilämpöpumppu vähentää polton tarvetta laitoksella. Priimauksen toteutukseen ja sen kustannuksiin vaikuttavat lämpölaitoksen nykyiset lämmöntuotantomuodot ja se, millä lämmöntuotantomuodolla priimaus tehdään. Lisäksi toteutukseen ja kustannuksiin vaikuttaa valitun lämmöntuotantomuodon sijainti priimausta tarvitsevaan tuotantoon nähden. Kuvassa 7 olevassa ilma-vesilämpöpumppulaitoksessa priimaus tapahtuu erillisellä sähköisellä lämpötilan priimauskattilalla.

8.2 Sähkökattila ja akkuvaraaja

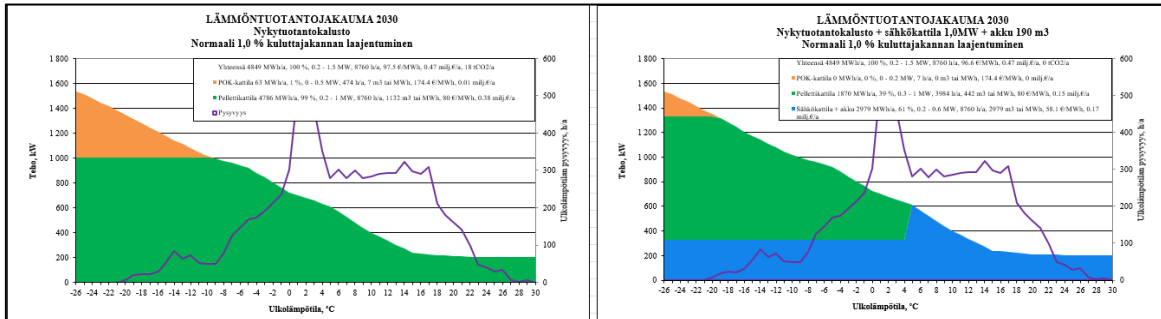
Sähkökattila toimii kaukolämmöntuotannossa lämpöakun lataajana. Sitä hyödynnetään lämpölaitoksilla halvan sähkön aikana, jolloin on kannattavaa ladata varaajaa sähkökattilalla ja purkaa akku kaukolämpöverkkoon kalliin sähkön aikana. Jokaiselle lämpölaitokselle määritetään mitoitusteholtaan sopivan kokoinen sähkökattila akkuineen.

Laskennoissa sähkökattilan talviaikaisen tehon osuus (ulkolämpötila $< +5^{\circ}\text{C}$) on muuta vuodenaikaa pienempi, koska talviaikaan sähkökattilan kannattavuus on matala johtuen korkeimmista sähkön hinnoista. Talviaikaisen tehon osuus sähkökattilan nimellistehosta vaihtelee yleensä 10–35 %:n välillä. Osuuteen vaikuttaa sähköhinnan vaihtelu vuorokausitasolla.

Lyhytaikaiseen lämmönvarastointiin (1–24 h) mitoitettava lämpöakku on tyypillisesti vettä sisältävä teräsrakenteinen varaaja, joka voidaan kytkeä suoraan kaukolämpöverkkoon tai epäsuorasti lämmönvaihtimen avulla. Lämpöakun käyttöön soveltuvin aika on kesäisin, mutta muinakin vuodenaikoina sitä voidaan käyttää joitain tunteja kerrallaan kulutuspiikkien tasaamiseen.

Paineistamattomaan akkuun varastoitavan veden lämpötilaa pidetään alle 100°C :ssa, joten akun yhteydessä tarvitaan lähes aina menoveden lämpötilan priimausta. Se voidaan suorittaa sivupriimauksena muun muassa laitoksella olevalla lämpökattilalla. Mitoitustilavuus tällaisella akulla vaihtelee satojen ja tuhansien kuutiometrien välillä ja se on järkevintä sijoittaa olemassa olevan lämpölaitoksen yhteyteen. Tämä mahdollistaa akun lataamisen muillakin tuotantomuodoilla.

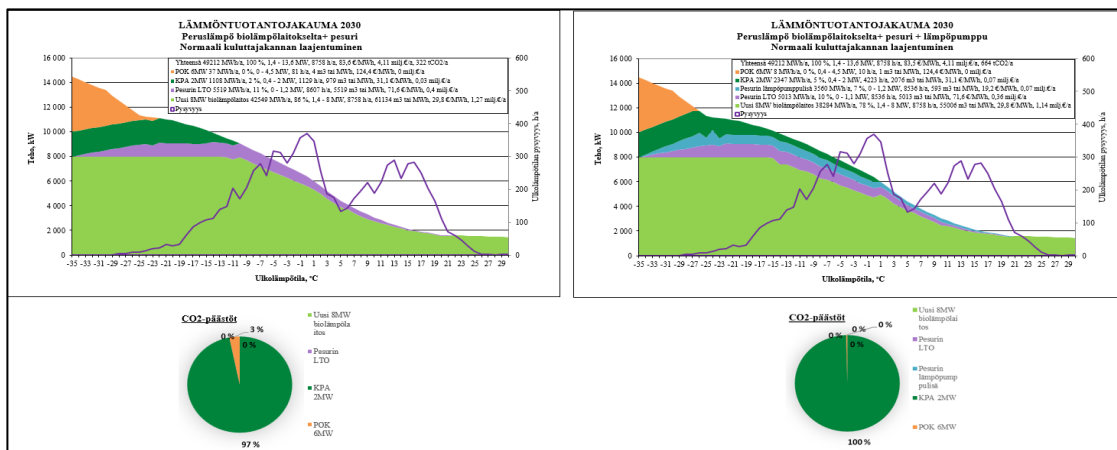
Kuvan 8 graafissa esitetään lämpölaitoksen lämmöntuotantojakaumaa nykykalustolla versus lisänä sähkökattila varaajalla. Graafin sähkökattila + akku-otsikoinnilla tarkoitetaan sähkökattilalla tuotettua ja akun kautta verkkoon purettua keskitehoa.



KUVA 8. Lämmöntuotantojakauma vuonna 2030 nykytuotantokalustolla (vas.) sekä siihen lisättyllä sähkökattilalla ja varaajalla (oik.) (36)

8.3 Savukaasupesuri

Savukaasupesurin tarkoituksena on suodattaa lämpölaitosten hiukkaspäästöjä sekä ottaa hukkalämpöä talteen. Investointina savukaasupesuri on taloudellisesti järkevä vaihtoehto nostamaan laitosten energiatehokkuutta sekä rajoittamaan päästöjä nykyisten vaatimusten tasolle. Kun pesurille lisätään lämpöpumppu, säästetään lisää lämmöntuotannon polttoainekuluissa. Kuvassa 9 esitetään savukaasupesurin vaikutusta ilman lämpöpumppua ja lämpöpumpulla.



KUVA 9. Lämpöpumpun vaikutus savukaasupesurin toimintaan (36)

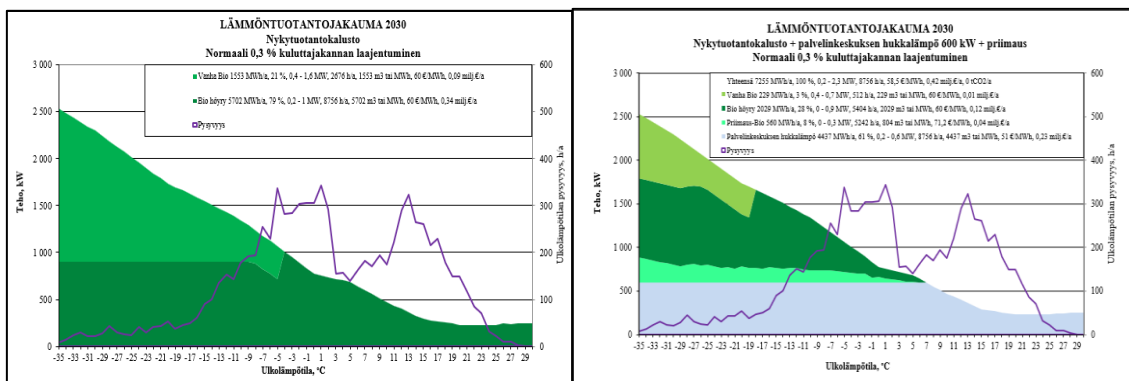
Graafeista huomataan, että lämpöpumpun lisääminen savukaasupesurille vähentää polttoaineen kulutusta. Pelkän pesurin ollessa käytössä laitoksen polttoaineen kulutus on yhteensä noin 62 117 ”yksikköä”, kun taas pumpun lisäyksellä polttoaineen kulutus tippuu noin 57 083 ”yksikköön”.

Polttoaineen kulutuksen pieneneminen puolestaan vähentää laitoksen hiilidioksidipäästöjä. Kostean biopolttoaineen käyttäminen tai palamisilman kostutus myös lisää savukaasupesurin lämmöntalteenoton tehokkuutta.

8.4 Hukkalämpö

Palvelinkeskusten hukkalämpöä voidaan ottaa kaukolämpöön täysimääräisesti ympäri vuoden. Palvelinkeskusten on hyvä sijaita korkeintaan muutaman kilometrin päässä kulutuskohteesta, että niiden lämpöenergian hyödyntäminen on kannattavaa. Yhtenä vaihtoehtona on, että lämmön myyjä tekee vaadittavat investoinnit, joten lämmönostaja pääsee ostolämmön osalta pienillä kustannuksilla. Oleellista näissä tapauksissa on ostolämmölle määräytyvä hinta.

Lisäksi lämmönostajan kannalta on tärkeää, kuinka lämmintä hukkalämpöä on saatavilla. Tarpeeksi lämmin lämpöenergia ei vaadi lämpöpumppua nostamaan lämpötilaa tarvittavalle tasolle. Kuvassa 10 esitetään graafi palvelinkeskukselta ostettavasta hukkalämmöstä. Graafista nähdään myös, kuinka hukkalämmön hyödyntäminen vähentää poltettavien lämmöntuotantomuotojen osuutta lämmöntuotannossa.



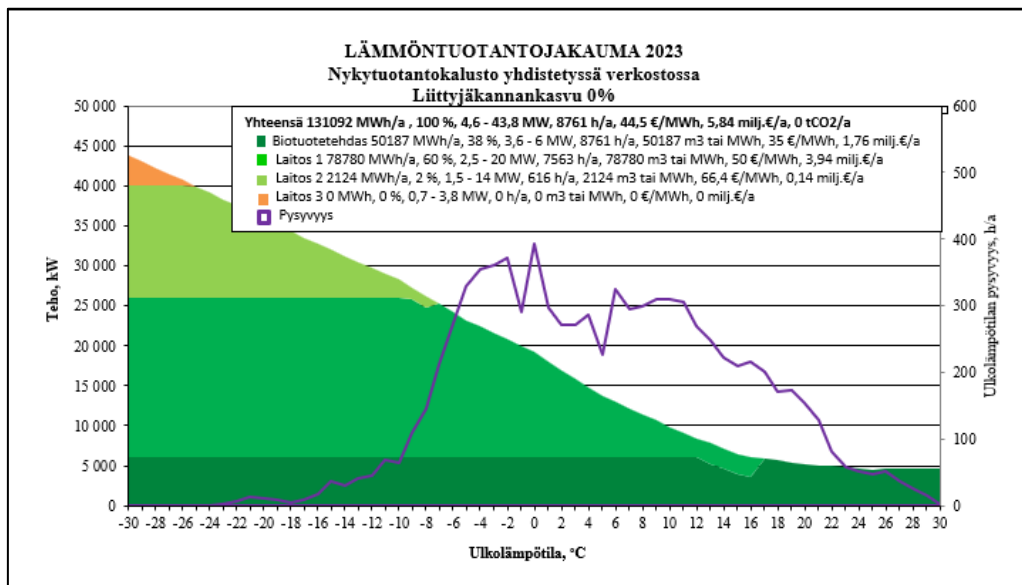
KUVA 10. Esimerkki hukkalämmön hyödyntämisestä (36)

9 KEHITYSSUUNNITELMAN TEKEMINEN JA HUOMIOITAVAT ASIAT

Tässä luvussa kerrotaan kehityssuunnitelman teosta ja siihen liittyvistä laskelmista. Selvityksien tavoitteena on tekninen toteutuskelpoisuus kaikissa kulutusilanteissa. Lisäksi tutkitaan vaihtoehtoisia lämmöntuotantomuotoja, laitosten optimaalista sijoitusta sekä laitosten kokoa ja käytettävyyttä rajoituksineen. Tavoitteena on määrittellä muun muassa investoinnit ja niiden toteuttamisen ajankohdat. Tässä esimerkissä on lisäksi kyseessä kahden taajaman yhdistäminen yhdeksi verkostoksi.

9.1 Nykytilanne

Nykytilanteessa taajama 1:n huipputehot ovat noin 33 MW ja vuosituotantomäärät noin 83 GWh. Taajama 2:ssa vastaavat arvot ovat 14 MW ja 45 GWh. Kummankaan kuluttajakannan muutoksissa ei ole tiedossa suuria muutoksia, joten tältä osin uusille verkkoinvestoinneille ei taajamissa ole tarvetta (liittymisteho 0 % / vuosi). Kuvassa 11 esitetään lämmöntuotantojakauma taajamien yhdistämisen jälkeen.



KUVA 11. Taajamien lämmöntuotantojakauma (36)

Tulevaisuudessa on tarkoitus vähentää toisesta taajamasta yhden laitoksen osalta lämmöntuotannon ostaminen ja käyttää kaukolämpöverkoston energiansaantiin alueella

sijaitsevan biotuotetehtaan hukkalämpöä. Taajamien yhdistämistä varten on rakennettava uutta kaukolämpölinjaa sekä huomioitava mahdolliset välipumppaamoinvestoinnit.

Uuden yhdyslinjan koon määrittävät tarkasteltavat tuotantovaihtoehdot sekä syöttötehot. Eri putkilinjoille tarvittavien putkikokojen määrittämistä ja verkoston saneeraustarvetta varten on laskettava siirtotehot ja virtaamat eri linjoissa ja huomioitava laskelmissa tehopoistumat, erilaiset lämpötilat ja tuotantopoikkeamat. Energialaskelmissa on myös huomioitava uuden putkilinjan lämpöhäviöt.

9.2 Tarkasteluun valitut vaihtoehdot

Taajamien yhdistämisessä valitaan tarkasteluun vaihtoehtoisista tuotantomuodoista polttoon perustuvista lämmöntuotantomuodoista pellettilämpölaitos, koska sen investoinnit hakelämpölaitokseen verrattuna ovat pienemmät. Polttoon perustumattomista lämmöntuotantomuodoista jatkokäsittelyyn valikoituvat ilma-vesilämpöpumppulaitos sekä sähkökattila ja lämpöakku.

Kaukolämmöntuotannon tulevaisuuden tilanteita näissä taajamissa tarkastellaan erilaisilla mallinuksilla ja tuotantomuodoilla. Laskentamallinuksissa kuvataan nykytilannetta nykykalustuksella ja kuluttajilla sekä tulevaisuuden tilannetta, jossa on huomioitu kuluttajakannan muutokset. Mallinuksien vertailukelpoisuus toisiinsa varmistetaan käyttämällä kaikissa tarkasteluvuotena samaa vuotta. Vaihtoehtomallinnukseen käytetään lämmöntuotanto- ja varastoimisvaihtoehtojen luokittelun ja karsinnan jälkeen lopputarkasteluun hyväksytyjä tuotantomuotoja ja niiden yhdistelmiä. Jotta on mahdollista arvioida ja vertailla kunkin vaihtoehtomallinnuksen kannattavuudet, lasketaan jokaiselle mallille lämmöntuotannon vuosikustannukset sekä omakustannushinnat.

Nykytilannetta kuvaa malli Nyky 2023, josta johdetaan malli Nyky 2030. Nyky 2030 -mallista nykytuotantomuodoilla jatkamisen malliin pohjautuvia vaihtoehtomalleja on 7 kpl. Tarkasteltavat vaihtoehtomallit esitellään taulukossa 1.

Taulukko 1. Vaihtoehtomallit tarkasteluvuosittain (36)

Vaihtoehtomalli	Tarkasteluvuosi	Uuden tuotannon ja kulutuksen muoto	Tilanteen poikkeavuudet
Nyky 2023	2023	Nykytilanne	Nykytuotantokalusto
Nyky 2030	2030	KL-kulutuksen kehitys - vertailumalli muille	Nykytuotantokalusto
Malli A	2030	10 MW Lämmön osto teollisuuslaitoksen voimalaitokselta	Tarvitavat yhdyslinjat rakennettu
Malli B	2030	15 MW Lämmön osto teollisuuslaitoksen voimalaitokselta	Tarvitavat yhdyslinjat rakennettu
Malli C	2030	20 MW Lämmön osto teollisuuslaitoksen voimalaitokselta	Tarvitavat yhdyslinjat rakennettu
Malli D	2030	Kuten Malli A ilman vanhaa lämmöntuotantolaitosta+10 MW lämmönosto teollisuuslaitokselta	Tarvitavat yhdyslinjat rakennettu
Malli E	2030	Kuten Malli D + oma 8 MW pellettilaitos	Tarvitavat yhdyslinjat rakennettu
Malli F	2030	IVLP-järjestelmä 15 MW	Tarvitavat yhdyslinjat rakennettu
Malli G	2030	Sähkökattila 30 MW varaajalla ja 4100 m ³ akulla	Tarvitavat yhdyslinjat rakennettu

9.3 Vaihtoehtojen investointikustannukset

Tulevaisuuden vaihtoehtoiset lämmöntuotantomallit jaotellaan niihin kohdistuvien investointien mukaan muun muassa seuraavasti: nykyiset lämpökeskukset, uudet polttoon perustuvat lämpölaitokset, ilma-vesilämpöpumpulaitos, sähkökattila akkuvaraajalla ja verkostohankinnat. Päälaitteiden investointien lisäksi lämmöntuotantoinvestoinneille eritellään lisäinvestointeja, jotka sisältävät muun muassa rakennustekniset työt, prosessiputkistot, liittynän kaukolämpöverkkoon sekä varusteet. Lisäksi arvioidaan yleiskuluja investointien kokonaiskuluihin lisättäväksi. Nämä saadut investointikustannukset ja pääomakulut välitetään mallinuksien omakustannushintalaskelmiin. Uusien investointien huolto- ja ylläpitokulut määritetään kokemusperäisten kertoimien ja investointiarvon perusteella.

Tarkastelluissa malleissa kaukolämpöverkostoon kohdistuvia investointihankintoja esiintyy kaikissa malleissa, koska verkostojen yhdistäminen vaatii uuden yhdyslinjan rakentamista olemassa oleviin kaukolämpöverkkoihin sekä osittaista vanhan verkoston saneerausta. Uusien investointien huolto- ja ylläpitokulut määritetään kokemusperäisten kertoimien ja investointiarvon perusteella.

9.4 Omakustannushinnat ja kannattavuus

Laskettaessa kannattavuuksia ja omakustannushintoja otetaan huomioon seuraavia kuluja ja yksikköhintoja: polttoaineiden ja ostoenergian hinnat, sähkön hinnat, rahoitusarvot ja nykyisen kaukolämpöjärjestelmän kustannukset.

Eri vaihtoehtomallien kannattavuutta tarkastellaan niille laskettavan omakustannushinnan perusteella. Omakustannushintaa laskettaessa täytyy muun muassa huomioida nykyiset huolto- ja ylläpitokulut, lämmöntuotannon muuttuvat kustannukset ja uusien investointien pääomakulut.

Omakustannushinnan todellista arvoa ei saada, elleivät laitoksen nykyiset pääomakulut, kiinteät kulut, huolto- ja ylläpitokulut sekä poistot ole saatavilla. Vaihtoehtomallien energiataselaskelmissa käsitellään muun muassa lämpölaitosten käynnistysjärjestykset, kattiloiden minimisäätötehot, menolämpötilan priimaustarve, matalalämpötilaverkkoalue sekä lämmöntuotannon ja verkoston mahdolliset rajoitteet. Tässä energiataselaskelmassa sähkökattilan käyttöä arvioidaan keskimääräisenä tuotantoarviona.

Jokaisesta vertailumallinnuksesta tehdään lämmöntuotantojakaumagraafi, jonka selitekentästä selviää energiatase- ja omakustannushintalaskelmien tulokset. Kunkin mallinnuksen selitekentästä selviää vuosituotantomäärä (MWh/a), kokonaistuotannon tuotanto-osuus (%), tehoalue (MW-MW), käyttötuntimäärä (h/a), polttoaineen kulutus yksikköä kohti (m³ tai MWh), tuotannon yksikköhinta (€/MWh) ja tuotantokustannukset (milj.€/a). Selitekentästä selviää myös koko järjestelmää koskevat vastaavat arvot.

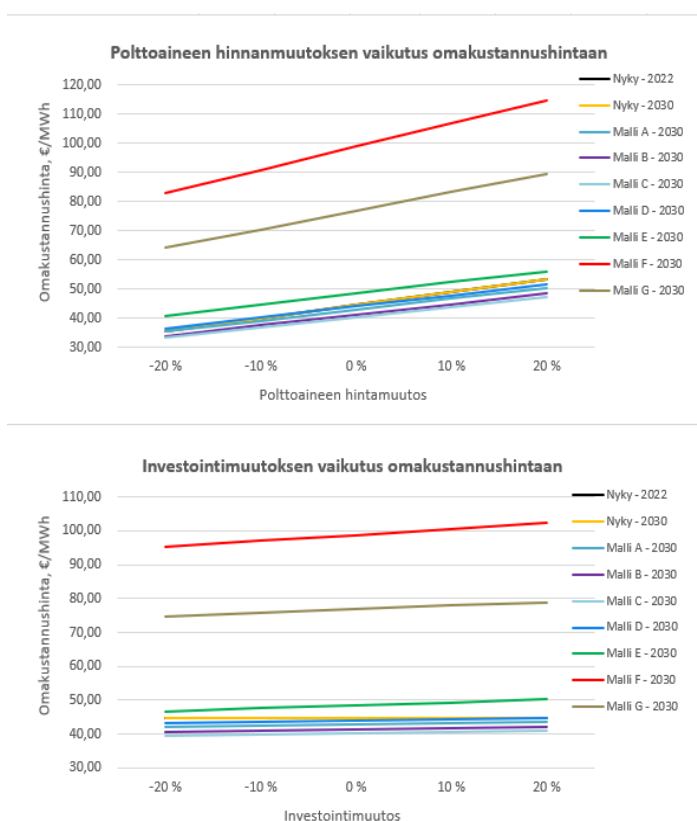
Uusien investointien huolto- ja ylläpitokulut määritetään kokemusperäisten kertoimien ja investointiarvon perusteella. Lämpölaitoksilla kyseinen kerroin on 3,0 %, lämpöpumpuilla ja sähkökattiloilla 3,0 %, pumppaamo- ja lämmönsiirrasemilla 2,0 % ja verkostolla 1,5 %. Luonnollisesti kulut ovat heti investoinnin jälkeen alemmat kuin investointiajan loppupuolella. Uudet kiinteät kulut muodostuvat muun muassa uusiin investointeihin liittyvistä hoito- ja hallintokuluista sekä vakuutusmaksuista.

Omakustannushinta- ja kannattavuuslaskelmissa huomioidaan myös seuraavat yksikköhinnat ja kulut: polttoaineiden ja ostoenergian hinnat, sähkön hinta, lämpöpumppujen keskimääräinen COP-

arvo, verkoston ja lämpöakun lisälämpöhäviöt, rahoitusarvot (lainan korko 4,0 %, lainojen kuoletusajat).

9.5 Herkkyystarkastelu

Kaikille lämmöntuotannon vaihtoehtomalleille suoritetaan herkkyystarkastelu, jossa muuttuvina tekijöinä käytetään polttoaineen hintaa ja investoinnin arvoa -20 % ja +20 % välillä mallinnettuun tilanteeseen nähden. Eri tuotantovaihtoehdot vaikuttavat hyvin eri tavalla kaukolämmön voittomarginaaliin, jos energian (lämpö, lämmön ja sähkön yhteistuotanto) myyntihinta pidetään samana. Toisten mallien omakustannushinnat ovat enemmän riippuvaisia polttoaineen hinnan ja siten tuotantokustannusten muutoksista, kun taas toisilla malleilla investoinnin suuruuden muutos vaikuttaa enemmän omakustannushinnan muutokseen. Kuvasta 12 nähdään polttoaineen hinnanmuutoksen ja investointimuutosten vaikutus omakustannushintaan kullakin mallinnuksella.



KUVA 12. Polttoaineen hinnanmuutosten ja investointimuutosten vaikutus omakustannushintaan (36)

10 PIPO-ASETUKSEN VAIKUTUKSET

Nykyisten savukaasupäästöjen päästöraja-arvojen tiukentuessa tulevaisuudessa on kehittämissuunnitelmassa otettava huomioon laitoksen nykykalustuksen kunto ja mahdolliset tulevat saneeraukset. Raja-arvot on otettava huomioon investointeja laskiessa ja mietittäessä vanhojen laitosten saneerauksen kannattavuutta. Täytyy puntaroida saneerauksen kustannustehokkuutta verrattuna esimerkiksi uuden laitoksen investointiin.

Valtioneuvoston asetuksessa (VNA 1065/2017) käsitellään keskisuurten energiantuotantoyksiköiden ja -laitosten ympäristönsuojeluvaatimuksia. Asetuksen soveltamisalana ovat muun muassa kiinteää, nestemäistä tai kaasumaista polttoainetta käyttävät energiantuotantoyksiköt sekä energiantuotantolaitokset. Energiantuotantoyksiköistä asetusta sovelletaan polttoaineteholtaan vähintään yhden megawatin, mutta alle 50 megawatin yksiköihin. Energiantuotantolaitoksista asetusta sovelletaan sellaisiin laitoksiin, joihin kuuluu yksi tai useampi asetuksen soveltamisalaan kuuluva keskisuuri energiantuotantoyksikkö. Asetuksessa on määrätty päästöraja-arvot hiukkasten, typen oksidien ja rikkidioksidin määrille. Asetus on tullut noudatettavaksi 20. joulukuuta 2018 alkaen uusille energiantuotantoyksiköille, joiden raja-arvot on esitelty taulukossa 2. (37.)

Taulukko 2. Uusien energiantuotantoyksiköiden päästöraja-arvot (ei polttomoottori eikä kaasuturbiini) (37)

		Hiukkaset mg/m ³ n	NO _x (laskettuna NO ₂) mg/m ³ n	SO ₂ mg/m ³ n
Kiinteät polttoaineet O ₂ = 6 %	Kiinteä biomass ¹	50 (1 ≤ P ≤ 5 MW) 30 (5 < P ≤ 20 MW) 20 (P > 20 MW)	375 (1 ≤ P ≤ 5 MW) 300 (P > 5 MW)	200 ²
	Muut kiinteät polttoaineet	50 (1 ≤ P ≤ 5 MW) 30 (5 < P ≤ 20 MW) 20 (P > 20 MW)	270 (P ≥ 1 MW, hiili) 500 (1 ≤ P ≤ 5 MW, muut polttoaineet) 300 (P > 5 MW, muut polttoaineet)	400
Nestemäiset polttoaineet O ₂ = 3 %	Kevyt polttoöljy		200	
	Muut nestemäiset polttoaineet	50 (1 ≤ P ≤ 5 MW) 20 (P > 5 MW)	300	350
Kaasumaiset polttoaineet O ₂ = 3 %	Maakaasu		100	
	Muut kaasumaiset polttoaineet		200	35 ^{3,4}

Raja-arvot jo olemassa oleviin ja polttoaineteholtaan yli viiden megawatin energiantuotantoyksiköihin astuvat voimaan 1. päivänä tammikuuta 2025. Näiden päästöraja-arvoja on esitelty taulukossa 3. Yli viiden megawatin energiantuotantoyksiköt noudattavat siirtymäkauden päästöraja-arvoja 1. päivään tammikuuta 2025 asti. Siirtymäkauden päästöraja-arvot on esitelty taulukossa 4. Lisäksi raja-arvot vähintään yhden megawatin, mutta enintään viiden megawatin olemassa oleville yksiköille astuvat voimaan 1. päivä tammikuuta 2030 alkaen. Raja-arvot esitelty taulukossa 5. (37.)

Taulukko 3. Polttoaineteholtaan yli viiden megawatin yksiköiden päästöraja-arvot (ei polttomoottoreille eikä kaasuturbiineille) (37)

		Hiukkaset mg/m ³ n	NO _x (laskettuna NO ₂) mg/m ³ n	SO ₂ mg/m ³ n
Kiinteät polttoaineet O ₂ = 6 %	Kiinteä biomassa ¹	50 (5 < P ≤ 20 MW) 30 (P > 20 MW)	450	200 ²
	Muut kiinteät polttoaineet	50 (5 < P ≤ 20 MW) 30 (P > 20 MW)	600 (turve) 420 (hiili) 650 (muut polttoaineet)	500 (5 < P ≤ 20 MW, turve) 1 100 (5 < P ≤ 20 MW, hiili ja muut polttoaineet) 400 (P > 20 MW)
Nestemäiset polttoaineet O ₂ = 3 %	Kevyt polttoöljy		200	
	Muut nestemäiset polttoaineet	30	650	350 ³
Kaasumaiset polttoaineet O ₂ = 3 %	Maakaasu		200	
	Muut kaasumaiset polttoaineet		250	35 ^{4,5}

Taulukko 4. Siirtymäkauden päästöraja-arvot (37)

Kattilan polttoainetehto (P)	Hiukkaset mg/m ³ n	NO _x (laskettuna NO ₂) mg/m ³ n	SO ₂ mg/m ³ n
Nestemäiset polttoaineet ²	O ₂ = 3 %	O ₂ = 3 %	O ₂ = 3 %
1 ≤ P ≤ 15 MW	140 (200) ³	900	350 (850) ³
15 < P < 50 MW	50 (140) ³	600	350 (850) ³
Kaasumaiset polttoaineet		O ₂ = 3 %	
1 ≤ P ≤ 15 MW		400	
15 < P < 50 MW		300	
Puu ja muut kiinteät biopolttoaineet ^{4,5}	O ₂ = 6 %	O ₂ = 6 %	O ₂ = 6 %
1 ≤ P ≤ 5 MW	300 (375)	450 (500)	200
5 < P ≤ 10 MW	150 (250)	450 (500)	200
10 < P < 50 MW	50 (125)	450 (500)	200
Turve	O ₂ = 6 %	O ₂ = 6 %	O ₂ = 6 %
1 ≤ P ≤ 5 MW	300 (375)	600 (625)	500
5 < P ≤ 10 MW	150 (250)	600 (625)	500
10 < P < 50 MW	50 (125)	600 (625)	500
Hiili	O ₂ = 6 %	O ₂ = 6 %	O ₂ = 6 %
1 ≤ P < 50 MW	50 (140)	420 (550)	1 100

Taulukko 5. Olemassa olevien energiatuotantoyksiköiden päästöraja-arvot (1 MW <5 MW yksiköille, ei polttomoottoreille eikä kaasuturbiineille) (37)

		Hiukkaset mg/m ³ n	NO _x (laskettuna NO ₂) mg/m ³ n	SO ₂ mg/m ³ n
Kiinteät polttoaineet O ₂ = 6 %	Kiinteä biomassa ¹	50	450	200 ²
	Muut kiinteät polttoaineet	50	600 (turve) 420 (hiili) 650 (muut polttoaineet)	500 (turve) 1 100 (hiili ja muut polttoaineet)
Nestemäiset polttoaineet O ₂ = 3 %	Kevyt polttoöljy		200	
	Muut nestemäiset polttoaineet	50	650	350
Kaasumaiset polttoaineet O ₂ = 3 %	Maakaasu		250	
	Muut kaasumaiset polttoaineet		250	200 ³

11 YHTEENVETO

Työn tarkoituksena oli kertoa kaukolämpöyhtiöille tehtävien kattavien kehittämissuunnitelmien laatimisesta. Opinnäytetyö tehtiin Planora Oy:n toimeksiannosta. Tavoitteena oli pohtia vaihtoehtoisia tuotantomuotoja lämpöyhtiöiden nykykalustuksen rinnalle ja korvaamiseksi sekä tarkastella vaihtoehtoja hiilineutraalin lämmöntuotannon lisäämiseen ja fossiilisten polttoaineiden korvaamiseen.

Suomessa kaukolämpö on tehokasta ja sitä tuotetaan monipuolisesti. Vaikka kaukolämmön tulevaisuuden näkymät ovat positiiviset, se tarvitsee edelleen saneerauksia, investointeja ja kehittämistä myös tulevaisuudessa päästäksemme päästöttömäksi yhteiskunnaksi. Vanhempien laitoksien on investoitava savukaasujen puhdistukseen ja samalla myös katsottava tulevaisuuden pyrkimyksiin hiilineutraalista tulevaisuudesta.

Tulevaisuutta ajatellen tuleekin helposti mietittyä lämpöhuollon päästöasioita. Olisi ihanteellista, jos ratkaisuksi löytyisivät pelkästään fossiilivapaat ratkaisut ja, mikä parasta, täysin polttoon perustumattomat järjestelmät. Pelkästään imago-syistä ei kannata investoida polttamattoman energian hankintaan, koska se saattaa muodostua omakustannushinnaltaan kalliimmaksi ratkaisuksi. Muutama olennainen seikka on hyvä muistaa tarjotessa lämpöyhtiölle suositeltavia toimenpiteitä laitoksen kehittämiseen: investointien järjestyminen, polttoaineiden saatavuus ja kannattavuus.

Koska tällä hetkellä Suomessa riittää polttoainetta poltettavaksi, tulee polttoon perustuvasta lämmöntuotannosta monesti kustannuksiltaan edullisempi vaihtoehto niin sen toimittajalle kuin kuluttajallekin. Tosin energiakriisi on nostanut polttoaineiden hintoja ja vaikeuttanut saatavuutta.

Nykyisen lämmöntuotantojärjestelmän kehittämissuunnitelmaa sekä uusien lämmöntuotanto- ja varastointimenetelmien vaihtoehtoja läpi käydessä vaihtoehtoisia tuotantomuotoja on varsin paljon. Huomioitavia asioita suunnitelman teossa ja toimenpiteitä miettiessä ovat esimerkiksi verkon koko, nykylaitteiden kunto sekä polttoaineen ja sähkön hinta. Kehittämissuunnitelmassa otetaan huomioon investointien ja laitehankintojen kannattavuus asiakkaan näkökulmasta. Toimenpiteitä ja suuren luokan investointipäätöksiä tehtäessä on otettava huomioon myös lämmöntoimittaja ja

kuluttajat. Lämmön hinta ei saa nousta liian kalliiksi asiakkaalle, eivätkä uudet lämpölaitosinvestoinnit saa nousta liian suureksi rasitteeksi lämpöyhtiölle.

Nykylaitteiden kuntoa kartoitettaessa on syytä muistaa vuoteen 2025 ja 2030 mennessä voimaan astuva Pipo-asetus ja kiristyvät päästöraja-arvot. Ympäristösuojeluvaatimukset ajavat varsinkin vanhempia laitoksia toimenpiteisiin raja-arvojen saavuttamiseksi.

Sähkökäyttöiset lämmitysmuodot kuten sähkökattilat ja ilma-vesilämpöpumput ovat valtaamassa alaa. Näiden käyttöä kuitenkin rajoittavat nykyiset sähkömarkkinat. Sähkön hinta etenkin talviaikoina ei kannusta investoimaan näihin vaihtoehtoihin. Sähkökäyttöisten lämmitysmuotojen käyttöä tuotannossa onkin järkevintä toteuttaa halvan sähkön aikana, kesäaikaan. Muina aikoina lämmöntuotannossa on varauduttava jonkin muun vaihtoehdoisen tuotantomuodon käyttöön, mikä lisää lämmöntuotannon rinnakkaisinvestointeja ja kustannuksia.

Kehityksen tärkeä virstanpylväs on myös kaukolämpöverkkoon liitettävät varaajat, jotka lisäävät lämmöntuotannon joustavuutta. Lisäksi ne mahdollistavat erilaisten säästä tai sähkömarkkinoista riippuvaisten lämmöntuotantomuotojen hyödyntämisen. Myös lämpöpumppujen rooli hukkalämmön hyödyntämisessä tulee kasvamaan. Suomessa on vielä paljon hyödyntämätöntä suurien prosessien sivutuotteena syntyvää lämpöä.

Opinnäytetyö tehtiin jo aiemmin tekemieni selvitysten ja laskelmien pohjalta. Siinä yhdistettiin useammalle lämmöntuottajalle tehtyjä energiataselaskelmia, joten mitään varsinaista tulosta ei saatu aikaiseksi. Työtä helpotti se, että olin jo aiemmin tehnyt Planora Oy:llä työkseni lämpöhuollon selvityksiä. Selventävää aineistoa keräsin erinäisistä lähteistä lisäten kehittämissuunnitelman periaatteita kokemukseni mukaan.

Kaukolämpöä käytiin energiatekniikan tutkinnon aikana läpi jonkin verran, mutta näitä selvityksiä tehdessäni olen oppinut siitä hurjasti lisää. Hyvä opinnäytetyön ohjaus ja työhön perehdyttäminen Planora Oy:llä auttoivat valtavasti. Oppini kaukolämmön parissa jatkuu edelleen.

LÄHTEET

1. Planora Oy. Hakupäivä 1.3.2024. <https://planora.fi/>.
2. Energiateollisuus. Kaukolämpö ja kaukojäähdytys. Hakupäivä 6.3.2024. <https://energia.fi/energiatietoa/energiantuotanto/kaukolampo-ja-jaahdytys/>.
3. Rauman Energia. Tietoa kaukolämmöstä. Hakupäivä 4.3.2024. <https://raumanenergia.fi/kaukolampo/tietoa-kaukolammosta#:~:text=Kaukol%C3%A4mp%C3%B6%20on%20puhdasta%20kuumaa%20veitt%C3%A4,vesi%20palaa%20paluuputkessa%20takaisin%20voimalaitokselle.>
4. Mäkelä, Veli-Matti & Tuunanen, Jarmo 2015. Suomalainen kaukolämmitys. Hakupäivä 28.2.2024. <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/97138/URNISBN9789515885074.pdf>.
5. Energiateollisuus. Kaukolämpö 2022 graafeina. Hakupäivä 20.2.2024. <https://www.slideshare.net/energiateollisuus/kaukolampo-2022-graafeina>.
6. Lankinen, Eetu 2022. Fossiilienergian käytön vähentäminen kaukolämmön tuotannossa. Lappeenrannan - Lahden teknillinen yliopisto LUT. Energiateknikka. Diplomityö. Hakupäivä 24.2.2024. https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/164484/Diplomityo_Eetu%20Lankinen.pdf?sequence=1.
7. Valima, Ville 2021. Kaukolämmön tuotannon kehitys tulevaisuudessa. Oulun yliopisto teknillinen tiedekunta. Ympäristötekniikka. Kandinaatintyö. Hakupäivä 24.2.2024. <http://jultika.oulu.fi/files/nbnfioulu-202107028773.pdf>.
8. Energiateollisuus. Rakennusten kaukolämmitys. Määräykset ja ohjeet. Hakupäivä 19.4.2024. https://energia.fi/wp-content/uploads/2016/08/Julkaistu_K1_2021_Rakennusten_kaukolammitys_Maaraykset_ja_ohjeet_pdf-1.pdf.

9. Energiateollisuus. Varastot. Hakupäivä 1.3.2024.
<https://energia.fi/energiapolitiikka/biodiversiteettikartta/toimenpiteet-luonnon-monimuotoisuuden-edistamiseksi/varastot/>.
10. Energiateollisuus. Tulevaisuuden asiakasratkaisut. Hakupäivä 24.2.2024.
<https://energia.fi/energiatietoa/asiakkaat/kaukolammon-ja-jaahdytyksen-asiakkuus/tulevaisuuden-asiakasratkaisut/>.
11. Energiauutiset 2016. Kaukolämpöverkot auki. Hakupäivä 7.3.2024.
<https://vanhalehti.energiiauutiset.fi/uutiset/kaukolampoverkot-auki.html>.
12. Tilastokeskus. Fossiiliset polttoaineet. Hakupäivä 4.3.2024.
https://www.stat.fi/meta/kas/fossiiliset_pol.html.
13. Erätuuli, Tea 2018. Biotaloudella kohti ilmastoneutraaliutta. Helen. Blogi. Hakupäivä 24.2.2024. <https://www.helen.fi/blogi/2018/biotalous>.
14. Promaintlehti 2014. Savukaasupesuri parantaa lämpöyhtiön kannattavuutta. Hakupäivä 11.3.2024. <https://promaintlehti.fi/Tuotantotehokkuuden-kehittaminen/Savukaasupesuri-parantaa-lampoyhtion-kannattavuutta>.
15. Seinäjoen energia 2021. Savukaasupesuri mahdollistaa sekä päästöjen hillitsemisen että hukkalämpöjen hyödyntämisen. Hakupäivä 6.3.2024.
<https://seinajoenenergia.fi/savukaasupesuri-mahdollistaa-seka-paastojen-hillitsemisen-etta-hukkalampojen-hyodyntamisen/>.
16. Rissanen, Veli-Matti 2016. Savukaasupesurilauhteen lämmön hyötykäyttö Vanajan voimalaitoksella. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Energiatekniikan koulutusohjelma. Diplomityö. Hakupäivä 18.3.2024.
https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/125614/Diplomityo_Rissanen_Ville-Matti.pdf?sequence=2&isAllowed=y.

17. Javarus, Soile 2016. Savukaasupesurin lämpövirrat ja hukkalämmön talteenotto. Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Energiatekniikan koulutusohjelma. Opinnäytetyö. Hakupäivä 15.3.2024. https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/114037/Javarus_Soile.pdf?sequence=1&isAllowed=y#:~:text=Polttoaineen%20kosteudella%20vaikutus%20on%20sama,alkaa%20tiivistym%C3%A4%C3%A4n%20savukaasupesurissa%20korkeammassa%20%C3%A4mp%C3%B6tilassa.
18. Järvinen, Juuso 2017. Savukaasupesurin käytön optimointi. Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Energiatekniikan tutkinto-ohjelma. Opinnäytetyö. Hakupäivä 2.4.2024. https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/131213/Jarvinen_Juuso.pdf?sequence=1.
19. Valtioneuvoston selonteko 2022. Hiilineutraali Suomi 2035 – kansallinen ilmasto- ja energiastrategia. Hakupäivä 26.3.2024. https://www.eduskunta.fi/FI/vaski/JulkaisuMetatieto/Documents/VNS_6+2022.pdf.
20. IEA. Heat pumps in district heating and cooling systems. Hakupäivä 11.3.2024. <https://www.iea.org/articles/heat-pumps-in-district-heating-and-cooling-systems.>
21. Fortum. Teollisen mittakaavan ilma-vesilämpöpumput tuottavat päästötöntä kaukolämpöä. Hakupäivä 11.3.2024. <https://www.fortum.fi/yrityksille-ja-yhteisolle/lammitys-ja-jaahdytys/kaukolampo/espoo-clean-heat/ilmavesilampopumput.>
22. Wang-Alho, Huaying 2021. Kaukolämmön erillistuotantoteknologioiden investointikustannusten vertailu. Vaasan yliopisto. Tekniikan ja innovaatiojohtamisen yksikkö. Diplomityö. Hakupäivä 12.3.2024. https://osuva.uwasa.fi/bitstream/handle/10024/13071/Kaukol%C3%A4mm%C3%B6n%20erillistuotantoteknologioiden%20investointikustannusten%20vertailu_Tutkimus%20Kaskisten%20Energian%20kes%C3%A4ajan%20tarpeisiin.pdf?sequence=2.
23. Gebwell. SCOP vai COP? Ota tehojen vertailun keskeiset termit haltuun. Hakupäivä 8.3. 2024. [https://gebwell.fi/ajankohtaista/scop-vai-cop-ota-tehujen-vertailun-keskeiset-termit-haltuun/.](https://gebwell.fi/ajankohtaista/scop-vai-cop-ota-tehujen-vertailun-keskeiset-termit-haltuun/)

24. Calefa. Tulevaisuudessa lämpö on edullisinta tuottaa CO2-päästövapaasti. Hakupäivä 24.2.2024. https://calefa.fi/tulevaisuudessa-lampo-on-edullisinta-tuottaa-co2-paastovapaasti/#pll_switcher.
25. Vaasan sähkö. Suomen suurin käytössä oleva sähkökattila – lämpövarastoyhdistelmä sijaitsee Vaasassa. Hakupäivä 1.3.2024. <https://www.sttinfo.fi/tiedote/70057672/suomen-suurin-kaytossa-oleva-sahkokattila-lampovarastoyhdistelma-sijatsee-vaasassa?publisherId=58661976&lang=fi>.
26. Mattila, Tuomas 2023. Energiamurros edellyttää lisää joustoa reservimarkkinoille. Fingridlehti. Hakupäivä 12.3.2024. <https://www.fingridlehti.fi/energiamurros-edellyttaa-lisaa-joustoa-reservimarkkinoille/>.
27. Rämä, Miika 2020. Hukkalämpö kaukolämpöjärjestelmissä. VTT. Asiakasraportti. Hakupäivä 28.2.2024. https://energia.fi/wp-content/uploads/2023/08/Hukkalampo_kaukolampojarjestelmissa_-_maarittely_ja_luokittelu_VTT_2020.pdf.
28. IEA. District heating. Hakupäivä 11.3.2024. <https://www.iea.org/energy-system/buildings/district-heating>.
29. Fingrid. Sähkömarkkinat. Reservitoimittajalle. Hakupäivä 18.3.2024. <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/reservitoimittajalle/>.
30. Fingrid. Sähkömarkkinat. Kuinka osallistua reservimarkkinoille. Hakupäivä 18.3.2024. <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/kuinka-osallistua-reservimarkkinoille/>.
31. Fingrid. Sähkömarkkinat. Ansaintamalli. Hakupäivä 18.3.2024. <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/kuinka-osallistua-reservimarkkinoille/ansaintamallit/>.

32. Fingrid. Sähkömarkkinat. Taajuusohjattu käyttö- ja häiriöreservi. Hakupäivä 18.3.2024. <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/taajuusohjattu-kaytto--ja-hairioreservi/>.
33. Fingrid. Sähkömarkkinat. Nopea taajuusreservi. Hakupäivä 18.3.2024. <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/nopea-taajuusreservi/>.
34. Fingrid. Sähkömarkkinat. Automaattinen taajuuden palautusreservi. Hakupäivä 18.3.2024. <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/automaattinen-taajuudenhallintareservi/>.
35. Fingrid. Sähkömarkkinat. Säätosähkö- ja säätökapasiteettimarkkinat. Hakupäivä 18.3.2024. <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/saatosahko--ja-saatokapasiteettimarkkinat/>.
36. Selvityslaskelmat. Planora Oy:n sisäinen järjestelmä.
37. Finlex 2017. Lainsäädännöt. Säädökset alkuperäisinä. 1065/2017. Valtioneuvoston asetus keskisuurten energiatuotantoyksiköiden ja -laitosten ympäristönsuojeluvaikutuksia. Hakupäivä 15.3.2024. <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20171065>.