



SUOMALAISEN KAUKOLÄMMÖN NYKYTILA, KEHITYSSUUNNAT JA TULEVAISUUS

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Energiatekniikan diplomityö

2022

Eetu Malkki

Työn tarkastajat:

Professori Esa Vakkilainen

Tutkijatohtori, TkT Jussi Saari

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Energiajärjestelmät

Energiatekniikka

Eetu Malkki

Suomalaisen kaukolämmön nykytila, kehityssuunnat ja tulevaisuus

Diplomityö

2022

133 sivua, 27 kuvaa, 5 taulukkoa ja 1 liite

Tarkastajat: Professori, TkT Esa Vakkilainen

Tutkijatohtori, TkT Jussi Saari

Ohjaajat: Professori, TkT Esa Vakkilainen

Hakusanat: kaukolämpö, lämmöntuotanto, lämpöpumput, digitalisaatio

Tämän diplomityön tarkoituksena on ollut tutkia ja selvittää suomalaista kaukolämmitystä, sen nykytilaa ja tulevaisuuden kehitystä. Sisällöltään työ on jaettu johdantoon, nykyisen suomalaisen kaukolämpöjärjestelmän kuvaamiseen, erilaisiin kehityssuuntiin ja niiden vaikutusten arviointiin kaukolämmitykselle, kaukolämmön tuotantomuotojen jaotteluun ja niiden tulevaisuuden pohdintaan, kaukolämpöjärjestelmän tulevaisuuteen Suomessa ja muualla maailmassa eritellen lisäksi erilaisia kaukolämpöalaaan liittyviä haasteita ja mahdollisuuksia, suomalaisen kaukolämmön ominaispiirteiden ja vientipotentiaalin tunnistamiseen, johtopäätöksiin, sekä yhteenvetoon.

Suomalainen kaukolämmitys on alallaan maailman parhaita mm. tuotannon tehokkuuden, järjestelmän luotettavuuden ja uusiutuvien energialähteiden käytön johdosta. Ilmastonmuutoksen ja geopoliittisen maailmantilanteen johdosta myös kaukolämpöala on energiamurroksessa, minkä johdosta uusia toimintamalleja tutkitaan ja otetaan käyttöön, sekä lämmöntuotannon muotoja uudistetaan hiilineutraalimmiksi vähentäen näin perinteisten fossiilisten polttoaineiden polttamista. Kestävän bioenergian lisäksi muita hiilineutraaleja lämmönlähteitä ovat esimerkiksi geoterminen lämpö ja aurinkolämpö, sekä lämpöpumpuilla hyödynnettävät hukkalämmöt. Kaukolämpöalan kehityssuunnista voidaan mainita ainakin rakennusten energiatehokkuuden parantuminen, verkoston lämpötilojen optimointi, kaksisuuntainen kaukolämpö ja kaukolämmön hinnoittelu, digitalisaatio ja älykkäät järjestelmät, kysyntäjousto, sektori-integraatio ja lämmön varastointi.

Kaukolämmityksellä on rakennuskohtaiseen lämmittämiseen nähden useita etuja mm. tuotannon monipuolisuuden ja järjestelmätason ohjauksen ansiosta ja sen avulla katsotaan olevan mahdollista saavuttaa kriittisiä ilmastotavoitteita eritoten EU:n tasolla. Tämän johdosta Suomen jo valmiiksi vahva kaukolämpöalan osaaminen eri teknologioineen omaa merkittävää vientipotentiaalia maailmalle.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

School of Energy Systems

Energy Technology

Eetu Malkki

The current state of Finnish district heating, its development trends and future

Master's thesis

2022

133 pages, 27 figures, 5 tables and 1 appendix

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

D.Sc. (Tech.) Jussi Saari

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

Keywords: district heating, heat production, heat pumps, digitalization

The purpose of this master's thesis has been to investigate and research the Finnish district heating, its current state and future development. In terms of content, this work is divided into chapters of introduction, description of present Finnish district heating system, different forms of development trends and their impact on district heating industry, a breakdown of the district heating production methods and their overall future consideration, the future of the district heating system in Finland and elsewhere in the world with classification of different kinds of challenges and opportunities related to DH sector, identifying the typical aspects of Finnish district heating with its technological export potential, conclusions and finally summary.

The Finnish district heating is among the best in the world in its sector when it comes to production efficiency, system reliability, and renewable energy sources utilization. Due to climate change and the geopolitical world situation, the district heating industry is also facing new challenges in the middle of the energy revolution leading to research and development of new operating models, innovations, and reformation of heat production towards carbon neutrality using non-combustion-based, non-fossil heat sources. Besides sustainable bioenergy, other carbon neutral heat sources include, for example, geothermal and solar heat and waste heat utilized with heat pumps. Trends in district heating are for example energy efficiency development of new building stock, optimizing temperatures of DH networks, two-way district heating and new pricing models, digitalization and intelligent systems, demand response, cross-sector integration, and heat storages.

There are several advantages in DH compared to building-specific heating with individual heat sources, for example variety of production and system-level control. It is also realized at the EU level that exploiting district heating on a larger scale could contribute climate change mitigation. Finland already has a strong know-how in the DH industry which gives Finnish district heating technologies and companies a significant export potential to the world.

ALKUSANAT

Haluan kiittää LUT-yliopiston professori Esa Vakkilaista ja tutkijatohtori Jussi Saarta tämän diplomityön ohjauksesta sekä opiskeluaikana saamastani opetuksesta. Kiitokset Suomalaiselle Energiaklubille mahdollisuudesta tämän diplomityön tekemiseen sekä mielenkiintoisesta työn aiheesta. Erityiskiitokset Planora Oy:n toimitusjohtaja diplomi-insinööri Esa Tepolle, sekä Oilon Group Oy:n toimitusjohtaja diplomi-insinööri Tero Tulokkaalle ohjauksesta ja neuvoista työhön liittyen. Haluan myös kiittää perhettäni työn tekemiseen saamastani tuesta. Lisäksi haluan kiittää opiskelukavereitani, joihin tutustuin ja joiden kanssa sain viettää aikaa koulussa sekä vapaa-ajalla Lappeenranta-vuosieni aikana.

Oulussa 6.8.2022

Eetu Malkki

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ALKUSANAT

SISÄLLYSLUETTELO

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

1	JOHDANTO.....	9
1.1	Työn tarkoitus	10
1.2	Työn laajuus	11
1.3	Työn rakenne.....	12
2	KAUKOLÄMPÖ.....	13
2.1	Kaukolämpö nyt.....	13
2.2	Kaukolämpöverkko	19
2.2.1	Jakeluverkko	20
2.2.2	Menovesi.....	20
2.2.3	Paluuvesi	21
2.2.4	Jäähtymä	23
2.2.5	Häviöt.....	23
2.2.6	Pumppaus.....	25
3	KEHITYSSUUNNAT	26
3.1	Kaukolämmön kehitys	29
3.1.1	Suomalainen malli	30
3.1.2	Eurooppalainen (tanskalainen) malli	31
3.2	Rakennusten energiatehokkuus.....	33
3.3	Verkoston lämpötilojen optimointi	35
3.4	Kaksisuuntainen kaukolämpöverkko	38
3.5	Hinnoittelu.....	41
3.5.1	Uusia hinnoittelumalleja	42
3.5.2	Esimerkkejä	43
3.6	Digitalisaatio ja älykäs ohjaus.....	44
3.7	Kysyntäjousto.....	46

3.8	Sektor-integraatio.....	48
3.9	Lämpövarastot.....	50
4	KAUKOLÄMMÖN UUDET TUOTANTOMUODOT.....	56
4.1	Perinteiset polttoon perustuvat teknologiat.....	59
4.1.1	CHP - Yhteistuotanto.....	59
4.1.2	HOB – Lämmön erillistuotanto	61
4.1.3	Bioenergia.....	62
4.1.4	Turve.....	65
4.1.5	Jätteiden poltto.....	67
4.1.6	Fossiiliset	67
4.2	Uudet polttoon perustuvat teknologiat.....	68
4.2.1	BECCS.....	68
4.2.2	BECCU	69
4.2.3	Vety.....	70
4.3	Polttoon perustumattomat teknologiat	72
4.3.1	Lämpöpumput kaukolämmön tuotannossa	73
4.3.2	Hukkalämmöt.....	76
4.3.3	Geoterminen lämpö.....	79
4.3.4	Aurinkolämpö	82
4.3.5	Sähkökattilat	84
4.3.6	Kaukolämpöä tuottavat SMR-reaktorit.....	85
4.3.7	SMR:n tulevaisuuden näkymät.....	89
4.4	Lämmönlähteiden tulevaisuuden käyttö	91
5	KAUKOLÄMPÖ 2030—2050.....	94
5.1	Uusiutuvan kaukolämmön ajurit.....	95
5.1.1	Suomessa	96
5.1.2	EU:ssa	98
5.1.3	Maailmalla	99
5.2	Kaukolämmön kehityksen haasteita.....	100
5.2.1	Yhteiskunnalliset haasteet.....	101
5.2.2	Teknologiset haasteet.....	104
5.2.3	Taloudelliset haasteet.....	106
5.3	Kaukolämmön kehityksen mahdollisuuksia	107
5.3.1	Yhteiskunnalliset mahdollisuudet.....	107

5.3.2	Teknologiset mahdollisuudet.....	109
5.3.3	Taloudelliset mahdollisuudet.....	110
6	SUOMALAISEN KAUKOLÄMMÖN OMINAISPIIRTEET JA VIENTIPOTENTIAALI.....	113
6.1	Ominaispiirteet.....	113
6.2	Suomalaisen kaukolämpötekniikan vientipotentiaali.....	114
7	JOHTOPÄÄTÖKSET	116
8	YHTEENVETO	119
	LÄHTEET	120

LIITTEET

Liite 1. Suomalaisen kaukolämmityksen kehitysvaiheet.

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset

E	energia	[kWh, MWh, TWh, EJ, GWh/a]
P	teho	[kW, MW, GW]
p	paine	[kPa, bar]
T	lämpötila	[°C, K]
U	lämmönläpäisykerroin	[W/(m ² K)]
V	tilavuus	[m ³]

Kreikkalaiset

Δ	ero	[-]
----------	-----	-----

Alaindeksit

pa	polttoaine
th	thermal, lämpö

Lyhenteet

ARA	Asumisen rahoitus- ja kehittämiskeskus
BECCS	Bioenergy Carbon Capture and Storage
BECCU	Bioenergy Carbon Capture and Utilization
BREEAM	Building Research Establishment Environmental Assessment Method
CHP	Combined Heat and Power
CCS	Carbon Capture and Storage
COP	Coefficient of Performance

DH	District heating
EED	Energy Efficiency Directive
EPBD	Energy Performance of Buildings Directive
ETS	European Emissions Trading System
EU	Euroopan Unioni
GWP	Global Warming Potential
HOB	Heat Only -Boiler
IoT	Internet of Things
IRENA	International Renewable Energy Agency
KPI	Key Performance Indicators
LDR	Low temperature District heating Reactor
LEED	Leadership in Energy and Environmental Design
LULUCF	Land Use, Land Use Change and Forestry -sector
P2H	Power to Heat
P2H2	Power to Hydrogen
PCM	Phase Change Material
SECURE	Safe Environmentally Clean Urban REactor
SMR	Small Modular Reactors
STUK	Säteilyturvakeskus
SWOT	Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats

1 JOHDANTO

Käsillä olevassa energiamurroksessa myös kaukolämpö, sen rakenne ja kysyntä tulevat muuttumaan. Kaukolämmön kysyntään vaikuttavat mm. rakennusten parantuva energiatehokkuus, muuttoliike kasvukeskuksiin, ilmastonmuutos, poliittisen ilmapiirin luomat edellytykset ja haasteet, sekä eri lämmitysmuotojen hinnoittelu. Uusien rakennusten energiatehokkuus sekä asuinrakennusten oma lämmöntuotanto muun muassa erilaisilla lämpöpumpuilla toteutettuna vähentävät todennäköisesti kaukolämmön tarvetta, toisaalta taas kasvavat kaupungit tarvitsevat lisää keskitettyä lämmöntuotantoa. Tulevaisuudessa lämpöpumppuratkaisujen edelleen lisääntyessä ne voivat muuttaa kaukolämmön markkinaosuutta riippuen siitä käytetäänkö niitä talokohtaisina vai kaukolämpöverkkoon kytkettyinä ratkaisuinä. (Joronen et al. 2021, s.8.)

Lämmitysenergian kysynnän vaihtelut ovat vielä suurempia kuin sähkön kysynnän vaihtelut: Verrattuna kesän lämmitystarpeeseen, talven hetkellinen lämmitystarve on jopa kymmenkertainen. Sähkön kysynnän vaihtelussa vastaava suhde on 2–3-kertainen talven hyväksi. Myös talven lämmöntarpeen kuukausittainen keskiarvo on noin viisinkertainen kesään nähden. (Joronen et al. 2021, s.6.)

Ilmastonmuutoksesta johtuva maapallon keskilämpötilan nousu vähentää lämmitystarvetta, mutta kaukolämpöjärjestelmän mitoitukseen sillä ei ole juurikaan vaikutusta: Kaukolämmön tehon tarve määräytyy vuoden kylmimmän hetken ja ajanjakson vaatiman huippukulutuksen mukaan. Todennäköistä ja jo nyt havaittavissa olevaa on, että Suomessa vuoden kylmin jakso lyhenee merkittävästi ja vuosittainen lämmöntarve vaihtelee runsaasti. Kuitenkin kylmimmät mahdolliset lämpötilat pysyvät samoina, jolloin kaukolämmityksen tehon tarve olisi yhtä suuri kuin se on nykyäänkin vuoden kylmimpinä ajankohtina. Tämä taas lisää kaukolämmön kustannuspainetta, kun investointien käyttöaika pienenee. Säätökapasiteettia ja huipputehon tarpeen leikkaamista kaukolämmön tuotantolaitoksilta voidaan saavuttaa esimerkiksi erilaisilla lämpövarastoilla ja -akuilla, mutta niiden kokoluokat ovat monin paikoin vielä suhteellisen pieniä ja kannattavuudet vuoden ympäri toimivina varastoina ovat vielä mm. lämpöhäviöistä johtuen maltillisia. Kaukolämpöjärjestelmän säädettävyyden, kulutus-
huippujen madaltamisen, sekä myös lämpövarastojen optimaalisen käytön mahdollistavat

digitalisoidut ja älykkäät kaukolämpöverkot, jossa mm. mittausdata ja verkon komponentit sijaintitietoineen ovat aina saatavilla.

Kansallisten poliittisten tavoitteiden määrittelyssä koskien uusiutuvien energiamuotojen käyttöönottoa lämpösektori on selkeästi sähköä perässä: Vuoden 2019 lopussa vain 49 maalla, joista suurin osa sijaitsi EU:n alueella, oli määriteltynä kansallisia tavoitteita uusiutuvalla lämmitykselle (ja jäähdytykselle), kun taas uusiutuvan sähkön tuotannolle tavoitteita oli asettanut jo 166 maata. Toimia tarvitaan kuitenkin myös lämmityksen uudistamiselle, sillä yhteensä ne käsittävät noin puolet globaalista energiankulutuksesta ja yli 40 % globaaleista energiankäyttöön kuuluvista päästöistä. (IRENA, IEA & REN21 2020, s.11.)

1.1 Työn tarkoitus

Kaukolämpöala, kuten koko energiajärjestelmä, on murroksessa ja ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi pyritään energiantuotantoa ja -kulutusta muokkaamaan vähäpäästöisemmäksi niin, että maapallon keskilämpötilan nousu pysyy korkeintaan 1,5 °C:ssa esiteollisesta ajasta. Tähän tavoitteeseen pääsemiseksi päästövähennystoimina on esitetty muun muassa kaukolämmitystä ja -jäähdytystä, sekä lämpöpumppuja (IPCC 2018). Suomen lämmöntuotannossa suuren osuuden omaavaan kaukolämmitykseen on kohdistunut muutospaineita paitsi edellä mainitun ilmastonmuutoksen hillitsemisen ja siihen liittyvien poliittisten päätösten lisäksi myös itse lämmönkuluttajilta, jotka osaltaan vaativat paitsi ympäristöystävällisempää, myös avoimempaa ja palveluiltaan parempaa kaukolämpöjärjestelmää. Monet kaukolämpöyhtiöt Suomessa ovat jo lähteneet muuttamaan lämmöntuotantoaan ja kaukolämpöjärjestelmiään muuttuneen kysynnän, omien arvojensa, sekä poliittisten päätösten pohjalta. Kaukolämpöverkot ovat kuitenkin paikallisia energiajärjestelmiä ja osittain tästä syystä Suomessa on meneillään tai suunnitteilla paljon erilaisia ja erillisiä kaukolämpöön liittyviä projekteja, pilotteja ja tutkimuksia, joita tämä diplomityö pyrkii kokoamaan yhteen, sekä luomaan mahdolliset kaukolämmitykseen liittyvät kehityssuunnat huomioon ottaen näkemyksen ennen kaikkea suomalaisen kaukolämmön tulevaisuudesta ja teknologian vientipotentialista aikaikkunaa 2030—2050 silmällä pitäen.

Kaukolämpöön aiheena, sen kehitykseen ja suuntauksiin, sekä erilaisiin lämmöntuotantomuotoihin on viime vuosina tehty paljon erilaisia raportteja, selvityksiä ja opinnäytetöitä. Monet niistä keskittyvät kuitenkin vain johonkin tiettyyn tai muutamaaan kaukolämpöä

koskevaan osa-alueeseen. Yhtenä tämän työn tarkoituksena onkin koota ja esitellä kaukolämpöalan kehityssuuntien kirjoja, sekä yrittää ymmärtää myös näiden välisiä yhteyksiä ja vaikutuksia kokonaisuuteen, lämmöntuotantoon ja yhteiskuntaan.

Työssä käydään läpi sekä esitellään erilaisia suomalaisen kaukolämmön kehitykseen liittyviä suuntauksia ja konsepteja, sekä nykypäivänä ja ennen kaikkea tulevaisuudessa käytettäviä kaukolämmön tuotantomuotoja. Edellä mainittuja havainnollistamaan työhön on liitetty esimerkeiksi viime vuosina tehtyjä ja käynnissä olevia kaukolämpöhankkeita Suomessa. Kaukolämpöä ja sen kehitykseen vaikuttavia ajureita on analysoitu järjestelmätasolla, poh-tien ja eritellen samalla eri suuntauksien aiheuttamia ja aikaansaamia haasteita sekä mahdollisuuksia. Näiden kaikkien pohjalta vedetään lopuksi yhteen suomalaisen kaukolämpöteknologian ominaispiirteitä kehitys- ja tulevaisuuden näkymät huomioiden, sekä esitellään samalla suomalaisen kaukolämmön mahdollisia vientiteknologioita maailmalle.

Tutkimuskysymyksiä tämän työn tekemisessä ovat olleet: Millaisia ovat kaukolämmön tulevaisuuden näkymät keskipitkällä ja pitkällä aikavälillä? Miten kaukolämmön toimintaympäristö tulee muuttumaan energiamurroksessa? Minkälaiset ovat suomalaisen kaukolämpöjärjestelmän uudet ominaispiirteet ja potentiaaliset kaukolämpöteknologian vientituotteet?

Pääasiallisena tutkimusmenetelmänä työssä on käytetty kirjallisuustutkimusta, jossa lähteinä on käytetty työn aiheisiin liittyviä tieteellisiä artikkeleita, kaukolämpöalaan liittyvää kirjallisuutta, kaukolämpöalan toimijoiden julkaisemaa materiaalia, lämmitykseen ja energiankäyttöön liittyvää lainsäädäntöä, sekä työtä ohjanneiden ja kommentoineiden havaintoja ja näkemyksiä.

1.2 Työn laajuus

Luonnollisesti tämänkin työn laajuus on rajoitettu, jolloin esimerkiksi yksittäiseen kehityssuuntaan tai tuotantomuotoon ei voida syventyä liiaksi. Esimerkiksi jokaisesta työssä esitellystä kehityssuunnasta ja kaukolämmön tuotantomuodosta on käyty peruseriaatteita ja tulevaisuuden arvioita läpi mahdollisine esimerkkeineen, mutta niiden suuren määrän myötä tarkempaa ja spesifimpää tarkastelua jokaisesta ei voida tähän työhön mahduttaa.

1.3 Työn rakenne

Tämä diplomityö koostuu johdannosta, perusteorian osuuden sisältävästä kaukolämmitykseen ja tyypillisiin suomalaisiin kaukolämpöverkkoihin perehtymisestä, aiheeseen syventyvistä kappaleista kaukolämmön kehityksen kirjallisuustutkimuksen muodossa pitäen sisällään järjestelmää koskevat kehityssuunnat, kaukolämmön tuotantomuodot nyt ja tulevaisuudessa, kaukolämmön uudistumiseen vaikuttavia tekijöitä meillä ja maailmalla, kaukolämmitykseen kohdistuvia haasteita ja mahdollisuuksia muuttuvassa toimintaympäristössä, sekä suomalaisen kaukolämmön ominaispiirteitä ja teknologisia vientimahdollisuuksia. Lopuksi näistä tehdään johtopäätökset ja loppuyhteenveto, minkä jälkeen luetellaan käytetyt lähteet ja viimeisenä ovat työn liitteet.

2 KAUKOLÄMPÖ

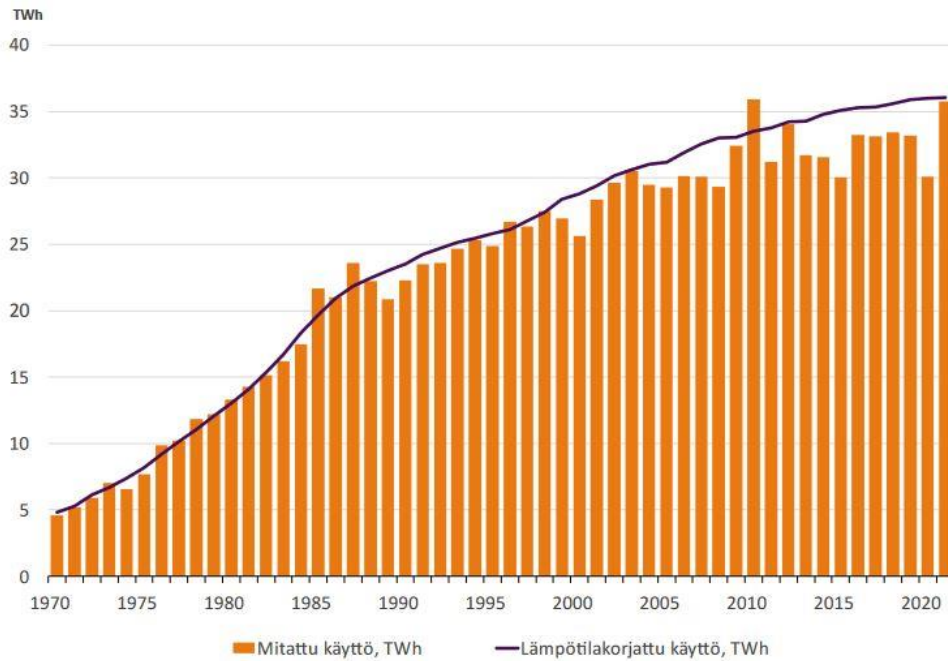
Euroopan Unionin määritelmä kaukolämmölle kuuluu seuraavasti: ”’kaukolämmityksellä’ tai ’kaukojäähdytyksellä’ tarkoitetaan termisen energian jakelua höyryn, kuuman veden tai jäähdytetyn nesteen muodossa keskitetyistä tai hajautetuista tuotantolähteistä verkoston välityksellä useisiin rakennuksiin tai kohteisiin käytettäväksi lämmitykseen tai jäähdytykseen sisätiloissa tai prosesseissa.” (Euroopan Unionin virallinen lehti 2018, s.22). Kaukolämmitys voidaan jakaa kolmeen eri osa-alueeseen, jotka ovat lämmöntuotanto, lämmönsiirto ja -jako, sekä lämpöasiakkaat eli kuluttajat.

2.1 Kaukolämpö nyt

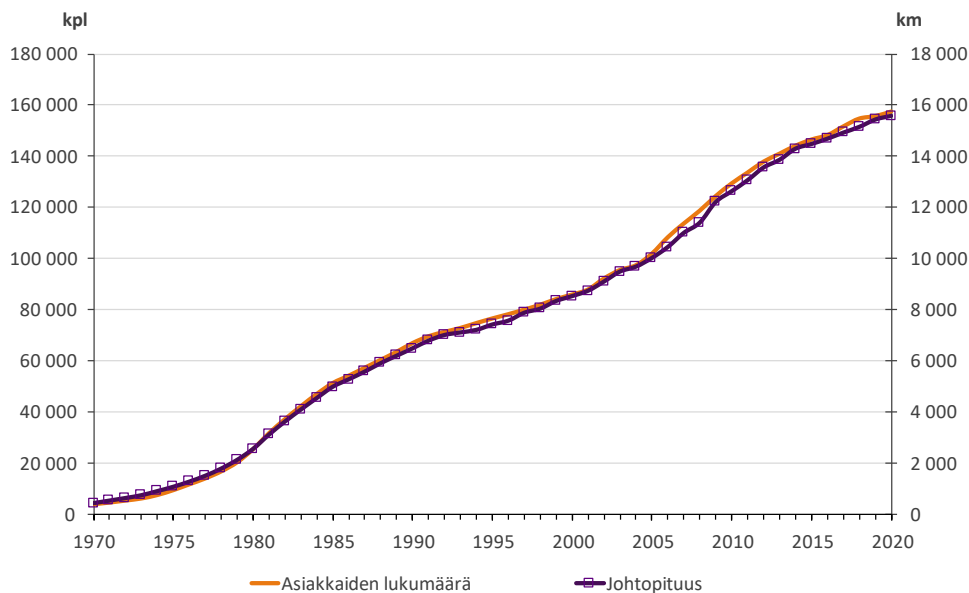
Kaukolämmön markkinaosuus Suomessa oli 46 % vuonna 2020 kaukolämpöverkon pituuden ollessa 15 570 km ja asukasmäärän kaukolämpötaloissa 2,98 miljoonaa. Kapasiteetiltaan suurin yksittäinen kaukolämpöverkko (n. 2500 MW) Suomessa sijaitsee Helsingissä (Lepänen 2021). Kaukolämpöä tuotettiin vuonna 2021 yhteensä 39,3 TWh, Suurin osa Suomen kaukolämmöstä, noin 60 % (vuonna 2020), tuotetaan lämmön ja sähkön yhteistuotannolla (CHP) ja loput noin 40 % lämmön erillistuotannolla sisältäen hukkalämmön talteenoton. Kaukolämpöenergian mitattu käyttö vuonna 2021 oli 35,5 TWh ja lämpötilakorjattu käyttö 35,8 TWh, jolloin Suomen kaikkien kaukolämpöverkoston yhteiseksi lämpöhäviöksi muodostui 9,7 %. Kaukolämpöverkkojen lämpöhäviöt ovat kuitenkin hyvin verkostokohtaisia ja riippuvat esimerkiksi verkoston lämpötiheydestä, pituudesta, käytetystä putkikoosta ja menoveden (lämmöntarpeen) arvoista. Lämpötiheydeltään suurissa kaukolämpöverkoissa keskimääräisen putkikoon ollessa DN 150 häviöt ovat luokkaa 4–10 %, kun taas pienemmissä alueverkoissa keskimääräisellä putkikoolla DN 50 lämpöhäviöt ovat tyypillisesti 10–20 % ja jopa ylikin (Koskelainen et al. 2006, s.203). Käytetyllä putkikoolla (ja materiaalilla) sekä putkipituudella on siis vaikutusta lämpöhäviöiden suuruuteen. (Energiateollisuus ry 2022a.)

Kaukolämpöasiakkaiden huipunkäyttöaika eli kulutetun lämpöenergian ja lämmön huipputehon suhde vuotuisina tunteina on tyypillisesti noin 2500–2700 h/a, rakennuksen sisätilojen lämmityksen ollessa selkeästi suurin vaikuttaja tähän lukemaan (n. 70 %) (Koskelainen et al. 2006, s.61). Kuvissa 1 ja 2 on esitetty kaukolämmön kehitystä Suomessa 1970-luvulta

nykypäivään mitatun ja lämpötilakorjatun käytön (kuva 1), sekä kaukolämpöasiakkaiden lukumäärän ja yhteenlasketun johtopituuden (kuva 2) muodoissa.



Kuva 1. Kaukolämmön mitattu ja lämpötilakorjattu käyttö terawattitunneissa Suomessa vuosina 1970–2021 (Energiateollisuus ry 2022a).

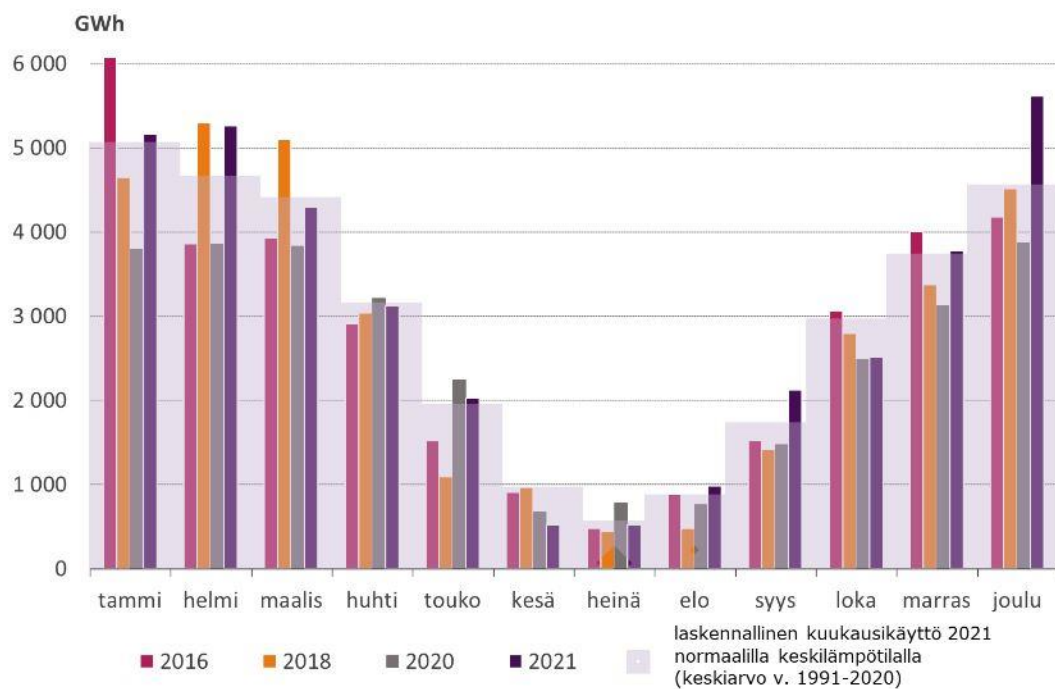


Kuva 2. Kaukolämpöasiakkaiden lukumäärän ja kaukolämmön kokonaisjohtopituuden kehitys vuosien 1970 ja 2020 välisenä aikana (Energiateollisuus ry 2022a).

Kuvista 1 ja 2 voidaan havaita, että vaikka Suomessa kaukolämmön lämpötilakorjatun käytön kasvu on viime vuosien aikana tasaantunut ja mitattu käyttö vuositasolla vaihdellut

reilusti vuosien välillä johtuen ennen kaikkea talvien lämpötiloista (kuva 1), ovat kaukolämpöasiakkaiden lukumäärä ja sitä noudatteleva johtopituus kasvaneet selkeämmin samalla ajanjaksolla (kuva 2). Syynä tähän on muun muassa rakennusten energiatehokkuuden parantuminen, jolloin samalla määrällä tuotettua kaukolämpöenergiaa on voitu kattaa useamman asiakkaan lämmöntarve. Osaltaan kaukolämmön kulutukseen on myös vaikuttanut kiinteistökohtaisten lämmitysratkaisujen lisääntyminen kuluneen vuosikymmenen aikana.

Kuvassa 3 näkyy kaukolämmön kulutuksen muutokset kuukausitasolla vuosilta 2016, 2018, 2020 ja 2021. Eri vuosien välillä kuukausittaisessa kulutuksessa on huomattavia vaihteluita, esimerkiksi jopa yli 2000 GWh ero vuosien 2016 ja 2020 tammikuiden välillä. Lisäksi kuvasta havaitaan hyvin kaukolämmön käytön muutokset kesän ja talven välillä, talven käytön ollessa jopa kymmenkertainen kesäajan käyttöön verrattuna.



Kuva 3. Kaukolämmön käyttö (GWh) kuukausittain Suomessa vuosina 2016, 2018, 2020 ja 2021 (Energiateollisuus ry 2022a).

Taulukossa 1 on vertailtu suomalaista kaukolämmitystä ja sen suorituskykyä kehittyviin, kaukolämmitystä kehittäviin verrokkimaihin.

Taulukko 1. Kaukolämmön suorituskyvyn mittareiden vertailua Suomen ja taloudeltaan sekä kaukolämpöverkoiltaan kehittyvien maiden välillä (Planora Oy, Energiateollisuus 2022).

Kaukolämmön KPI-mittarit	Suomi	Kehittyvät maat
Verkoston lämpöhäviöt	6–10 %	15–40 %
Lisäveden täydennystarve vuodessa	maks. 1x verkoston vesimäärä	10-50x verkoston vesimäärä
Luotettavuus	99,98 %	alle 99 %
CHP-tuotannon osuus	76 %	30–60 %
Lämmöntuotannon hyötysuhde	93 %	60–90 %
Uusiutuvien osuus kaukolämmöstä	43 %	0–10 %
Tuottavuus (GWh/työntekijä)	20	1–4
Kannattavuus (% liikevaihdosta)	10–20 %	<5 % (jopa negat.)

Verrattaessa taulukon 1 mukaan suomalaisen kaukolämmön KPI-mittareita valtioihin, jotka taloutensa ja infrastruktuurinsa puolesta ovat vasta kehitymässä, nousee suomalaisten kaukolämpöverkostojen kehittyneisyys ja edelläkävijyys esiin. Tyypilliset lämpöhäviöt ovat suurempien kaupunkien kaukolämpöverkostoissa Suomessa alle 10 %, kun taas verkostoja kehittämissä maissa ne ovat 15–40 %. Vuodessa verkostoon tarvittavan lisäveden tarve on Suomessa tyypillisesti maksimissaan verkoston sisältämän vesitilavuuden määrä, kun kehittyvien maiden verkostoissa ne ovat jopa 10–50 kertaisia verkon vesitilavuuteen nähden. Verkostojen luotettavuus, eli kuinka suuren osan ajasta kaukolämpövettä tuotetaan ja tuotettua lämpöä saadaan asiakkaille siirrettyä, on hyvin lähellä sataa prosenttia Suomessa, kehittyvissä maissa luotettavuuden ollessa hieman heikompi ja vaihdellen enemmän. Suomen kaukolämmön tuotannossa CHP:n osuus on merkittävä, noin kolme neljäsosaa, kun taas muualla se vaihtelee noin 30–60 % välillä ollen joissakin paikoin vieläkin vähemmän. Kaukolämmön tuotannon hyötysuhde on Suomessa jopa 93 %, kun taas kehittyvien verkkojen kaukolämmön tuotannon tehokkuus vaihtelee välillä 60–90 %. Lisäksi uusiutuvan energian osuus kaukolämmön tuotannosta Suomessa on huomioarvoinen, noin 43 %, verrattuna muiden maiden uusiutuvan kaukolämmön tuotantoon, joka on usein alle 10 % tai mitätön. Lämmöntuotannon tehokkuus työntekijää kohden (GWh/työntekijä) on Suomessa jopa 20, kun taas kehittyvissä maissa se on maltillinen 1–4. Myöskin tuottojen osuus

liikevaihdosta on Suomessa 10—20 % luokkaa, kun kehittyvän talouden maissa tuottojen osuus on hyvin matala tai kannattavuus on jopa negatiivista.

Hydrauliset laskelmat ovat olennaisia toimivan kaukolämpöverkon toteuttamisen onnistumisessa, sillä nykyaikaiset kaukolämpöverkostot koostuvat monista erikokoisista ja -muotoisista lämmönsiirtoputkista muodostaen lenkkejä ja haaroja. Lisäksi kaukolämmön tuotantolaitoksia on usein sijoiteltu eri puolille verkostoa, ja tulevaisuudessa mm. erilaiset hukkalämmönlähteet ja niitä hyödyntävät lämpöpumppusovellukset tulevat vain lisääntymään verkon eri osissa. Edellä mainituista ja lämmönsiirron transientista luonteesta johtuen kaukolämpöverkon suunnittelu ja mitoittaminen olisi erittäin hankalaa ilman tietokonepohjaisia laskentaohjelmia sisältäen hydrauliset laskelmat. Laskentaohjelmilla pystytään optimoimaan verkoston komponenttien toiminta, optimoimaan kaukolämmön tuotanto perustuen lämpöenergian hintaan ja sähkön myynnistä saatavaan hintaan (CHP-tuotanto), simuloimaan epätavallisia ja häiriötilanteita lämmöntuotannossa, simuloimaan verkoston häiriö- ja alhaalla olon aikoja, optimoimaan pumppauksen määrää ja painetasoja, sekä optimoimaan meno- ja paluuvirtauksien lämpötiloja ja minimoimaan verkostohäviöitä. (Planora Oy.)

Tyypillisesti kaukolämmön pohja- ja peruskuormaa eli varsinkin lämmityskauden jatkuvan lämmöntarpeen täyttävää tuotantoa tuotetaan suuremmissa lämpölaitoksissa, jotka yleensä ovat olleet kiinteää polttoainetta käyttäviä lämmön ja sähkön yhteistuotanto - eli CHP-laitoksia. Näiden laitosten investointikustannukset ovat suuria, mutta käyttökustannukset tuotettua energiayksikköä kohden pieniä. Peruskuorman määrää optimoidaan siten, että se kattaa kustannustehokkaasti mahdollisimman suuren osan vaaditusta kaukolämmön vuosituotannosta, kuitenkin kapasiteetin ollessa näillä vastapainelaitoksilla vain noin puolet koko kaukolämmön huipputehosta. Kaukolämpöjärjestelmää mitoittaessa täytyy huomioida kuitenkin kokonaiskustannukset, joten peruskuormalaitoksia ei voi mitoittaa tuottamaan liian isoa osaa vuotuisesta energiantarpeesta. Liian suurella vuosienenergiantuotannon osuudella peruslaitoksen ajon vaatiman minimikuorman alittamisesta johtuvat laitoksen alasajot lisääntyvät. Jotta järjestelmä pystytään kokonaisuoptimoimaan, tarvitaan peruskuorman lisäksi huippukapasiteettia täyttämään lämmön kysyntähuiput, jotka sijoittuvat yleensä lämmityskaudelle talven kylmimpiin hetkiin. Huippukapasiteetin kustannukset muodostuvat päinvastoin kuin peruskuorman kapasiteetilla: investointikustannukset ovat matalat, mutta polttoaine- ja käyttökustannukset korkeat, mikä on kuitenkin hyväksyttävää huomioitaessa laitosten vuotuiset huippukäyttöajat, jotka huippukapasiteetilla ovat alle 1000 h ja

peruskuormalaitoksilla luokkaa 4000–6000 h. Perus- ja huippukapasiteetin lisäksi kaukolämmön tuotannossa tarvitaan myös varalaitoksia silloin, kun esimerkiksi jokin peruskuormaa tuottavista laitoksista ei ole käytettävissä vian tai huollon vuoksi. (Pöyry Management Consulting Oy 2016, s.7, Koskelainen et al. 2006, s.42, 322.)

Kaukolämpöyhtiöiden liiketoiminnan kannalta kaukolämmön peruskuorman tuottaminen on kannattavaa ja yhtiöiden tulos pohjautuu vahvasti siihen, kun taas lämmön huipputehontarpeeseen vastaaminen huippukapasiteetilla on usein tappiollista tai parhaimmillaan nollatulosta tekevää. Peruskuorman tuottamisen kannattavuus perustuu sitä tuottavien laitosten korkeaan käyttöasteeseen, käytettävyyteen ja hyötysuhteeseen, sekä matalampiin käyttökustannuksiin, kun laitoksien ajo tapahtuu hyötysuhteeltaan parhaalla kuormalla ja lämpö tuotetaan huipputuotantoa edullisemmilla polttoaineilla. Nopeat kulutuksen vaihtelut ovat vähiten taloudellisia ja samalla järjestelmän tehokkuus laskee, kun laitoksia joudutaan käynnistämään ja alas ajamaan. Ratkaisuina nopeille kulutuksen vaihteluille ovat kulutuksen mukaan joustavaksi rakennettu tuotantokapasiteetti, lämpövarastot, sekä erilaiset kysyntäjouston muodot. Kaukolämpöverkoston oikeanlainen mitoitus on myös olennaista sen toiminnan ja kannattavuuden näkökulmasta. Oikein mitoitettut tuotanto-, verkosto-, sekä asiakaslaitteet muodostavat verkoston laadukkaan operoinnin ja huollon kanssa toimitusvarman ja tasapainoisen kaukolämpöverkoston, jolloin se on optimaalisesti kuormitettu eikä siinä esiinny suuria vikoja, pullonkauloja tai saneerausvelkaa. (VALOR Partners Oy 2015, s.11.)

Hajautettuun, rakennuskohtaiseen lämmöntuotantoon nähden kaukolämmön etuina ovat mm. tuotannon jakamis- ja skaalausehdut, lämmitysverkon säädettävyys, yhteistuotannon energiatehokkuus ja tasapainottaminen sähkön kulutuksen kanssa, uusiutuvien lämmönlähteiden monipuolisempi hyödyntäminen, integraatio yhteen kaupunkiympäristön kanssa, digitalisaation ja automaation monipuolisempi hyödyntäminen, käyttövarmuus ja helppokäyttöisyys asiakkaan kannalta. Toisaalta ongelmatekijöinä ovat suuret investoinnit pitkine takaisinmaksuaikoineen, suuret kaukolämmön kulutuksen vaihtelut vuositasolla, kaukolämpöverkkojen kannattavuus vain lämpötiheydeltään riittävän suurilla alueilla (kaupungeissa), ja lämmöntuotannon sijainnin vaatimus lähelle asutuskeskuksia siirtohäviöiden minimoimiseksi. (Koskelainen et al. 2006, s.25.)

2.2 Kaukolämpöverkko

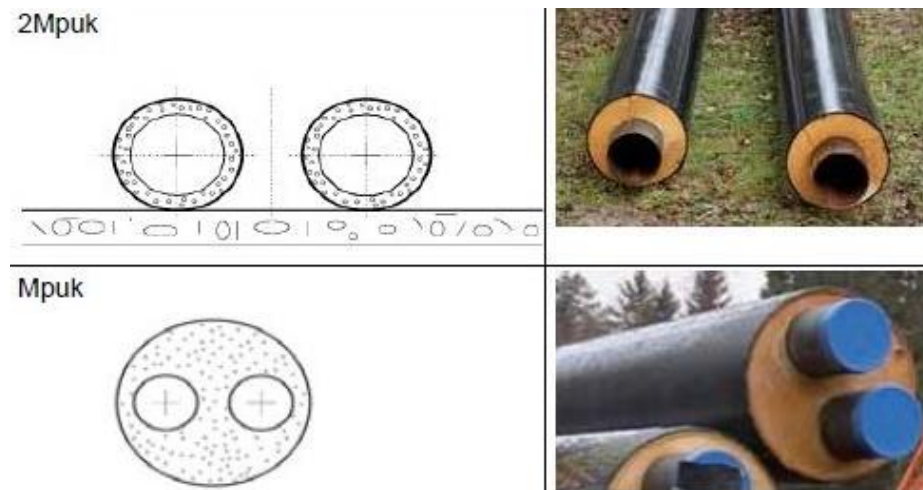
Perinteinen kaukolämpöverkon primääripiiri koostuu tyypillisesti lämmön ja sähkön yhteistuotantolaitoksista ja/tai erillisistä kaukolämpölaitoksista höyry-vesi- tai vesi-vesi-lämmönsiirtimiseen, kaukolämmön jakeluun ja painetason ylläpitoon tarkoitetuista kiertovesipumppuista, sekä eristetyistä putkista, joissa kiertovesipumppujen paineistama ja lämmöntuotannon lämmittämä kaukolämpövesi kiertää. Lisäksi jokainen kaukolämpöön liitetty rakennus on varustettu lämmönjakokeskuksella, joka liittää kaukolämpöasiakkaiden sekundääripiirit kaukolämpöverkon primääripiiriin. Suomessa kaukolämmön jakeluverkot ja kaukolämpöasiakkaiden omat lämmityspiirit eivät siis ole suorassa yhteydessä toisiinsa. Kaukolämpöasiakkaiden piirissä on ainakin kaksi lämmönsiirintä, yksi lämpimälle käyttövedelle ja yksi sisätilojen lämmitykselle. Lisäksi ilmastoinnin tuloilmalle voi olla oma lämmönsiirrin. Yleisin kytkentätapa lämmönsiirtimille lämmönjakokeskuksessa on rinnankytkentä, kuitenkin suurissa lämmönjakokeskuksissa tilojen lämmityksen lämmönsiirtimeltä palaavaa vettä syötetään välisyötöllä lämpimän käyttöveden piiriin. Lämmönsiirtiminä käytetään nykyisin vesi-vesi-mallisia juotettuja vastavirtalevyllämmönsiirtimiä. Lämmönsiirtimien ja rakennuskohtaisen putkiston muodostaman kiertopiirin avulla lämmitetään sisätiloja ja lämmintä käyttövettä, automatiikan sääätessä hetkellisen tehontarpeen mukaan lämmönsiirtimien läpi kulkevaa vesivirtaa. Lämmönjakokeskukseen kuuluvat myös omat kiertovesipumput, automaatio- sekä mittausinstrumentit sekä muut oheislaitteet (Abdurafikov et al. 2017). Kaukolämpöverkon asiakas on tyypillisesti liitetty muuhun verkkoon erillisen yhdysputken, talohaaran, kautta. Kaukolämpöverkko on suljettu piiri, jossa kuuma menovesi kiertää kiertovesipumppujen avustamana menoputkessa luovuttaen lämpöä lämmönkuluttajien omiin lämmönsiirtopiireihin ja jäähtyen samalla, palaten lopulta paluuputkea pitkin takaisin lämpökeskukseen tai lämmöntuotantolaitokseen uudelleen lämmitettäväksi. (Sun et al. 2014, Koskelainen et al. 2006, s.44, AFRY 2020c, s.9.)

Suomen kaukolämpöjärjestelmissä ei tyypillisesti käytetä alueellisia useamman asiakkaan käsittäviä lämmön alajakokeskuksia, sillä monet primääriset ja sekundääriset lämpöverkot lisäävät lämpöhäviöitä ja vaikeuttavat verkon operointia. Kuitenkin alueellisia, muusta kaukolämpöverkosta eristettyjä verkoston osia on tehty pilotoimaan esimerkiksi matalampien verkostolämpötilojen käyttöä. Esimerkiksi Turun Skanssin alueella on tällainen oma erillinen verkostonsa. Kaukolämpöä käyttävät asiakkaat ovat liitettyinä epäsuorasti kytketyn

rakennuskohtaisen lämmönjakokeskuksen kautta kaukolämmön primääriverkkoon muodostaen näin oman sekundäärisen kiertopiirinsä. Tässäkään tapauksessa rakennuksissa käytettävä lämmin käyttövesi ja tilojen lämmittämiseen käytettävän lämmönsiirtopiirin vesi eivät ole kaukolämmön primääripiirin vettä. (Planora Oy, DH-luentomateriaalit 2021, Koskelainen et al. 2006, s.43.)

2.2.1 Jakeluverkko

Suomessa kaukolämmön jakeluverkosto koostuu pääosin teräksestä valmistetuista virtausputkista, joiden ympärillä on kiinnivaahdotettu polyuretaanieristekerros ja pinnassa suojaava polyeteeni-muovikuori. Kaukolämpöputket asennetaan kaivantoihin yleensä kitkakiinnitteisesti ja peitetään maakerroksilla sopivaan peitesyvyyteen. Muovisuojakuorirakenteiset ja kiinnivaahdotetuista kaukolämpöjohdoista koostuvat kaksiputkijohdot, lyhenteeltään Mpuk, ja yksiputkijohdot, lyhenteeltään 2Mpuk, ovat käytetyimpiä. Kuvassa 4 on esitettyinä esimerkkikuvat kyseisistä johtotyypeistä. (Koskelainen et al. 2006.)



Kuva 4. Lämpileikkaus- ja esimerkkikuvat Suomessa käytetyistä kaukolämmön yksiputki- ja kaksiputkijohdoista (mukaillen Mäkelä & Tuunanen 2015, s.57).

2.2.2 Menovesi

Suomessa lämpimän käyttöveden lämpötilan minimiksi asiakaslaitteissa on määrätty 55 °C, johtuen mahdollisuudesta legionellabakteereihin alhaisemmilla lämpötiloilla (Valvira 2016,

s.16, Finlex 2017). Käytännössä itse kaukolämpöverkkoon syötetään pienimmän lämmitystarpeen aikaan kesällä 60–70 °C vettä täyttämään tämä lämpimän käyttöveden vaatimus. Talven voimakkaimpien lämmitystarpeiden aikaan menopuolella putkistossa vallitsevan korkeamman paineen, sekä lämmön huippukulutuksen takia kaukolämpöveden lämpötila voi olla jopa 120 °C. Tyypillinen verkostossa kiertävän veden lämpötila on noin 80 °C, mutta menoveden lämpötilaa säädetään jatkuvasti. Rajoittava tekijä menoveden lämpötilan kasvattamiselle on mm. kaukolämpöputkiston ja sen lämpöeristeiden kestävyys. Lisäksi verkoston lämpöhäviöt kasvavat kaukolämpöveden lämpötilaa kasvatettaessa, mutta tällä ei ole isoa merkitystä kokonaisuuden kannalta. Aikojen saatossa kaukolämpöputkien ympärillä käytetyn eristeen paksuutta on lisätty lämpöhäviöiden pienentämiseksi, sillä energiantuotannon kustannuspaineiden takia eristepaksuuden kasvattamisella kaukolämpöyhtiöt ovat saaneet kustannushyötyjä. Kaukolämpöverkossa kiertävä vesi ei saa missään vaiheessa verkostoa kiehua. Tämän takia muun muassa maaston muotojen mukaan muuttuva kiehumisraja tulee ottaa huomioon kaukolämpöverkoston painegradienttia määritettäessä ja verkkoa suunniteltaessa. (DH-luentomateriaalit 2021.)

Lämmöntuottajan toimittama kaukolämpöteho muodostuu kaukolämpöverkoston meno- ja paluuputkessa kiertävän veden lämpötilaerosta ja veden virtauksesta. Tarvittavan kaukolämpötehon tuottamiseksi lämmöntuottaja säätelee kaukolämmön menoveden lämpötilaa ulkolämpötilan mukaan erillisessä sekoituspiirissä tai kaukolämpöveden virtausta pumppauksen säädöllä. Menolämpötilan laskemista rajaavia tekijöitä ovat kaukolämpöasiakkaiden oman lämmönsiirtopiirin laitteiden mitoitus, käyttöveden lämmityksen riittävyys sääntelyn mukaisesti, etäisimmille asiakkaille riittävän korkean menoveden lämpötilan tarjoaminen matkalla tapahtuvien lämpöhäviöiden vuoksi, sekä menoveden lämpötilan nosto verkon siirtokyvyn ylläpitämiseksi tapauksessa, jolloin vesivirtaa ei verkoston mitoituksen takia voida enää nostaa. (Koskelainen et al. 2006, s.29, 335—336.)

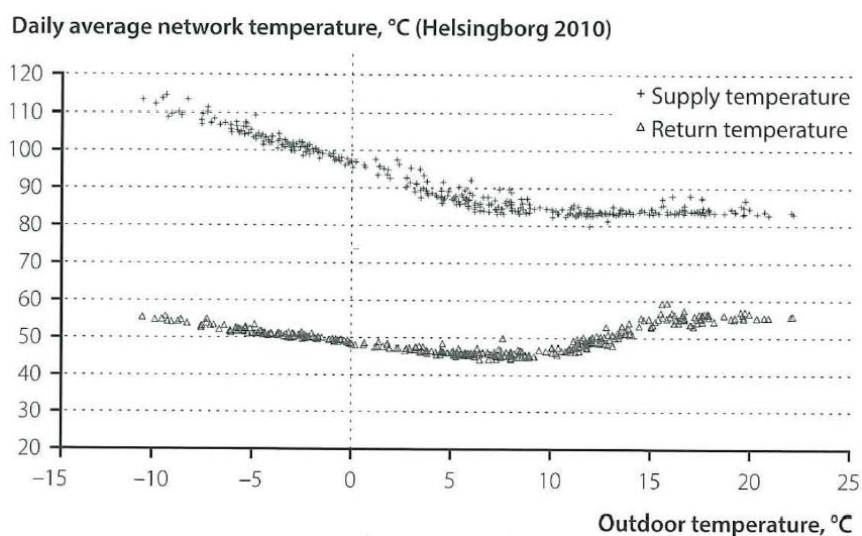
2.2.3 Paluuvesi

Menoveden ja paluueden lämpötilan erotuksella ΔT on merkittävä vaikutus kaukolämpöverkoston lämmönsiirtokapasiteettiin, sekä lämpövarastona toimimiseen verkostossa kiertävän vesimäärän ohella. Lisäksi paluueden lämpötilalla on vaikutusta lämmöntuotannon hyötysuhteeseen silloin, kun pystytään hyödyntämään savukaasupesureita. Korkeampi

paluueden lämpötila nostaa pumppauksen tarvetta ja siten kustannuksia, sekä lisää paluuputkistossa tapahtuvia lämpöhäviöitä. Kaukolämmön paluueden lämpötilalla on myös vaikutusta lämmöntuotannon kannattavuuteen ja kokonaishyötysuhteeseen, sillä korkeampi kaukolämmön paluuvesi heikentää mm. lämpölaitoksen savukaasupesurien toimintaa. (Hakkarainen 2019, s.34, Pöyry 2010, s.5-10.)

Kaukolämpöverkon paluueden lämpötila on aina korkeampi kuin lämmönkäyttäjän sekundäärisessä lämpöpiirissä käytettäessä vesi-vesi-lämmönsiirrintä, johtuen lämmönsiirtimen toiminnan vaatimasta lämpötilaerosta. Tämä lämpötilaero on yleensä noin 5 °C.

Nykyisissä kaukolämpöverkoissa eritoten maissa ja alueilla, joilla on selkeät kylmä ja lämmin vuodenaika, paluueden lämpötila tyypillisesti nousee kesän aikana kuvan 5 mukaisesti, toisin sanoen kaukolämpöveden jäähtymä pienenee. Tämä johtuu lämmönkulutuksen pieneemisestä, koska kesäaikaan lämmöntarve käsittää käytännössä pelkästään lämpimän käyttöveden valmistuksen. Tällöin kuumaa menovettä joudutaan kierrättämään takaisin paluueden joukkoon ilman, että menovesi välissä luovuttaa lämpöä kaukolämpöasiakkaan (sisätilojen lämmityksen) lämmönsiirtopiiriin. Matalan lämmönkulutuksen aikaan suurimmat ongelmat syntyvät yleensä kaukolämpöverkon loppupäähän kaukolämpöveden viimeisenä tavoitettavien asiakkaiden haaroihin, joissa vesi voi jäädä seisomaan putkistoihin ja jäähtyä liikaa. Ongelmia voidaan estää edellä kuvatulla ”ylituotannolla” tai rakentamalla ylimääräisiä kiertoputkistoja verkon loppupäähän (Koskelainen et al. 2006, s.209, 335-337).



Kuva 5. Kaukolämpöverkon meno- ja paluueden päivittäisen keskiarvolämpötilan muutos ulkoilman lämpötilan mukaan eräässä kaukolämpöverkossa (DH-luentomateriaalit 2021).

2.2.4 Jäähtymä

Kaukolämmön jäähtymällä tarkoitetaan kaukolämmön meno- ja paluuveden välistä lämpötilaeroa. Riittävä kaukolämmön jäähtymä on tärkeää, sillä liian pienellä jäähtymällä kaukolämpöputkiston vesivirtaamaa ja siten pumppaustehoa joudutaan kasvattamaan. Suuremmat putkikoot mahdollistavat kasvavat vesimäärät, mutta ovat lämmönkulutuksen vaihteluista johtuen suurimman osan ajasta ylisuuria omaten myös suuremmat investointikustannukset. Toisaalta virtaamaan nähden liian pienet putket aiheuttavat liiallisia painehäviöitä ja voivat pahimmassa tapauksessa nousta korkeammiksi kuin putkistojen maksimipaineen sietokyky tai pumppujen maksimi paineen tuotto (IRENA & Aalborg University 2021, s.84).

Erilaisia rakennuskohtaisia lämmöntuotantojärjestelmiä kuten esimerkiksi lämpöpumppuja kaukolämpöverkon yhteyteen kytkettäessä (=hybridijärjestelmä) on myös huomioitava kaukolämmön paluulämpötila. Kaukolämmön ja erillisen lämmitysjärjestelmän kuten lämpöpumpun tai aurinkokeräimen välinen kytkentä on yleensä rinnankytkentä, jolla pystytään minimoimaan vaikutukset kaukolämmön paluulämpötilaan (Rämä et al. 2015, s.27).

Kaukolämpöasiakkailta palaavan kaukolämpöveden lämpötilaan ja siten jäähtymään vaikuttavat asiakkaiden lämmönjakokeskusten tekniset ominaisuudet (Koskelainen et al. 2006, s.335). Menoveden lämpötilaa säädellään ulkolämpötilan mukaan. Ulkolämpötilan noustessa kaukolämmön kulutus tyypillisesti laskee sisätilojen lämmityksen tarpeen laskiessa, jolloin kaukolämpöverkkoon syötetyn menoveden lämpötilaa lasketaan kaukolämpölaitoksella käytetyn ajokäyrän mukaisesti. Samalla myös kaukolämpöverkossa kiertävän veden jäähtymä heikkenee. Kaukolämmön menoveden lämpötilaa ei kuitenkaan lasketa enää tietyn ulkolämpötilan raja-arvon jälkeen, jotta lämpimän käyttöveden tuotanto pystytään turvaamaan. Kaukolämpöverkon jäähtymä kuitenkin heikkenee vielä tämänkin jälkeen ulkolämpötilan kasvaessa.

2.2.5 Häviöt

Lämpöhäviöt vaihtelevat verkostokohtaisesti, suuremmissa kaukolämpöverkoissa häviöt ovat luokkaa 4—10 % ja pienemmissä luokkaa 10—20 % johtuen suuremmasta vaippapinta-alasta suhteessa verkoston siirtokykyyn. Lämpöhäviöt koostuvat kaukolämpöveden sisältämän lämpöenergian osittaisesta siirtymisestä johtumalla kaukolämmön menoputkesta

ympäröivään maaperään sekä paluuputkeen. Maaperän lämmönjohtavuus riippuu maa-aineksesta ja sen kosteudesta sekä lämpötilasta. On huomioitava, että kaikkia lämpöhäviöitä menovesiputkesta ei menetetä lopullisesti, sillä osa siirtyy paluuvesiputkeen ja pysyy kaukolämpöverkon kierrossa palaten takaisin lämmöntuotantolaitokselle. (Koskelainen et al. s.203.)

Lämpöhäviöiden aiheuttajia kaukolämpöverkossa on monia, ja lämpöhäviöiden minimoiminen on tärkeää mm. lämmön jakelukustannusten pienentämiseksi. Tyypillisiä lämpöhäviöiden aiheuttajia ovat (kulutukseen nähden) liian korkea menoveden lämpötila, putkistojen koon ylityttämisen kulutukseen nähden, korkea maaperän lämmönjohtavuus, putkiston liian läheinen sijainti maanpintaan nähden, sekä putkistojen vuotovedet jäädyttävänä tekijänä. Lämpöenergiaa pääsee siirtymään pois myös puutteellisten, heikentyneiden, tai eristykseltään liian ohuiden kaukolämpöputkien, sekä lämmöneristävyydeltään huonojen kaivojen kautta. Lisäksi kaukolämmön kulutusmittareiden epätarkkuudet tulkitaan lämpöhäviöiksi, sillä niitä ei voida käyttää kaukolämmöstä laskuttamiseen. (Koskelainen et al. s.209.)

Kaukolämpöputkistot pumppuine ja venttiileineen, sekä lämmönjakokeskukset ja lämmönsiirtimet tuottavat painehäviöitä. kaukolämpöverkoston jokaisessa pisteessä on pidettävä riittävän korkea painetaso lämmöntoimituksen varmistamiseksi ja kaukolämpöverkossa kiertävän veden kiehumisen ehkäisemiseksi. Toisaalta riittävän lämmönjakelun säädettävyyden varmistamiseksi kaukolämpöasiakkaiden lämmönjakokeskusten ja erityisesti niissä sijaitsevien säätöventtiilien yli tulee olla riittävän suuri paine-ero, joka on määritelty pidettäväksi vähintään 60 kPa lämmönjakokeskuksen yli. Kaukolämpöverkoissa lämmöntuotantopisteestä katsottuna kauimmaisena verkon latvapisteessä oleva asiakas on riittävän lämmöntoimituksen kannalta kriittisimmässä asemassa, jolloin kaukolämpöverkkoja operoidessa verkon latvapisteiden pienimmän paine-eron asiakkaalle taataan vaadittu 60 kPa ja muilla lähempänä tuotantopistettä sijaitsevilla asiakkailla paine-ero lämmönjakokeskuksen yli on suurempi. Lämmönsiirtimissä painehäviötä aiheuttavat veden virtauksen nopeus sekä lämmönsiirtimen geometria. Virtauksen nostaminen kasvattaa turbulenssia mikä tehostaa lämmön siirtymistä, mutta toisaalta kasvattaa myös painehäviöitä. (Energiateollisuus 2014, AFRY 2020c, s.16.)

2.2.6 Pumppaus

Voimalaitoksissa ja lämpökeskuksissa tuotetun kaukolämmön menoveden jakelemiseen kaukolämpöasiakkaille ja riittävän painetason ylläpitämiseen tarvitaan kiertovesipumppuja, jotka tyypillisesti kaukolämpökäytössä ovat radiaalityyppisiä. Lämmönoimittajan vastuulla on lämmöntarvetta vastaavan kaukolämpötehon tuottaminen riittävän korkean menoveden lämpötilan sekä virtauksen avulla. Kaukolämpöasiakkaiden omien lämmönsiirtojärjestelmien venttiilit säätävät sekundääripiirien virtausta asiakkaiden lämmönkulutuksen mukaan, aiheuttaen painehäviöitä lämmönjakokeskusten yli. Pumppaamiseen tarvittavan nostokorkeuden eli verkoston painehäviön voittamiseen ja painetason ylläpitämiseen käytetään paineenkorotuspumppuja, sekä lämmönsiirtotehon eli virtausmäärän säätelyyn ja sen parantamiseksi kiertovesipumppuja, joita voidaan kytkeä useita joko rinnan tai sarjaan. Rinnan kytketyt pumput kasvattavat virtausmäärää ja sen säätämisen mahdollisuutta, kun taas sarjaan kytketyt pumput lisäävät nostokorkeutta (painetasoa) ja sen säädettävyyttä. (Koskelainen et al. 2006, AFRY 2020c, s.8.)

3 KEHITYSSUUNNAT

Kaukolämpö nähdään yhtenä potentiaalisimmista alueista vähentää hiilidioksidipäästöjä, sillä sen osuus Suomen lämmöntuotannosta on suuri, ja lisäksi keskitetysti operoidulla kaukolämpöjärjestelmällä on helpommin mahdollista saavuttaa päästövähennyksiä ja energiatehokkuutta kuin yksittäisillä ja hajautetuilla toimilla, joissa riskinä on lisäksi ajautuminen osaoptimointiin. Globaalisti nyt ja vielä lisääntyvissä määrin ilmastonmuutoksen kehittyessä lämmitystä suurempaa tarvetta esiintyy jäädytyksessä, jonka tuotannosta hyötyisi myös kaukolämpöverkko, kun kaukojäähdytystä voitaisiin tuottaa samaa infrastruktuuria ja laitteistoa hyödyntäen mm. lämpöpumpuin ja absorptiokonein (Koskelainen et al. 2006, s.31).

Kaukolämmön, kuten kaiken muunkin energiantuotannon, merkittävin yhteinen kehityksen suunta on kohti uusiutuvien energiamuotojen käyttöönottoa, jotka mahdollistavat mm. kaukolämmön päästöjen vähentämisen (Paiho & Reda 2016, s.919). Lämmönlähteiden lisäksi kaukolämmön kehityssuuntiin kuuluvat myös energiatehokkuuden parantaminen, varastointikapasiteetin monipuolisempi hyödyntäminen, sekä näiden kaikkien käyttöönottoa ja hyödyntämistä tukeva digitaalisuuden lisääminen. Ilmastotavoitteiden ohella kaikella kehityksellä tavoitellaan lämmöntuotannon kustannusten minimoimista.

Erilaisia polttoon perustumattomia ja uusiutuvia teknologioita on käytössä jo kaukolämmönkin tuotannossa, samalla kun fossiilisten polttoaineiden polttamiseen perustuvaa tuotantoa ajetaan alas kansallisten ja kansainvälisten strategioiden siivittämänä. Uusiutuvia ja päästöttömiä kaukolämmön lähteitä ovat esimerkiksi geo- ja aurinkolämpö, sekä erilaiset hukkalämmöt. Näiden lämmönlähteiden hyödyntämiseen tarvitaan lisäksi lämpöpumppuja, jotka voidaan määritellä päästöttömäksi lämmöntuotannoksi, jos niiden kuluttama sähkö on uusiutuvalla, päästöttömällä energialla tuotettu. Erilaisia kaukolämmön tuotantomuotoja esitellään tarkemmin kappaleessa 4. Uusiutuvan kaukolämmön vaihtelevaa tuotantoa sekä kulutuksen vaihteluja tasaavat lämpövarastot. Muun muassa lämpöpumpputeknologian lisääntyessä lämmöntuotannon sähköistymisen kohdalla voi olla kannattavaa, että lämmön ja sähkön tuotannon sekä kulutuksen eriaikaisuutta hyödynnetään saaden näin synergiaetua sektori-integraatiosta. Digitalisaation mahdollistamalla älykkäillä kaukolämpöjärjestelmillä ja verkoilla saavutetaan seuraava kehitysaskel, minkä lisäksi ne auttavat mm. kysyntäjoustop toteuttamisessa.

Rakennusten lämmittämiseen liittyvä viimeaikainen suuntaus on ollut myös kaukolämpöasiakkaille avautunut mahdollisuus valita kaukolämpöverkkoon liittymisen sijaan jokin erillistuotettu lämmönlähde, esimerkiksi maalämpö. Tähän kehitykseen on vaikuttanut mm. Asumisen rahoitus- ja kehittämiskeskus ARA:n jakamat energia-avustukset koskien esimerkiksi rakennuskohtaisen lämpöpumpputeknologian käyttöönottoa (Asumisen rahoitus- ja kehittämiskeskus 2021). Toisaalta kaukolämmitystä puoltava merkittävä kilpailutekijä on päästöjen kustannustehokkaampi ja laaja-alaisempi vähentäminen keskitetyssä järjestelmässä verrattuna hajautettuihin rakennuskohtaisiin lämmitysjärjestelmiin (Koskelainen et al. 2006, s.26).

Historiallisesti kaukolämmössä aikaisemmin tapahtunut kehitys on kohdistunut energiatehokkuuden parantamiseen, putkimateriaalien ja niiden lämmöneristävyyden kehittämiseen, sekä uusien ja erilaisten lämmön tuotantomuotojen verkostoihin kytkemisellä (Paiho & Saastamoinen 2018). Kaukolämmön varhaishistorian suurimpina kehitysaskelina voidaan pitää höyryn käytöstä siirtymistä kuumaan, paineistettuun veteen, jolla oli mullistava vaikutus kaukolämpöverkossa syntyvien häviöiden pienentämisen kannalta (Lund et al. 2014). Kuitenkin Suomessa on käytännössä aina ollut käytössä vesikaukolämmitys, jonka maksimilämpötila on noin 120 °C. Suomessa useat eri kaupungit aloittivat kaukolämmön tuotannon 1950-luvulla, ajurin ollessa erityisesti yhdistetyn sähkön- ja lämmöntuotannon edut. 1970-luvun energiakriisi vauhditti kaukolämmön kasvua ja lisäsi tarvetta energiataloudelliselle ja energiahuolloltaan omavaraisemmalle järjestelmälle, tuoden mm. turpeen ja hakkeen kaukolämmöntuotannon polttoaineiksi. 1980- ja 1990-luvuilla kaukolämpöverkostot laajenivat ja verkkoja rakennettiin aiempaa pienempiin kaupunkeihin ja taajamiin. 2000-luvulle tultaessa mittausdata, erilaiset verkostojen laskentamallit ja lämmöntuotannon monipuolistaminen ilmastopäätösten ohella ovat nousseet aikakauden tunnuspiirteiksi. (Koskelainen et al. 2006, s.34-35.)

Paiho & Reda (2016) tutkimuksessa koskien Suomen kaukolämmön tulevaisuutta ja kehitystä esitellään muun muassa suomalaisen kaukolämmön nyky- ja tulevaisuuden tilan avainkohtia, jotka on esitetty taulukossa 2. Taulukosta 2 havaitaan, että kaukolämmityksen tulevaisuus pitää sisällään monia mahdollisia muutoksen alla olevia osa-alueita, joita tullaan esittelemään tämän työn tulevissa kappaleissa.

Taulukko 2. Kaukolämmityksen nykytilan ja tulevaisuuden tunnusmerkkejä (mukailten Paiho & Reda 2016).

Nykyinen kaukolämmitys	Tulevaisuuden kaukolämmitys
painotus (uusiutumattomissa) polttoon perustuvissa energialähteissä	kasvava osuus uusiutuvia, polttoon perustumattomia energialähteitä
pääasiassa keskitettyä lämmöntuotantoa	kasvava osuus hajautettua ja paikallista lämmöntuotantoa
kunnalliset tuotantomonopolit	energian sektori-integraatio (sähkö, lämpö, jäähdytys)
nykyiset osakkeenomistajat	lämpöverkkojen avautuminen ja prosuumerit (kaksisuuntaisuus)
menoveden lämpötila mitoitettu asiakaslaitteiden ja lämmöntuotannon mukaan	menoveden lämpötila mahdollistaa matalalämpötilaisempia lämmönlähteitä
energiatehokkuudeltaan erilaiset rakennukset kytkettynä kaukolämpöön	matalaenergiatalojen kasvava osuus kytkettynä kaukolämpöverkkoon
perinteiset teknologiat, vähäinen älykkyyden ja digitalisaation hyödyntäminen	lämmöntuotantoa tukevien teknologioiden hyödyntäminen (esim. lämpöpumput) ja älykkäät järjestelmät
perinteiset liiketoimintamallit	uudet liiketoimintamallit

Nykyisestä ja tulevaisuuden tehokkaasta kaukolämpöjärjestelmästä on EU:n tasolla esitetty seuraavat määritelmät: ”tehokkaalla kaukolämmitys ja -jäähdytysjärjestelmällä’ tarkoitetaan direktiivin 2012/27/EU 2 artiklan 41 alakohdassa määriteltyä tehokasta kaukolämmitys- ja jäähdytysjärjestelmää.” (Euroopan Unionin virallinen lehti 2018, s.22.). ”tehokkaalla kaukolämmitys ja -jäähdytysjärjestelmällä’ tarkoitetaan kaukolämmitys- tai jäähdytysjärjestelmää, jossa käytetään vähintään 50-prosenttisesti uusiutuvaa energiaa, 50-prosenttisesti hukkalämpöä, 75-prosenttisesti yhteistuotannosta saatavaa lämpöä tai 50-prosenttisesti tällaisen energian ja lämmön yhdistelmää.” (Euroopan Unionin virallinen lehti 2012, s.12). Tämän perusteella voidaan sanoa, että monet suomalaiset kaukolämpöjärjestelmät täyttävät nykyään oheisen määrittelyn johtuen mm. bioenergian runsaasta käytöstä, yhteistuotannon määrästä, sekä tehostuneesta hukkalämpöjen hyödyntämisestä.

Kaukolämpöverkkojen kehityksen yhteydessä on mainittu myös muun muassa kaupunkien tai maiden rajat ylittävien yliaalueellisten kaukolämpöverkkojen kehittäminen tarkoittaen, että eri maiden välisten sähkön siirtoverkkojen tapaan erillään olevia kaukolämpöverkkoja

yhdistettäisiin siirtoputkistojen välityksellä isommiksi eri alueet yhdistäviksi kaukolämpöverkostoiksi. Tämä kehityssuunta voi olla relevantti ja toimiva Keski-Euroopassa, jossa kaupunkeja ja taajamia on tiheään ja asukasmäärien takia lämpötiheys on suurta laajalla pinta-alalla. Suomessa kuitenkin kaupunkien välimatkat ovat yleisesti ottaen pitkiä ja lämpötiheys matalaa, jolloin kyseisenlainen kaukolämpöverkko voisi olla järkevä ainoastaan pääkaupunkiseudulla. (Moser & Puschnigg 2021.)

3.1 Kaukolämmön kehitys

Yleiskatsauksena tulevaisuuden kaukolämmön eurooppalaisissa tutkimuksissa ja selvityksissä esiin ovat nousseet nykykäyttöä matalampia lämpötiloja hyödyntävät kaukolämpöverkot, hukkalämpöjen hyödyntäminen sekä muut polttoon perustumattomat lämmönlähteet vähäpäästöisten tai hiilineutraalien polttoaineiden ohella, lämpöpumput, digitalisaatio sekä automaatio. Myös yhä suuremmilla lämpövarastoilla ja niiden pidempiaikaisella kausihyödyntämisellä nähdään olevan suurta potentiaalia osana tulevaisuuden kaukolämpöä ja energiajärjestelmiä saaden tasapainotettua tuotannon ja kulutuksen vaihteluita sekä pienennettyä tuotantokustannuksia. Lisäksi esimerkiksi Pohjoismaiden ja Suomen tapauksessa bioenergialla voidaan nähdä olevan merkittävää roolia kaukolämmöntuotannossa erityisesti siirtymävaiheessa pois fossiilisten polttamisesta kohti polttoon perustumattomia lämmön tuotantomuotoja. (Energiateollisuus ry 2020.)

Kaukolämmön erilaiset kehityskulut pitävät kuitenkin sisällään erilaisia haasteita. Jos kaukolämpöverkostojen lämmönsiirtokapasiteettia lasketaan lämpötilaeroa pienentämällä esimerkiksi lakimuutoksin, aiheuttaisi tämä verkoston hydraulisten ominaisuuksien laskua nostaten pumppauskustannuksia tai vaihtoehtoisesti huonontaa järjestelmän luotettavuutta lämmönjakelun suhteen. Uusien, madaltuneiden verkon syöttölämpötilojen täytyisi täyttää lämmönkysyntä kaikilla kaukolämpöverkon alueilla, mikä tarkoittaisi lämmönjakokeskusten oikeaa mitoittamista, sekä reaaliaikaista datankeruuta myös lämmönjakokeskuksilta. Myöskin kaukolämpöverkkoon liitettyjen rakennusten omien lämmönsiirtopiirien täytyisi kyetä toimimaan oikein, jos syöttölämpötiloja alennettaisiin. Koko kaukolämpöverkoston suunnittelu ja hallinta muuttuisi hankalammaksi, minkä lisäksi verkon eri komponentit, kuten venttiilit, verkon ohitukset ja sensorit voisivat aiheuttaa teknisiä rajoitteita ja muutostarpeita. Kaukolämpösopimukset vaatisivat uudelleen arviointia ja esimerkiksi muuttuneiden

toimituslämpötilojen sekä kaksisuuntaisuuden huomiointia uusien liiketoimintamallien muodossa. Suomessa lainsäädäntö määrää käytännössä menoveden lämpötilan minimin ja tuotanto maksimin. Reaaliaikainen menoveden lämpötilan mittaus määrittäne tulevaisuudessa matalimman lämpötilan. (Böhm et al. 2021, Planora Oy.)

3.1.1 Suomalainen malli

Kaukolämmön ja sen tuotannon voidaan nähdä Suomessa kehittyneen yksittäisistä kaukolämpöverkkoon kytketyistä lämpökattiloista ja -laitoksista, joissa laitokselta lähtevän kaukolämpöveden lämpötila on vakio (ensimmäinen sukupolvi), lämmönlähteiden monipuolistamiseen ja tuotantopisteiden lisäämiseen sekä ensimmäisten lämpövarastojen käyttöönottoon (toinen sukupolvi). Toisen sukupolven aikana kaukolämmön tuotantolaitoksilta kaukolämpöverkkoon lähtevän menoveden lämpötilaa aloitettiin säätämään vallitsevan ulkolämpötilan mukaan Lämpölaitosyhdistys ry:n säätökäyrää mukailten, joka on edelleen tänä päivänä käytössä. Verkostoja aloitettiin myös mitoittamaan hydraulisiin laskelmiin perustuen, jolloin pystyttiin ensimmäisen kerran ja yksinkertaisimmillaan optimoimaan lämmöntuotannon, -jakelun, ja -kulutuksen suhdetta. Myöhemmin verkostoihin lisättiin ensimmäiset IoT-pisteet datan hyödyntämistä ja lisäoptimointia varten. Toisen sukupolven aikana syntyneitä toimintamallia voidaan pitää perustana nykypäivän kaukolämpöverkostoille, jotka siis hyödyntävät useita lämmönlähteitä menoveden lämpötilan vaihdellessa noin 65—120 °C välillä riippuen ulkolämpötilasta, lainsäädännöstä, sekä lämmönkuluttajien ja -tuottajien teknisistä ratkaisuista investointi- ja tuotantokustannusten minimoimiseksi. (Planora Oy.)

Nykyään ja tulevaisuudessa kaukolämpöverkostoihin liitetään erilaisia uusiutuvan energian tuotantopisteitä pyrkien lämmöntuotannon hiilineutraaliuden saavuttamiseen. Toinen tavoite on pyrkimys kaukolämpöalan digitalisaatioon mm. yhdistämällä kaikki lämmönlähteet ja IoT-pisteet verkoston digitaaliseen kaksoseen ja hybridialustaan, jolloin esimerkiksi verkostojen häviöitä ja pumppauskustannuksia saadaan optimoitua kokonaiskustannusten kannalta paremmiksi verkostojen suunnitteluun käytettävällä off-line-laskennalla. Uudet tuotantopisteet ja digitalisaatio muodostavat Suomessa kaukolämmön uuden (kolmannen) sukupolven. Tulevaisuudessa off-line-laskennan lisäksi voi tulla on-line-laskenta, joka mahdollistaa reaaliaikaisemman optimoinnin eri tuotantopisteiden välillä. Lähtökohtana kaukolämpöalan digitalisoinnille voidaan kuitenkin pitää kaukolämpöverkostojen oikeanlaista ja riittävän

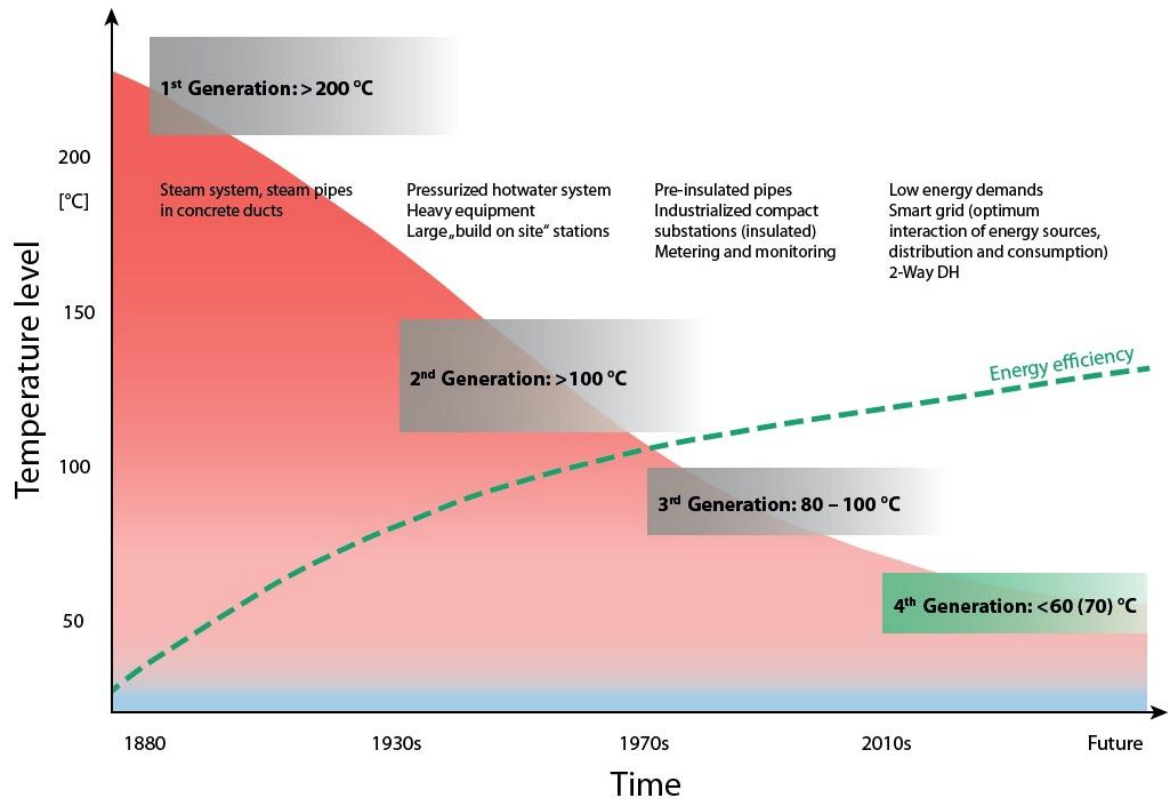
tarkkaa dokumentointia. Hybridialusta taas pitää sisällään kaiken datan, jota tarvitaan esimerkiksi verkostojen suunnitteluun, laskentaan, operointiin ja tuotettuihin palveluihin. Uusien tuotantomuotojen, digitalisaation ja hybridialustan yhdistämisen myötä tulevia kaukolämpöverkkoja voidaan kutsua myös hybridikaukolämpöverkoiksi. Liitteessä 1 on esitettyinä edellä kuvatun kaltainen näkemys suomalaisen kaukolämmön kehityskulusta sekä sen tulevaisuudesta. (Planora Oy.)

Suomalaisessa kaukolämmön tulevaisuuden mallissa kaukolämmön menoveden lisäksi myös paluuveden lämpötilalla nähdään olevan arvoa energiasisällön näkökulmasta. Tämä tarkoittaa sitä, että lämpöenergian kierrättäminen verkostossa tulee kokonaistaloudellisesti edullisemmaksi, kuin hajautetummat ja matalampia verkostolämpötiloja hyödyntävät mallit (vrt. seuraava kappale). Suomalainen kaukolämpömalli huomioi jatkossakin meno- ja paluuv veden välisen lämpötilaeron eli jäähtymän (ΔT) minimoidakseen tarvittavat putkistokoot, sekä järjestelmän investointi- ja operointikustannukset. Toimintaa ohjaa luonnollisesti tarve tuottaa asiakkaille niiden tarvitsema lämpöenergia tilanteessa kuin tilanteessa. (Planora Oy.)

3.1.2 Eurooppalainen (tanskalainen) malli

Eurooppalaisissa, esimerkiksi tanskalaisten tekemissä määritelmissä nykypäivänä käytössä olevia kaukolämpöjärjestelmiä kutsutaan kolmannen sukupolven kaukolämmöksi (3GDH). Näissä määritelmissä kaukolämmön kolmannen generaation voidaan katsoa alkaneen 1970-luvulla ja laajenneen pääteknologiaksi 1980-luvulla. Vaikuttaneina tekijöinä kyseisen sukupolven syntyyn toimivat öljykriisit, jotka lisäsivät tarvetta energiaturvallisuudelle tehostaen CHP-laitosten hyötysuhdetta ja hyödyntäen halvempia ja paikallisempia polttoaineita kuten kivihiihtä, biomassoja, turvetta ja jätteitä. Kolmannen sukupolven kaukolämmön tunnuspiirteitä ovat paineistetun ja kuumen, tyypillisesti alle 100 °C-asteisen mutta huipputehon tarpeiden aikaan tätä korkeampilämpötilaisen, veden käyttö esivalmistetuissa ja valmiiksi eristetyissä putkissa, jotka ovat asennettuina maan alle. Vielä nykyään kaikki uudet ja päivitettyt kaukolämpöjärjestelmät maailmalla perustuvat tässä määriteltyyn kolmanteen sukupolveen. Viime vuosikymmeninä myös joitakin polttoon perustumattomia kaukolämmön tuotantomuotoja kuten geotermistä lämpöä ja aurinkolämpöä on paikoin lisätty osaksi kaukolämpöjärjestelmien tuotantoa. (Lund et al. 2014, s.2.)

Kuvassa 6 on yleiskatsaus kaukolämmityksen kehityskulusta eurooppalaisittain sekä tulevaisuuden näkemys, johon osa kaukolämpöalan kansainvälisestä tutkimuksesta ja tulevaisuuden mielikuvista painottuu. Taulukossa 3 on lisäksi tanskalainen ajatusmalli tulevaisuudesta ja yksi kaukolämmön eri generaatioiden luokittelutapa.



Kuva 6. Eurooppalainen näkemys kaukolämmön kehityksestä (IEA 2021).

Taulukko 3. Tanskalainen näkemys kaukolämmön sukupolvista ja tulevaisuudesta (Böhm et al. 2021).

Kaukolämpösukupolvi	Lämmönsiirron väliaine	Verkoston lämpötila	Viitekehys
1GDH	höyry	>100 °C	vaarallinen lämmönsiirtoaine
2GDH	paineistettu kuuma vesi	pääosin >100 °C	erikseen rakennetut putket
3GDH	paineistettu kuuma vesi	usein <100 °C	enemmän esivalmistettuja putkia
4GDH	matalalämpötilainen vesi	30–70 °C	tehostettu esivalmistus ja -eristys
5GDH	vesi	0–30 °C	lämmitys & jäähdytys, boosterilämpöpumput

Pääajurina kuvassa 6 esitetyn uuden kaukolämpösukupolven kehittämiseksi toimii ilmastonmuutos. Neljännen sukupolven kaukolämpö (4GDH) huomioisi aiemmista generaatioista poiketen myös rakennusten energiatehokkuuden parantumisen, sekä älykkäiden energiaverkkojen kuten sähkö-, kaasu- ja lämpöverkkojen yhteisen hyödyntämisen.

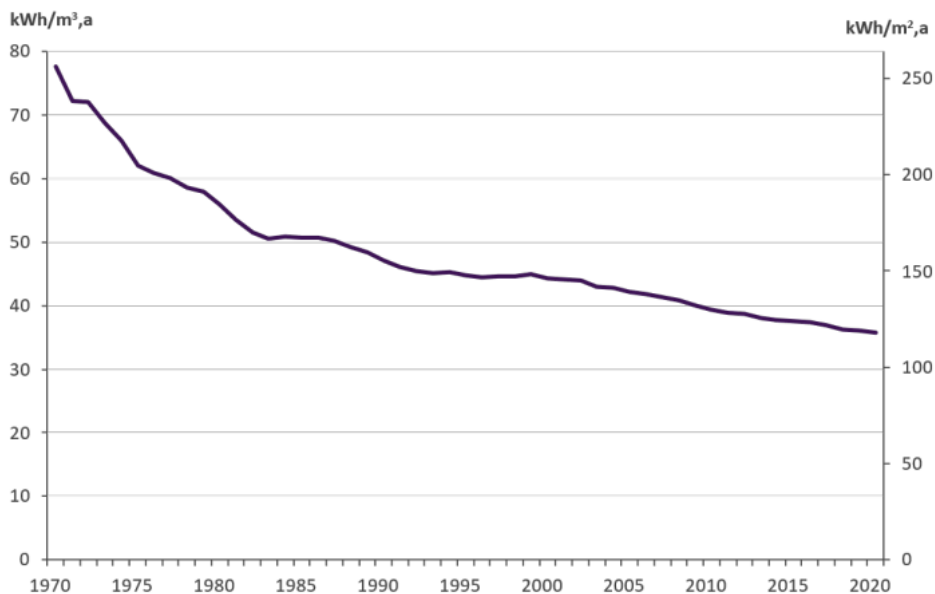
Kuten taulukosta 3 havaitaan, perusidea tanskalaisessa ajatusmallissa tulevaisuuden kaukolämmöstä on laskea verkoston lämpötiloja alas ja kohottaa tarvittaessa lämpötilaa esimerkiksi (rakennuskohtaisilla) lämpöpumppuratkaisuilla ja sähkökattiloilla. Esimerkiksi hukkalämmönlähteiden käyttö lisääntyisi hajauttaen näin lämmöntuotantoa nykyistä enemmän. Myös lämmönvarastointi olisi toteutettu hajautetusti ja osin rakennuskohtaisesti, jolloin lämmöntarpeiltaan erilaiset kaukolämpöasiakkaat tasapainottaisivat lämmöntarpeen ja -kysynnän vaihteluita.

Ongelmana tässä näkemyksessä, jossa verkoston lämpötiloja pudotettaisiin huomattavan paljon, voidaan nähdä kaukolämmön siirtoputkistossa kierrätettävän veden virtauksen vaikutus kaukolämmön huipputehontarpeeseen: menoveden lämpötilojen madaltaminen nostaa tietyn pisteen jälkeen kohtuuttomasti vesivirtausta samalla kun meno- ja paluuputkien välinen lämpötilaero ΔT pienenee, jolloin siirtokapasiteetin varmistamiseksi vaadittuja putkistodimensioita joudutaan kasvattamaan vaatien merkittäviä investointeja.

3.2 Rakennusten energiatehokkuus

Yli 85 % tänä päivänä käytössä olevista rakennuksista tulee olemaan käytössä vielä vuonna 2050, jolloin EU:n tavoitteidensa mukaan kuuluisi olla kokonaan hiilineutraali. Euroopan Komission viimeisimmässä ehdotuksessa (joulukuu 2021) on tarkoitus säätää European Green Deal niin, että vuonna 2030 kaikkien uusien rakennuksien tulee olla nollapäästöisiä. Julkisille rakennuksille säädös tulisi voimaan jo 2027. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että uusien rakennusten tulee kuluttaa vain vähän energiaa, energian tulee olla tuotettu uusiutuvilla energianlähteillä mahdollisimman pitkälti, rakennukset eivät tuota fossiilisten polttoainesten käytöstä aiheutuvia paikallisia hiilidioksidipäästöjä, ja rakennuksen energiatehokkuustodistuksesta tulee löytyä rakennuksen koko elinkaaren aikaisiin päästöihin pohjautuva globaalia ilmaston lämpenemisen potentiaalia kuvaava GWP-arvo. (European Commission 2021.)

Suomalaisten rakennusten energiatehokkuuteen on viimeisten vuosikymmenien aikana 1970-luvun energiakriiseistä lähtien panostettu merkittävästi erityisesti uudisrakentamisessa, mutta myös kunnostettavissa kohteissa, kuten kuvasta 7 nähdään. Energiatehokkuuden parantamisella tarkoitetaan muun muassa matala-, nollaenergia-, sekä passiivitalojen rakentamista ja olemassa olevien rakennusten eri komponenttien kuten esimerkiksi ovien ja ikkunoiden tiivistämistä ja päivittämistä matalamman U-arvon omaaviin. Erilaiset direktiivit ja rakennussertifikaatit kuten esimerkiksi LEED ja BREEAM, sekä rakennuksen energialuvun määrittämisen ja energiatodistuksen pakollisuus koskien uudisrakentamista ja suurta osaa olemassa olevasta rakennuskannasta tukevat ja kannustavat rakennusten energiatehokkuuden parantamiseen (Motiva 2021). Energiatehokkuuden myötä vähentyvä kaukolämmön tarve mahdollistaa myös uusien kaukolämmön käyttäjien verkkoon mukaan liittämisen ilman, että kaukolämpöverkkoyhtiön tarvitsee tehdä uusia investointeja esimerkiksi kaukolämpöputkistoon tai kiertopumppuihin. Toisaalta kaukolämmön tuotanto ja lämmönjakojärjestelmä suunnitellaan kiinteistön tarvitseman lämpötehon mukaan, jolloin merkittävä rakennusten energiatehokkuuden parantuminen ja lämmöntarpeen kuluttajakohtainen pienentyminen voivat heikentää lämmöntuotannon tehokkuutta ja siten kannattavuutta ainakin sähköntuotantoon pohjautuvien CHP-laitosten tapauksessa, jos uusia asiakaskohteita ei saada liitettyä kaukolämpöverkkoon samassa tahdissa. (Paiho & Reda 2016, s.918.)



Kuva 7. Suomalaisten kaukolämpöön liitettyjen rakennusten ominaislämmönkulutuksen kehitys sisältäen tilojen lämmityksen ja lämpimän käyttöveden kulutuksen (Energiateollisuus ry 2022b, s.7).

Energiatoteellisuuden vuonna 2021 julkaisema ohjeistus ”Rakennusten kaukolämmitys, määräykset ja ohjeet” (julkaisu K1/2021) koskee rakennusten lämmönjakokeskusten suunnittelua ja mitoittamista. Ohjeistuksessa näiden rakennusten lämmitystä ja ilmanvaihtoa syöttävien lämmönjakokeskusten mitoituksen perusteena oleva kaukolämmön tuloveden lämpötila on laskettu 115 °C:sta 90 °C:een uusissa suunnittelukohteissa. Muutos kannustaa panostamaan energiatehokkaisiin ratkaisuihin asiakaslaitteiden uusintainvestoinneissa, sekä sillä pyritään mahdollistamaan kaukolämpöverkoston tehokkaampi käyttäminen parantuvan jäähtymän ja pumppauskustannusten pienentymisen muodossa. (Energiatoteellisuus ry 2021a.)

Taulukko 4. Rakennuksen eri komponenttien U-arvoja ja niiden muutoksia Suomessa (Ympäristöministeriö 2022, mukaillen Paiho & Reda 2016).

Rakennuksen komponentti	U-arvo	1969	1976	1978	1985	2003	2007	2010
ulkoseinä	W/(m ² K)	0,41–0,93	0,4	0,29	0,28	0,25	0,24	0,17
lattia	W/(m ² K)	0,35–0,47	0,4	0,4	0,36	0,25	0,19	0,16
katto	W/(m ² K)	0,35–0,47	0,35	0,23	0,22	0,16	0,15	0,09
ikkuna	W/(m ² K)	2,44–3,14	2,1	2,1	2,1	1,4	1,4	1,0
ulko-ovi	W/(m ² K)	-	-	-	-	1,4	1,4	1,0

Taulukossa 4 on esitetty Suomen rakentamismääräyksiin tehtyjä muutoksia rakennuksen eri komponenteille vaadittuihin lämmönläpäisykykyihin eli U-arvoihin havainnollistamaan rakentamisen energiatehokkuuden kehittymistä vuosien saatossa.

3.3 Verkoston lämpötilojen optimointi

Kaukolämpöverkon menolämpötilan mahdollista laskemista on mm. perusteltu verkoston lämpöhäviöiden pienentämisellä, hukkalämpöjen ja muiden uusien lämmönlähteiden monipuolisemmalla hyödyntämisellä, sekä lämmöntuotannon tehostamisella esimerkiksi savukaasujen lämmöntalteenotosta mitoituslämpötilan laskiessa myös verkoston paluulämpötilaa. Toisaalta lämpötilatasojen reilumpi pudotus aiheuttaisi muutoksia kaukolämpöjärjestelmän eri osissa, mm. putkidimensioiden merkittävän kasvattamisen kaukolämpöverkon siirtokapasiteetin jäädessä muussa tapauksessa vajaaksi, sekä kaukolämpöasiakkaiden omien lämmönsiirrinjärjestelmien uudelleenmitoittamisen. Näiden johdosta

kaukolämpöverkostoihin täytyisi tehdä mittavia investointeja, jotka kustannussyistä eivät välttämättä olisi kannattavia. (AFRY 2020c, Planora Oy.)

Matalalämpöverkko nähdään mahdollisuutena erityisesti uusille asuinalueille tarkoitetuissa kaukolämpöverkoissa, joissa myös rakennuskanta suunnittelusta alkaen tähtää pienempiin energiahäviöihin sekä matalampia lämpötiloja hyödyntävään lämmitykseen, kuten esimerkiksi lattialämmitykseen. Tyypillisesti kaukolämpö kuitenkin shuntataan lattialämmitykseen, jolloin kaukolämpöverkon primääripiirin lämpötilaa ei tarvitse laskea vain siksi, että rakennuksia kytetään lämmittämään asumismukavuuteen sekundääripiirissä käytössä olevien matalampien lämpötilojen takia. Verkoston lämpötilojen laskeminen on relevanttia siinä mielessä, että se mahdollistaa aiempaa laajemman valikoiman lämmönlähteitä liitettäväksi kaukolämmön tuotantorakenteeseen, ratkaisujen taloudellisten ominaisuuksien näin salliessa. Näihin lukeutuvat muun muassa aurinkolämpö, geoterminen lämpö, (jäähdytys)ilmasta tai vesistöistä lämpöä tuottavat lämpöpumput, sekä muut matalamman lämpötilan hukkalämmönlähteet. Osa edellä esitetyistä lämmönlähteistä, esimerkiksi aurinkolämpö ja geoterminen lämpö, kykenevät kuitenkin tuottamaan vastaavia tai jopa korkeampia menoveden lämpötiloja kuin nykyisissä kaukolämpöverkoissa käytetään. (Böhm et al. 2021.)

Kaukolämpöverkoissa käytettyihin lämpötilatasoihin vaikuttavia tekijöitä on lukuisia. Lämpötilaa määrittäviä tekijöitä ovat kaukolämmön tuotanto, kaukolämpöverkon siirtokyky ja –kapasiteetti, käytetyt putkistomateriaalit, lainsäädäntö, sekä rakennusten sisäisen lämmönjakelun vaatimukset. Perinteisesti verkostoissa käytettyjä menolämpötiloja on puoltanut verkoston investointikustannusten minimointi, kun korkeampia lämpötiloja hyödyntämällä lämmöntarpeen täyttämiseksi vaaditut putkistodimensiot sekä lämmönsiirtopinnat eivät kasva kohtuuttoman suuriksi niin kaukolämpöverkoissa, kuin myöskään lämmönkuluttajien omilla lämmönjakopiireissä. Paluulämpötilan madaltaminen puolestaan maksimoi lämmönsiirron jäähtymää, jolloin kaukolämpöverkoston siirtokapasiteettia saadaan tehostettua samalla kun lämpöhäviöt ja pumppaustehon tarve vähentyvät. Myös paluueden lämpötilan määräytymisessä pyritään siis minimoimaan investointikustannuksia. Yhteistuotantolaitoksissa kaukolämpöverkon paluueden lämpötilan madaltamisella saavutetaan lisäksi tehostunut sähköntuotanto vastapainelaitosten tapauksissa. (Kauppila 2018.)

Kaukolämpöverkkojen lämpötilatasoja alaspäin puoltavia tekijöitä sekundääripiirien puolelta ovat muun muassa teknologiakehitys lämmönsiirtimien lämmönsiirtokyvyissä mahdollistaen pienemmät lämpötilaerot kaukolämmön primääri- ja sekundääripiirin välillä. Tämän

lisäksi rakennusten nykyiset lämmitysmuodot, energiatehokkuuden parantuminen ja matalampien lämpötilojen suosiminen kuluttajalaitteissa mahdollistavat, mutta eivät pakota, käyttämään primääripiirissä matalampia lämpötiloja. Kaukolämpöverkkojen lämpötilatasojen pudottaminen vaatisi ensin verkkoon kytkettyjen kaukolämpöasiakkaiden lämmönjakokeskusten uusimisen matalammille tulomitoituslämpötiloille soveltuviksi, joskaan tämä uusiminen ei olisi nopeaa vaan kestäisi kymmeniä vuosia (AFRY 2020c, s.34). Kuluttajalaitteissa kaukolämpöohjeistuksen mukaan käytettyjen lämpötilojen madaltaminen tehostaa kuitenkin kaukolämpöverkoston jäähtymää sekä pienentää lämpöhäviöitä. Kuten aiemmin kappaleessa 2.2.2 on kerrottu, Suomessa kaukolämpöverkkojen menoveden alarajan määrittää lämpimän käyttöveden lämpötilan vaatimukset, joiden minimiksi asiakaslaitteissa on määrätty 55 °C Kaukolämpöohjeen K1 mukaan. Lämpöpumpputeknologian sekä muiden polttoon perustumattomien tuotantomuotojen kehittymisen ja niiden kaukolämmöntuotannossa yleistymisen myötä matalammat verkoston lämpötilat voivatkin olla mahdollisia. Digitalisaation ja säätötekniikan kehityksen myötä tieto- ja viestiyhteyksien reaaliaikaisuus mahdollistaa kaukolämpöasiakkaiden olosuhteiden reaaliaikaisen seurannan ja muutoksiin reagoimisen. (Kauppila 2018.)

Jo nykyään monissa kaukolämpöverkoissa hyödynnetään muitakin kuin polttoon perustuvia lämmöntuotantomuotoja. Ilmastopäästösten myötä polttamista pyritään ainakin merkittävästi vähentämään, jolloin kaukolämpöyhtiöt joutuvat pohtimaan onko mahdollista ja taloudellisesti kannattavaa rakentaa kaukolämpöjärjestelmiä, joita operoidaan matalammilla lämpötiloilla kuin nykyisiä ja saada näin käyttöön monipuolisemmin polttoon perustumattomia lämmönlähteitä.

Kaukolämpöverkon lämpötilan laskemista on pohdittu osana seuraavien sukupolvien kaukolämmitystä. Lämpötilan laskeminen helpottaisi esimerkiksi erilaisten hukkalämmönlähteiden ja lämpöpumppujen hyödyntämistä osana kaukolämpöverkkoa sekä alentaisi lämmönsiirrossa tapahtuvia häviöitä (Kokkonen 2020, s.13). Alhaisemmalla verkon lämpötilalla lämpöpumppujen hyötysuhde on parempi (Joronen et al. 2021, s.13). Mitä matalammasta lämpötilatasosta lämpöpumpuilla joudutaan tekemään nykyiseen kaukolämpöverkkoon soveltuvaa lämpöä, sitä enemmän lämpöpumppu kuluttaa sähköenergiaa heikentäen pumpun hyötysuhdetta eli COP-arvoa.

Suuri osa varsinkin liike- ja julkisissa rakennuksissa sekä asuintaloissa esimerkiksi tilojen jäädytyksestä syntyvistä hukkalämmöistä on usein niin matalassa lämpötilassa, että niiden

hyödyntäminen suoraan nykyisessä kaukolämpöverkossa ei ole teknistaloudellisesti kannattavaa. Hukkalämpöjen tehokkaampaan hyödyntämiseen kaukolämmityksessä tarvitaankin kehittyneitä teollisen kokoluokan lämpöpumppuja tai kaukolämpöverkkojen lämpötilojen laskemista. Lämpöpumppuja sekä hukkalämpöjen hyödyntämistä kaukolämpöverkossa tarkastellaan laajemmin tulevissa kappaleissa. Lisäksi esimerkiksi geotermiset lämmönlähteet soveltuvat olemassa oleviin kaukolämpöjärjestelmiin integroitavaksi (IRENA & Aalborg University 2021, s.78).

Käytännössä matalalämpötilaverkkoja testattaisiin ja rakennettaisiin uusiin kaukolämpökohteisiin, sillä silloin sekä verkon, että rakennuskohteiden lämmönsiirron suunnittelussa pystyttäisiin kestävästi sekä taloudellisesti huomioimaan viileämmän kaukolämpöveden vaatimukset ja vaikutukset, sekä ennen kaikkea uusiutuvan energian ja hukkalämpöjen kokonaisvaltaisempi hyödyntäminen. Nykyisiin kaukolämpöverkkoihin matalalämpöverkon vaatimien muutosten tekeminen kasvattaisi liikaa investointikustannuksia, tehden niistä ekonominisesti kannattamattomia. Toisaalta matalalämpöverkot vaativat suurempia putkikokoja sekä lämmönsiirtimiä kuin nykyiset korkealämpötilaiset verkot, sillä kaukolämmöntarve ei tule ainakaan lähitulevaisuudessa radikaalisti muuttumaan. Suuremmat komponentit kasvattavat verkon kokonaisinvestointikustannuksia. (Pöyry Management Consulting Oy 2016.)

Turun Skanssin alueelle on Turku Energian toimesta rakennettu matalalämpötilainen ja kaksisuuntaiseen lämmöntuotantoon soveltuva alueellinen kaukolämpöverkko pilotoimaan uusia kaukolämpöratkaisuja. Verkossa käytetty kaukolämpöveden maksimimenolämpötila on nykyisiä kaukolämpöverkostojen menolämpötiloja matalampaa ja tyypillinen menolämpötila noin 65 °C. Alue on soveltuva tällaiseen pilotointiin, sillä kaikki verkkoon liitetyt rakennukset ovat uusia, energiatehokkaita, sekä lämmönjaoltaan soveltuvia matalampien verkon lämpötilojen hyödyntämiseen. Alueen suunnittelussa on otettu myös huomioon uusiutuva ja hiilineutraali lämmöntuotanto, sekä älykkäät energian ohjausjärjestelmät. (Turku Energia 2021.)

3.4 Kaksisuuntainen kaukolämpöverkko

Kaksisuuntainen kaukolämpöverkko tarkoittaa lämpöverkkoa, jossa verkon asiakas eli lämmön kuluttaja voi olla myös lämpöä verkkoon tuottava lämmön toimittaja. Esimerkiksi Pöyry Management Consulting Oy (2016) on tutkinut ja esitellyt kaksisuuntaisia

kaukolämpömarkkinoita, niiden mahdollisuuksia sekä erilaisia potentiaalisia liiketoimintamalleja, jotka huomioivat verkon kaksisuuntaisuuden. Kaksisuuntaisuus tulee olemaan olennainen tekijä mm. hukkalämpöjen suuremman mittakaavan hyödyntämisen kannalta, sillä teollisuutta ja joitakin muita hukkalämmönlähteitä (esim. datakeskukset, jätevedenpuhdistamot) lukuun ottamatta hukkalämmön lähteet ja niiden kokoluokat ovat usein jakautuneet laajasti kaukolämpöverkon alueelle.

Kaksisuuntaisuus kaukolämmössä voidaan määritellä eri tavoilla. Nykyisissä kaksisuuntaisissa verkoissa verkon haltija määrittää liittymisen ehdot. Asiaksnäkökulmasta kaksisuuntainen kaukolämpö tarkoittaa, että kaukolämmön ostamisen lisäksi asiakas voi myös myydä omaa lämmöntuotantoaan tai kiinteistössä syntyvää hukkalämpöä kaukolämpöverkkoon. Kaukolämpöverkon näkökulmasta kaksisuuntaisuus hahmottuu verkkona, johon aiemman yhden verkkoa hallinnoineen ja kaukolämmön tuotannosta vastanneen toimijan sijasta useammat lämmöntuottajat voivat syöttää lämpöä ja lämpöä käyttävät asiakkaat ostavat lämpöä eri tuottajilta, jolloin tämä laajennettu sovellus tarkoittaa käytännössä avointa kaukolämpöverkkoa. Riippumatta mahdollisista kaksisuuntaisuuden ja avoimen verkon eri variaatioista edellytyksenä kaksisuuntaiselle kaukolämpöverkolle on, että sen käyttöönotto parantaa kaukolämpöjärjestelmän kokonaistehokkuutta ja taloudellista kannattavuutta, liiketoiminnan ollessa samalla kaikille osapuolille selkeä ja oikeudenmukainen. (Pöyry Management Consulting Oy 2016, s.5-6.)

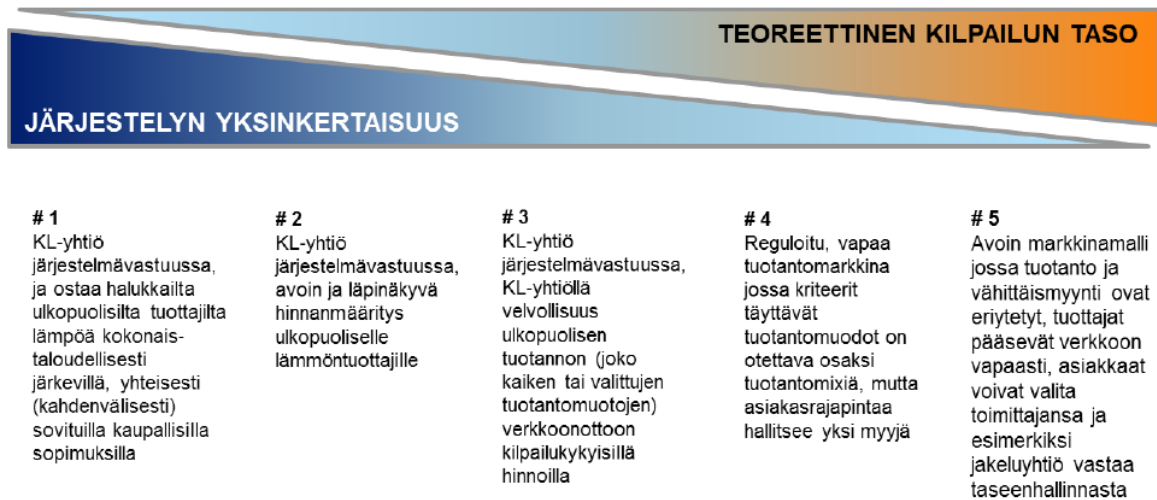
Kaksisuuntainen kaukolämpöverkko on verkon rakennusteknisen toteutuksen kannalta mahdollista toteuttaa joka puolella kaukolämpöverkkoa: Kaukolämpöverkkoon on siis ulkopuolisen lämmöntuottajan mahdollista syöttää lämpöä eli lämmintä tai kuumaa vettä mistä tahansa verkon osasta. Teknisesti kaukolämpöverkon ajamisen ja operoinnin näkökulmasta asia ei ole kuitenkaan niin yksinkertainen: Vaadittavien lämpötilatasojen tuottamisen ja asiakkaalle toimittamisen kannalta on väliä, minkä lämpötilaista lämpöä ja mistä kohtaa verkostoa sitä syötetään. Kaukolämmön tuotantolaitoksen tuottamaa lämpöä matalamman lämpötilan syöttäminen verkkoon sekoittuu tuotantolaitoksen lämmittämään veteen ja laskee verkon lämpötilaa, jolloin varsinkin verkoston kriittisissä pisteissä (kaukolämpöverkoston kauimmaisessa päässä menoveden syöttöön nähden) siirretty lämpö ei enää riitäkään vastaamaan lämmöntarvetta. Vastaavasti ulkopuolisen lämmöntuottajan verkkoon syöttämän lämmön ollessa menoveden paikallista arvoa korkeampi voi verkoston paine nousta paikallisesti kriittiseksi yli mitoitusarvon. Muun muassa näiden kuvatun kaltaisten tilanteiden

välttämiseksi on kaukolämpöverkoston avaamista ja sen kaksisuuntaisuutta suunniteltaessa verkon haltijan määritettävä siihen liittyjälle tekniset arvot. Apuna suunnittelutyössä toimivat esimerkiksi olemassa olevasta kaukolämpöverkosta luotu digitaalinen malli sekä hydrauliset laskennat, joiden avulla kaukolämpöverkon toimintaa ja kaksisuuntaisuuden aiheuttamia muutoksia voidaan arvioida.

Kaksisuuntaisen kaukolämpöverkon kehittymistä ja käyttöönottoa ehkäpä suurin jarruttava voima on ollut kaksisuuntaisuuden hinnoittelun järjestely ja oikeudenmukaisuus kaikille osapuolille, toisin sanoen kaksisuuntaiset verkot/kuluttajatuottajat eivät ole pystyneet Suomessa tuottamaan kaukolämpöä kilpailukykyiseen hintaan. Paitsi että kaksisuuntainen kaukolämpö on kaukolämpöyhtiöiden toimesta nähty mielenkiintoisena ja haluttavana kaukolämmön kehityssuuntana, on se myös laajasti nähty niiden liiketoimintaa haittaavana ja heikentävänä muutoksena. (Pöry Management Consulting Oy 2016.)

Kaksisuuntaiseen kaukolämpöverkkoon lämmön tuojan saaman korvauksen hinnoittelu ja sen määräytyminen olisi mahdollista toteuttaa sähköverkkoihin verrattavasti: tällöin lämmöntuottajalle maksettava hinta määräytyisi markkinaehtoisesti. Lisäksi kaksisuuntaisen kaukolämpöverkon liiketoiminnan reiluuden eri osapuolille mahdollistaisi kaukolämpöyhtiön liiketoiminnan eriyttäminen eri yhtiöihin myöskin sähköverkkojen tapaan, jolloin lämmöntuotannosta vastaisi oma yhtiö ja lämmönjakelun hoitaisi erillinen siirtoyhtiö.

Pöryn Management Consulting Oy:n (2016) raportissa kaksisuuntaisen kaukolämmön liiketoimintamalleista esitellään erilaisia markkinamalleja jaoteltuna järjestelyn yksinkertaisuuteen ja kilpailun teoreettiseen tasoon. Lähimpänä nykyistä kaukolämpöjärjestelmää olevat markkinamallit ovat kuvassa 8 vasemmalla ja kilpailullisesti vapaimmat markkinamallit ovat oikealla.



Kuva 8. Mahdollisia kaksisuuntaisen kaukolämmön markkinamalleja (Pöyry Management Consulting Oy 2016, s.5).

Kaksisuuntaisia kaukolämpöverkkoja on kokeiltu ja on käytössä jo monissa kohteissa Suomessa. Yksi uusi kaksisuuntainen kaukolämpöjärjestelmä on syntymässä Leppävirran kuntaan Savon Voiman toimesta. Muun muassa kaukolämpöverkon alueella sijaitsevat hiihto-areena ja jäähalli tuottavat niiden jäähdytyksessä käytettävien kylmälaitteiden toimesta lauhdelämpöjä, jotka ohjataan Savon Voiman operoimien lämpöpumppujen kautta kaukolämpöverkkoon. Kaukolämmön kulutuskohteet toimivat siis myös kaukolämmön tuotantopisteiden lämmönlähteinä. Myös Leppävirralla suunnitellaan muuta kaukolämpöverkkoa matalampilämpötilaista alueverkkoa tehostamaan lämpöpumppujen energiatehokasta toimintaa. (Savon Voima Oyj 2021.)

3.5 Hinnoittelu

Suomessa kaukolämpöyhtiöt ovat dominoivassa markkina-asemassa, sillä kaukolämpöverkot ovat paikallisia ja niitä hallinnoiva yritys tuottaa joko itse verkkoon syötettävän lämmön, tai hankkii lämmön niin sanotuilta ”tukkutuottajilta”. Markkina-aseman takia kaukolämmön hinnalle on asetettu rajoituksia: Hinnan pitää olla riittävässä määrin verrannollinen kaukolämmön tuotantokustannuksiin, hinnan tulee olla yhteneväinen samanlaisten lämpöasiakkaiden kohdalla poikkeusten vaatiessa perusteita, sekä kaukolämmön hinnan tulee olla kilpailukykyinen vaihtoehtoihin saatavilla oleviin lämmitysmuotoihin verrattuna. (Paiho & Saastamoinen 2018.)

Kaukolämpöasiakkaan lämmöstä maksama hinta koostuu kahdesta eri komponentista: lämmön kulutuksen mukaan määräytyvästä energiamaksusta, sekä kaukolämmön asiakaslaitteistossa kiertävän vesivirtamäärän eli liittymän koon mukaan määräytyvästä lämpötehomaksusta. Lisäksi kaukolämpöverkoston liittyessä asiakas maksaa erillisen liittymismaksun. (Motiva 2022.)

3.5.1 Uusia hinnoittelumalleja

Seuraavaksi esiteltävät kaukolämmön hinnoittelumallit perustuvat Pöyry Management Consulting Oy:n tekemään raporttiin Energiateollisuus Ry:lle ja Sitralle kaksisuuntaisen kaukolämmön liiketoimintamalleista. Esitellyt hinnoittelumallit pohjautuvat siis siihen oletukseen, että kaukolämpöverkostoista tulee ainakin jossain määrin kaksisuuntaisia ja avoimia. Hinnoittelumallien lisäksi raportissa mainitaan myös muista, pohjoismaisista sähkömarkkinoista tutuista, kaukolämmön hinnoitteluun mahdollisesti liitettävistä mekanismeista ja ilmiöistä, kuten aluehintojen muodostumisista ja erilaisista hintasuojauksista kaukolämmön hinnan vaihteluja vastaan. (Pöyry Management Consulting Oy 2016.)

Kiinteän hinnan mallissa kaukolämpöyhtiö ja ulkopuolinen lämmön tuottaja sopivat keskenään hinnan lämmön ostolle, lämmön tuottaja ei ole kuitenkaan kaukolämpöverkkoon toimitusvelvollinen. Hinta lämmölle on joko indeksikohtainen tai kiinteänä koko sopimuskauden kestävä. Kyseinen malli sopii uusille kaukolämpömarkkinoille ja uusia lämmöntuottajia etsittäessä.

Rajakustannusmallissa kaukolämpöyhtiö määrittelee ulkopuoliselta lämmön tuottajalta ostamansa lämmön hinnan perustuen sen oman kaukolämmöntuotannon rajakustannuksiin. Hinta vaihtelee jatkuvasti, päivä- tai tuntitasonkin muutokset ovat mahdollisia. Malli sopii isommille kaukolämpöverkoille, sekä kaukolämpöyhtiöille että lämmön tuottajille, joilla on riittävästi tuotantokapasiteettia.

Kapasiteettimallissa kaukolämpöyhtiö saa lämmöntuotantoa varten käyttöönsä lämmöntuottajan lupaaman kapasiteetin. Näin on kaukolämpöyhtiölle järkevää toimia, mikäli sillä on tuotanto- tai kapasiteettivajetta, tai omien investointien teko ei ole houkuttelevaa. Suuret (prosessi)teollisuuden laitokset ovat tyypillisiä kapasiteetin myyjiä kyseiseen malliin.

Avoimessa mallissa kaukolämpöyhtiö toimii lämmön siirtäjänä lämmön tuottajan ja kuluttajan välillä. Kaukolämpöyhtiö hallitsee kaukolämpöverkkoa ollen myös sen suurin lämmön tuottaja. Hinta riippuu lämmön kuluttajan ja tuottajan keskinäisestä sopimuksesta sähkömarkkinoiden tapaan, sopimuslämmön tuottajan ei siis tarvitse olla itse kaukolämpöyhtiö. Lämmön tuottajalla on vastuu toimittaa lämpöasiakkaalle sen hankkima lämpö. Tarvittaessa lämmön tuottaja voi paikata tasevajettaan ostamalla lämpöä kaukolämpöyhtiöltä.

3.5.2 Esimerkkejä

Esimerkiksi Helsingissä Helenin kaukolämpöverkkoon on eri toimijoiden mahdollista myydä ylijäämälämpöä liittymällä avoimeen kaukolämpöön. Verkkoon voidaan ostaa ulkopuolisilta toimijoilta kaikenlaista lämpöä, mutta käytännössä lämmön osto ja hinnoittelu on kohdistettu kaukolämpöverkkoon lämpötiloiltaan suoraan hyödynnettävissä olevalle lämmölle. Avoimeen kaukolämpöön liittyvä toimija ei ole toimitusvelvollinen Helenille, mutta Helen sitoutuu ostamaan kaiken sopimuksessa määritellyn lämmön pienentäen näin investointiriskiä, joka voi aiheutua esimerkiksi lämpöpumppujen hankkimisesta. Lämmön ostohinta määräytyy vuodenajan mukaan neljässä eri hintakategoriassa ollen alimmillaan 14,76 €/MWh kesällä ja korkeimmillaan 49,30 €/MWh talvella. (Helen Oy 2022a.)

Fortumin avoimen kaukolämmön ostohinnat poikkeavat Helenin hinnoittelusta niin, että lämmön hinta määräytyy portaittain ulkolämpötilan lisäksi sen mukaan, syötetäänkö lämpöä kaukolämpöverkon meno- vai paluuputkeen. Lämpimimmältä ajalta menopuolelle syötettävästä lämmöstä maksetaan 15 €/MWh ja paluupuolelle syötettävästä 8 €/MWh, kun taas kylmimmältä ajalta vastaavat ostolämmön hinnat ovat 50 €/MWh ja 35 €/MWh. Fortumin ja Helenin hinnoittelut avoimelle kaukolämmölle ovat verrattavissa kuvassa 8 esitettyihin markkinamalleihin numero 2 ja 3. (Fortum 2022a.)

Muualla Pohjoismaissa Tukholman kaksisuuntaiseen kaukolämpöverkkoon tuotetusta lämmöstä sen toimittajalle maksettu hinta vaihtelee lämmöntarpeen, sijainnin, toimitustavan, ja kaukolämmön tuotantokustannusten mukaan. Lämmön tuottaja pystyy valitsemaan, maksetaanko sille kapasiteetin vai tuotetun energian mukaan, ja onko toimitettava energia kaukolämpöä vai kaukokylmää. Energiamaksu voi perustua joko keskimääräiseen arvioituun hintaan, tai tuntitasolla muuttuvaan hintaan, jotka ilmoitetaan Nord Poolin sähköverkon lailla

edellisenä päivänä klo 16 tunneittain seuraavalle päivälle yhdessä lämpötilavaatimusten kanssa. (Pöyry Management Consulting Oy 2016.)

Kööpenhaminan suurkaupunkialueen useiden eri tuottajien kaukolämpöverkossa lämmön-
tuotanto on jaettu taloudellisen tehokkuuden saavuttamiseksi. Kaukolämpömarkkinaa sekä
kaukolämmön tuotannon suunnittelua ja optimointia on huolehtinut vuodesta 2008 lähtien
paikallisten lämpöyhtiöiden kooperaationa varta vasten tehtävään luotu toimija Varmelast
(Varmelast 2021). Monissa tapauksissa kaukolämpöasiakas joutuu maksamaan “tariffisak-
koa” jos asiakkaalta palaavan kaukolämpöveden lämpötila ei ole tarpeeksi matala, toisin sa-
noen jäähtymää ei ole riittävästi. Suomessa esimerkiksi Kuopion kaukolämpöverkossa asia-
kas maksaa lisähintaa, jos kaukolämpöveden jäähtymä ΔT menee liian pieneksi. Vastaavasti
Kööpenhaminassa asiakkaalle maksetaan bonusta ohjeistetun paluuveden lämpötilan alitta-
misesta, joka tyypillisesti on 50 °C tai alle. Tällä tavoin kaukolämmön kuluttajia kannuste-
taan mukaan tehostamaan järjestelmän tehokkuutta. Älymittareiden hyödyntäminen auttaa
muun muassa edellä mainitun kannustimen toteuttamisessa. (Galindo Fernández et al. 2016,
s.23.)

3.6 Digitalisaatio ja älykäs ohjaus

Erilaiset mitta-anturit ja ennen kaikkea niiden viimeaikainen hintakehitys ovat osatekijänä
olleet mahdollistamassa kaukolämmön digitalisaatiota sekä älykkääseen ohjaukseen siirty-
mistä. Esimerkiksi lämpötilan mittaamiseen käytetyt anturit maksoivat ennen tuhansia eu-
roja, kun nykyään niiden hinta lisätyn älyn kanssa on sadan euron luokkaa. Anturien kehi-
tyksen lisäksi Suomen vahva IT-teknologiaosaaminen on auttanut älykkyyden kehittämi-
sessä ja integroimisessa myös kaukolämpöverkostoihin. Datan ja informaation määrä lisään-
tyy vauhdilla ja niitä saadaan jo nyt valtavasti esimerkiksi eri mittaus- ja IoT-pisteistä. Dataa
pitää kuitenkin pystyä käsittelemään ja muokkaamaan tiedoksi sekä käyttökelpoiseen muo-
toon. Yksi nykypäivän haasteista on myös erilaisten tietokantojen ja tietoa käyttävien sovel-
lusten määrä sekä tiedonkäsittelyyn ja –siirtoon käytetyt perinteiset ohjelmointitavat, jotka
vaikeuttavat datan siirtoa ja käsittelyä eri sovellusten ja järjestelmien välillä. Kaukoläm-
pöjärjestelmien elinikä Suomessa on noin 50 vuotta, mutta ohjelmien tyypillinen elinikä vain
noin 5–15 vuotta, minkä lisäksi niitä päivitetään useita kertoja vuodessa toimijoiden ja tie-
tomallien samalla muuttuessa. Tietomalleista sektorikohtaisiin toimintamalleihin

siirtyminen tieto-objekteja hyödyntämällä voisi mahdollistaa tiedon monipuolisemman hyödyntämisen ja eri toimijoiden välisen toisistaan riippumattoman ohjelmakehityksen sekä toiminnan kaukolämpö- ja energia-alalla. (Planora Oy.)

Tietojen integroiminen, järjestelmien ja tietomallien jatkuva muuttuminen ja päivittyminen, sekä eri toimijoiden verkkoihin liittyminen onkin haaste tietojen, datan ja IoT-tiedon kokonaisvaltaiselle hyödyntämiselle. IoT-dataa oikealla tavalla hyödyntämällä saadaan optimoitua mm. kaukolämmön tuotantomäärät, tuotantomuodot, asiakaslaitteet, pumppauskustannukset ja lämpöhäviöt. Tulevaisuudessa tuotantolaitoskohtaisten ennustusten lisäksi olisi mahdollista tuottaa myös asiakaskohtaisia kulutusennusteita, jotka jakautuisivat vielä huoneisto- tai huonekohtaisesti mahdollistaen esimerkiksi lämmöntuotannon ja kysyntäjoustopäivästä tarkemman optimoinnin. Kaukolämpöverkostojen tarkka ja oikein luotu dokumentaatio toimii digitalisaation pohjana. Digitalisaatio, kuten kaikki muutkin kehityssuunnat, tähtäävät perimmäiseltä pohjaltaan kaukolämmityksestä aiheutuvien kustannusten optimointiin. (Planora Oy.)

Suomalainen energia-alan suunnittelu- ja konsultointiyritys Planora Oy kehittää kaukolämpöverkkoja ja niitä operoivien yhtiöiden toimintaa tarjoamalla mm. kaukolämpöverkkojen digitalisointiin sekä tiedonkäsittelyyn ja –hallintaan liittyviä ratkaisuja. Planora Oy:n kehittämä hybridialusta mahdollistaa kaukolämpöverkkoyhtiöiden verkkotiedon ja verkkotietoon liitetyn IoT-tiedon avulla luodun verkoston digitaalisen kaksohenkilön yhdistämisen ja hyödyntämisen. Verkon digitaalinen kaksohenkilön taas mahdollistaa kaikenlaisen kaukolämpöverkon tiedon hyödyntämisen laskennassa, mitoittamisessa ja eri ohjelmissa. Oikeanlainen ja oikein luotu verkkotieto on kaukolämpöverkkoa operoivan yhtiön toiminnan peruspilari, sillä silloin verkkotietoon ovat suoraan liitettävissä kaikki toiminnan kannalta oleelliset parametrit ja tiedot kuten esimerkiksi asiakastiedot, mittareiden välittämä data, kunnossapito, omaisuudenhallinta, työn ohjaus, suunnittelujärjestelmät ja operointijärjestelmät. Digitaalisen kaksohenkilön ja Planora Oy:n kehittämän kolmen pisteen ohjauksen avulla kaukolämpöverkkoa pystytään operoimaan älykkäästi parantaen samalla lämmönkuluttajan asiakaskokemusta. Palvelut mahdollistavat esimerkiksi kaukolämpölaitoksen verkkoon syöttämän veden lämpötilan kontrolloinnin, lämmönjakokeskuksen rakennuskohtaiseen lämmönsiirtopiiriin siirtämisen lämpömäärän määrittämisen, sekä huoneistokohtaisten termostaattiventtiilien säätämisen. Näiden kaltaisilla ratkaisuilla saavutetaan ympäristöystävällinen kaukolämpöverkostojen operointi mahdollistaen hiilineutraaliuuden pyrkimisen, parempi asiakastyytyväisyys,

sekä säästöjä verkostojen investoinneissa ja käyttökuluissa. Planora Oy:n kehittämiä verkoston tieto- ja hallintajärjestelmiä olisi mahdollista hyödyntää esimerkiksi niin kaksisuuntaisessa kaukolämmössä kuin kysyntäjoustossakin. (Planora Oy.)

3.7 Kysyntäjousto

Kysyntäjousto voidaan nähdä hajautettuna lämpöenergiavarastona rakennusten termisen massan sitoessa lämpöä ja säilyttäessä asumismukavuuden kysyntäjouston myötä tapahtuvan hetkellisen lämpötehon laskemisen seurauksena (Salo et al., 2019, Kokkonen 2020, s.25). Kysyntäjouston ohjaus kaukolämmössä voidaan toteuttaa kaukolämpöyhtiön lämmön tuotannossa tai lämmönkuluttajien lämmön käytön rajoittamisessa. Molemmissa tapauksissa kysyntäjousto tuo samoja hyötyjä, jotka ovat kaukolämmön kulutuspiikkien tasoittaminen, lämmöntuotannon kustannusten laskeminen, sekä päästöjen vähentäminen.

Kysyntäjoustolla pystytään lämpövarastojen ohella tasaamaan kaukolämmön kysynnän hetkittäisiä kulutushuippuja. Tästä kysynnän tasaamisesta kaukolämmöntuottaja hyötyy taloudellisesti, sillä sen ei tarvitse investoida tai käyttää lämmön huipputuotantoon käyttökustannuksiltaan kalliita ja yleensä fossiilisten polttoaineiden polttoon perustuvia huippukuormalaitoksia. Myös hiilidioksidipäästöt vähenevät tällöin, eikä lämmöntuotannosta tarvitse maksaa päästöoikeuden hintaa, jos kysyntäjoustolla pystytään välttämään fossiilisten polttoaineiden käyttöä. Kysyntäjoustolla taas ei kaukolämpöasiakkaan kannalta ole havaittavaa haittaa sisätilojen lämmityksen osalta, sillä rakennusten termisen massa tasaa lämpötilojen vaihtelua eikä yhdestä muutamaan lämpötila-asteeseen tapahtuva jousto vaikuta asumismukavuuteen. Olennaista on kuitenkin turvata kaukolämpöasiakkaan lämpimän käyttöveden tuotanto jokaisena ajanhetkenä.

Kysyntäjouston tavoite ja toiminnan ydin kohdistuu ennen kaikkea hetkellisen lämpötehon tarpeen rajoittamiseen, eikä niinkään lämpöenergian säästämiseen. Hetkellisen lämpötehon rajoittamisen myötä kulutushuippuja saadaan tasoitettua ja käyttökustannuksiltaan kalliiden huippu- ja varalaitoksien tuotantoa siirtämään lämmön perustuotantoa tekevien laitosten puolelle, jolloin kaukolämmöntuotannon taloudellisuus parantuu sekä ympäristövaikutukset pienenevät. Kysyntäjousto suunniteltaessa ja sen käytännön toteutuksessa olennaista on tarkastella kaukolämpöjärjestelmää kokonaisuutena, sillä kysyntäjouston todelliset hyödyt tulevat vasta järjestelmätasolla investointien tai lämmöntuotannon operoinnin kautta

syntyvistä rahallisista säästöistä. Kysyntäjouaston kannattavaan toteutukseen ja energiantuotannon optimointiin tarvitaan automatiikkaa ja säädettävyyttä kysyntäjouaston piirissä olevalta rakennuskannalta, sekä tarpeeksi suuri määrä kytkettyjä asiakaskohteita. Toisaalta suuremmissa kaukolämpöverkoissa asiakasmäärä itsessään tasoittaa jo järjestelmän kulutus- huippuja, kun eri kulutuspisteiden kysyntähuiput vaihtelevat ajan suhteen, puhutaan siis ris-teilystä. Kaukolämpöverkon ominaisuuksista johtuen lämmöntuotannossa toteutettavat toi-met näkyvät verkon eri osissa viiveellä, mikä osaltaan hankaloittaa kysyntäjouaston toteutusta ja hallintaa. (VALOR Partners Oy 2015.)

Kysyntäjouaston potentiaali on aina kaukolämpöjärjestelmästä riippuvainen. Nykyisten rat-kaisujen ja kokemusten perusteella saavutettavat vuosisäästöt ovat muutaman prosentin luokkaa. Merkittävimmät kysyntäjouastosta saatavat hyödyt tulevatkin usein juuri lyhyiden lämmön kysyntähuippujen tasoittamisesta, jolloin huippukuormalaitoksien käynnistyksiä ja alasajoja voidaan vähentää parantaen niiden sekä myös perustuotantolaitoksien käyttöas-teita. Kysyntäjouastolla saatavien säästöjen kannalta soveltuvimmat kaukolämpöjärjestelmät ovat sellaisia, joissa lämmöntuotantolaitokset on mitoitettu niukasti kaukolämpökuorman vaihteluiden suhteen, perus- ja huippulämmöntuotannon kustannuksissa on erityisen suuria eroja, verkkoon syötetään hukkalämpöä, joka kattaa vain osan vaaditusta tehosta, tai kauko-lämpöverkkoa ei ole optimoitu asiakastiheyden tai verkon pullonkaulojen osalta. Toisaalta kysyntäjouastolla potentiaalisesti saatavat hyödyt vähentyvät, jos kaukolämpöjärjestelmässä on suurta lämpövarastokapasiteettia, monipuolista lämmöntuotantoa, verkostolla on suuri kuormitustiheys, tai joko lämmöntuotantolaitokset tai kaukolämpöverkko ovat väljemmin mitoitettuja. Vuoden ajanjaksolla kysyntäjouastolle potentiaalisinta aikaa ovat kevät, syksy ja soveltuvilta osin talvi johtuen vuorokauden sisäisten lämpötilojen suurista vaihteluista ja niistä aiheutuvista lämpökuormien muutoksista. Kuitenkin talven kylmimpinä huipputehon-tarpeen aikoina sekä kesäajan pienimmän kulutuksen aikana kysyntäjouastolla saavutettavat hyödyt jäävät todennäköisesti vähäisiksi tai kysyntäjouastoa ei ole kannattavaa toteuttaa. Ky-syntäjouaston avulla CHP-tuotannon säätely voi lisääntyä tulevaisuudessa, kun halutaan lisätä sähköntuotannosta saatavia tuloja vaihtelevan ja korkean sähkön hinnan ajalta. Myös läm-pöpumppujen käytön ajoittamista edullisen sähkön hinnan mukaan on mahdollista toteuttaa kysyntäjouastoa hyödyntämällä. (VALOR Partners Oy 2015.)

Kysyntäjouaston suunnittelun ja ohjauksen järjestelmätasolla hoitaa kannattavimmin kauko-lämpöyhtiö, jonka toimesta ja ajoituksesta riippuen kysyntäjouaston piiriin liitetyt

kaukolämpöasiakkaat laskevat hetkellistä kaukolämpötehoaan sisätilojen lämmitykseen tarkoitetuissa sekundääripiireissään palvelu- ja asumismukavuuden rajoissa. Huomionarvoista toteutuksessa on kuitenkin välttää kulutuspiikin ajallista siirtämistä tai negatiivisen kysyntäjouston aiheuttamista antamalla kaikille kysyntäjouston piiriin kuuluville asiakkaille samanlainen hinta- tai muu ohjaussignaali. (VALOR Partners Oy 2015). Lämmön kysyntäjoustossa kaukolämpöasiakkaiden omat, kaukolämpöverkon sekundääripiirissä sijaitsevat, lämminvesivaraajat tai vastaavat lämpökuormaa omaavat laitteet ovat älykkäiden mittareiden avulla kytkettyinä kaukolämpöverkkoon ja voivat toimia myös molempiin suuntiin sekä lämmönjakelussa, että -varastoinnissa (Kokkonen 2020, s.15).

Kysyntäjouston toteuttamisessa on huomioitava kuitenkin useita asioita, jotta se toimisi halutulla tavalla ja jotta kokonaisyöty kaukolämpöjärjestelmälle olisi positiivinen. Kysyntäjouston toteutusmalli tulee rakentaa ja toteuttaa asiakaskohteissa siten, että lämpötehopiikin ajankohta ei vain siirrä paikkaa tai tehopiikin suuruus ei pahimmassa tapauksessa jopa kasva. Tämän estämiseksi kiinteistöt tarvitsevat älykkäitä järjestelmiä kysyntäjouston ohjaukseen varmistamaan, että eri kiinteistölle annetaan erilaisia ohjaavia signaaleita hinnoittelun tai muun vastaavan muodossa. Älykkäitä järjestelmiä ja koneoppimista tarvitaan myös kaukolämpötehotarpeen oikein ennustamisessa, jotta kaukolämpöasiakkaiden lämmönkäytön toteutuma ei aiheuta kysyntäjouston kautta haitallisia vaikutuksia järjestelmätasolla. Kysyntäjouston hinnoittelun kannattaisi olla enemmän dynaamispainotteinen kiinteiden kannustimien sijaan, jotta mahdolliset riskit kysyntäjouston hyötyjen toteutumattomuudesta eivät realisoidu kaukolämpöyhtiöille suurempina tappioina. Myös kysyntäjouston toteutukseen järjestelmätasolla vaadittavat investoinnit voivat kasvaa oletettua suuremmiksi, ja sama tuotannon jouston vaikutus voidaan saada halvemmalla aikaan kaukolämpöakun avulla. (VALOR Partners Oy 2015, s.15-16.)

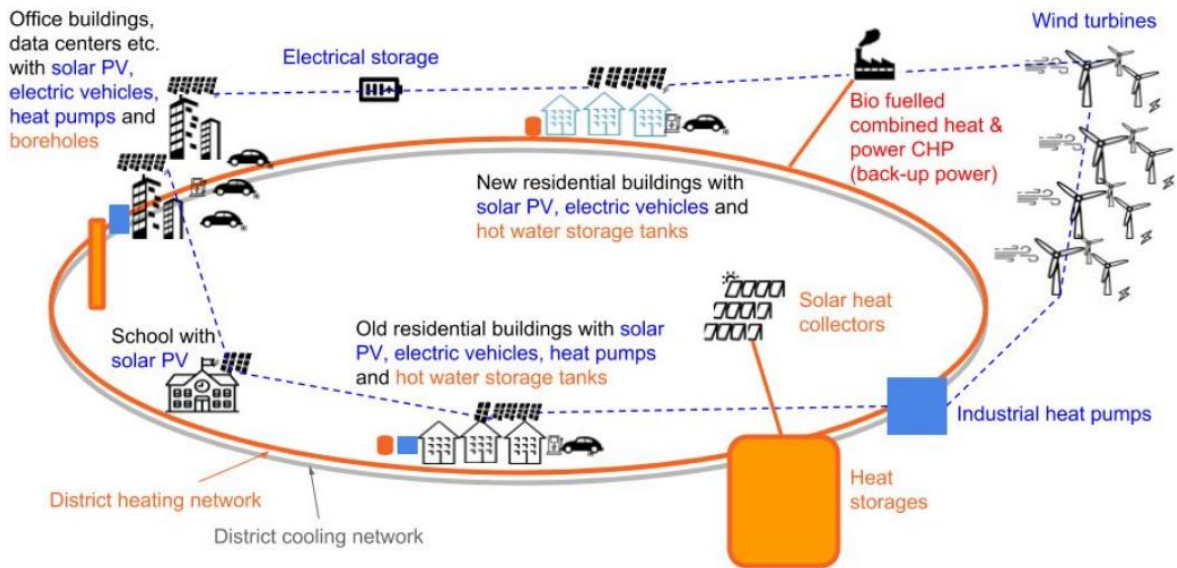
3.8 Sektori-integraatio

Kaukolämpöjärjestelmän käyttöä osana laajempaa energijärjestelmää eritoten vaihtelevan uusiutuvan sähköenergian varastona olisi järkevää hyödyntää, sillä kaukolämpöverkko tarjoaa verkoston sisältämän energian määrältään, säädettävyydeltään ja sijainniltaan asutuskeskuksiin nähden keskitetyn energian varastointimuodon. Uusiutuvilla polttoaineilla tai muilla uusiutuvan energian tuotantomuodoilla tuotettua sähköenergiaa muutetaan erilaisin

teknologioin lämpöenergiaksi, ja tällä tavoin kaukolämpöverkko varastoi energiaa tasaten tuotannon ja kysynnän vaihteluja noin 24 tunnin aikaikkunassa. Energiasektoreiden välisen integraation ja kommunikoinnin mahdollistavat älykkäät ja tekoälyä sisältävät järjestelmät. (Oilon Group Oy 2021a.)

Esimerkiksi erilaiset P2H-teknologiat kuten lämpöpumput ja sähkökattilat auttavat tulevaisuudessa sähkö- ja lämpöverkkojen synergiaetujen saavuttamisessa ja voivat mahdollistaa mm. kysyntäjouston (Kokkonen 2020, s.15). Käyttämällä sähköä osana kaukolämmön tuotantoa esimerkiksi sähkökattiloiden ja lämpöpumppujen muodossa auttaa myös sähkön tuotantoa ja sen kannattavuutta, kun vaihtelevan uusiutuvan energian tuotannosta aiheutuvaa kysynnän ja tarjonnan epätasapainoa sekä siitä johtuvaa sähkön hintojen vaihtelua kyetään tasapainottamaan kaukolämpöverkon avulla. Käytännössä sähköllä tuotetun kaukolämmön määrää rajoittavat sähkön siirtoverkkojen kapasiteetti, sähkön markkinahinta, sekä lämmöntuotantoon käytettävän sähkön verotus. Kaukolämpöverkoilla on lämmöntuotannon sähköistämisesäkin merkittävä rooli, sillä ilman keskitettyä lämmöntuotantoa ja -jakelua menetetään sektori-integraation aikaansaamat mm. säädettävyyteen, energian varastointiin, sekä energian- ja järjestelmän kokonaishintaan liittyvät hyödyt verrattuna tilanteeseen, jossa lämmöntuotanto olisi eriytetty ja kuluttajat tuottaisivat itse lämpönsä. Lämmöntuotannon päästöttömyyteen pyrkimisen näkökulmasta P2H-teknologioiden hyödyntämistä Suomessa puoltaa myös jo nykyään vahvasti uusiutuviin energialähteisiin painottuva pohjoismainen sähköntuotanto. (Kokkonen 2020, s.69.)

Kuvassa 9 on esitetty tulevaisuuden kaukolämpöjärjestelmää kuvaava kaavio, jossa on otettu huomioon monia tässäkin työssä esiteltyjä tulevaisuuden kaukolämmön teknologioita ja ominaisuuksia. Mukana on myös erilaisia sähköverkkoihin liittyviä ominaisuuksia, kuten aurinkosähkön tuotantoa, sähköautojen käyttöä, sekä sähkövarastoja. Vaikka sähkö ja lämpö ovatkin erillisiä energiamuotoja, näkyy kuvassa 9 niiden monenlaiset suhteet ja yhtymäkohdat toisiinsa nykyaikaisessa ja tulevaisuuden energiaverkoissa sekä kaupunki-infrastruktuurissa.



Kuva 9. Kaukolämpö- ja jäähdytysverkoston integraatio sähköverkkoihin ja muihin kaukolämmön kehityssuuntiin (Rinne et al. 2018).

Kankaanpäähän Vatajankoski Oy:n omistamaan kaukolämpöverkkoon rakennetaan Polar Night Energy:n kehittämää kaukolämpövarastoa, jossa lämpöä varaava aine on hiekkaa. Kyseessä on maailman ensimmäinen kaupallinen kaukolämpöverkkoon sijoittuva hiekka-akku. Lämpötehoa varastossa on 100 kW ja lämpöenergiakapasiteettia 8 MWh. Hiekkaa lämpövarastoon mahtuu noin satatuhatta tonnia ja se lämmitetään ensin sähkövastuksilla noin 500 °C:een. Varasto hyödyntää siis P2H-teknologiaa, mikä tarkoittaa kyseisen lämpövaraston toimivan myös esimerkkinä lämmön ja sähkön sektori-integraatiosta. Hiekka-akun hyötyjä ovat akkumateriaalin saatavuus ja edullisuus, lämpötekniset ominaisuudet, sekä soveltuvuus tulevaisuuden sähköistyvään kaukolämmitykseen. Hiekka-akku on ulkomitoiltaan 7 m korkea ja 4 m halkaisijaltaan. Kankaanpään lisäksi Polar Night Energyllä on 3 MWh pilottilämpövarasto Tampereen Hiedanrannassa. (Yle 2021, Polar Night Energy 2022.)

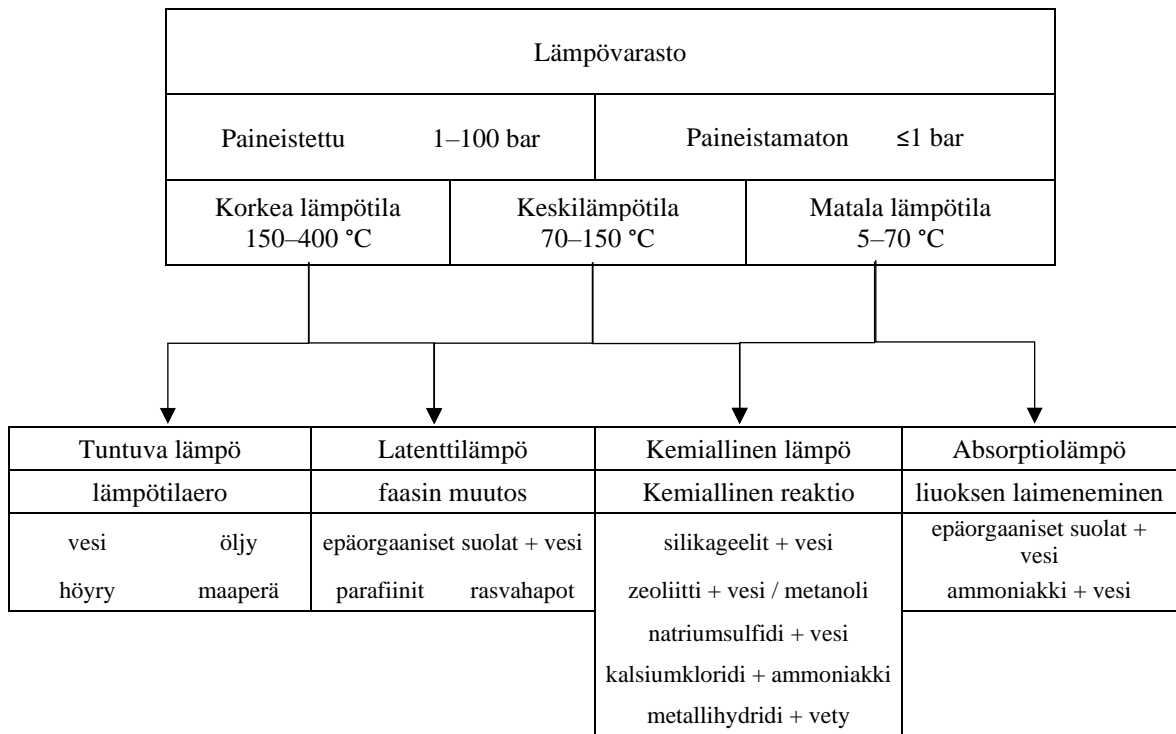
3.9 Lämpövarastot

Erilaisilla lämmön varastointitekniikoilla on perinteisesti pystytty vähentämään esimerkiksi vastapainelaitosten kaukolämmön ja sähkön tuotannon välistä riippuvuutta, sillä kyseisten energiamuotojen kulutukset ja kulutuksen vaihtelut eivät ole täysin samanlaisia. Lämmön kulutus on tyypillisesti enemmän ulkolämpötilasta ja muista sääoloista riippuvainen, kun taas sähkön kulutus on säännöllisempää vaihdellen kuitenkin enemmän vuorokauden sisällä

ja arkipäivien sekä viikonloppujen välillä (Koskelainen et al. 2006, s.383). Lämmön varastoinnilla voidaan siis parantaa lämmöntuotantolaitoksen (kuten esimerkiksi CHP-laitoksen) käyttöastetta ja kannattavuutta korvaten samalla kalliimpaa lämmön huipputuotantoa, tasata lämmön kulutuspiikkejä, sekä hallita sektori-integraation kautta myös kasvavaa uusiutuvan sähköenergian, kuten tuulivoiman, tuotantoa ajamalla esimerkiksi lämpöpumppuja tai sähkökattiloita (Turunen 2019, s.11). Lisäksi ilmastonmuutoksesta johtuen lämpökuormien eli lämmöntarpeen muutokset ovat kasvaneet ja tulevat kasvamaan, lisäten näin tarvetta lämmön varastoinnille. Lämpövarastoilla pystytään myös tehostamaan lämmöntuotantolaitosten savukaasupesurien toimintaa saamalla suuremman määrän hukkalämpöä talteen ja kaukolämpöverkkoon hyödynnettäväksi (Sweco 2022). Lämpövarastoilla siis on jo kauan ollut paikkansa osana kaukolämpöjärjestelmiä ja edellä mainittujen hyötyjen takia lämpövarastoja voidaankin pitää digitalisaation ja älykkään ohjauksen ohella kaukolämmön eri kehityssuuntien yhdistävänä sekä uusien lämmön tuotantomuotojen käyttöönottoa tukevana tekijänä.

Lämpövarastoja käytetään suomalaisissa kaukolämpöverkoissa jo nykyään tasaamaan lämmön kulutushuippuja alentaen näin lämmöntuotannon kustannuksia, sekä toimimaan varalämmönlähteenä kaukolämmön tuotanto- ja jakelukatkoksissa, ja niiden merkitys tulee korostumaan tulevaisuuden kaukolämmityksessä, kun uusia lämmön tuotantomuotoja integroidaan kaukolämpöverkkoon ja lämpöä halutaan varastoida pitempiä aikoja. Lämpövarastoja voidaan luokitella monella tapaa. Yksi tapa on jakaa lämpövarastot toimintaperiaatteen mukaan tuntuvan lämmön, latentin lämmön (PCM), termokemiallisen, tai absorptiolämmön varastoihin, joista tuntuvan lämmön varastointi on yleisintä. Toinen tapa on jakaa varastot niiden lataamisen ja purkamisen yhtäjaksoisen keston mukaan lyhytaikais- ja pitkäaikaisvarastoihin. Kolmas tapa on jakaa lämpövarastot niiden sisältämän energian lämpötilan mukaan joko matalan, keskilämpötilaisen, tai korkean lämpötilan varastoiksi. Käytetyn lämpötilatazon valintaan vaikuttaa, mikä on väliaine ja voiko lämpövaraston paineistaa vai toimiiko se ilmanpaineessa. Taulukossa 5 on esitettyä yksi lämpövarastojen jaottelutapa. (Alanen et al. 2003, s.12.)

Taulukko 5. Lämmön varastointimenetelmiä (mukaillen Alanen et al. 2003, s.13).



Vesi on toistaiseksi suosituin ja usein myös lämmönvarastointiin kustannustehokkaimmin soveltuva väliaine (Alanen et al. 2003, s.19). Lämmön lyhytaikaisvarastoinnissa tyypillisin varastointimuoto on kaukolämpövesivarasto (kaukolämpöakku), joka on tyypillisesti teräs-säiliö tai kalliovarasto ja joko suoraan tai epäsuorasti lämmönsiirtimen kautta kaukolämpö-verkkoon kytketty. Lämpövarastojen koot voivat vaihdella kymmenistä kuutioista satoihin tuhansiin kuutioihin riippuen käytetystä väliaineesta, mutta tavallisesti lyhytaikaisvaraston sisältämä lämpöenergia riittää muutamista tunneista muutaman päivän mittaiseen yhtäjaksoiseen energian lataamiseen tai purkamiseen (Kokkonen 2020, s.24). Vesivaraston käytön periaate perustuu (kaukolämpö)veden toimimiseen varastoivana massana ja lämmönsiirron väliaineena. Vesi kerrostuu säiliöön tiheyserojen takia eri lämpötiloihin siten, että päällimmäisenä on kuumin vesi ja pohjalla kylmin. Lämpövarastoa ladattaessa kylmempää vettä ohjataan pohjalta pois ja tilalle varaston yläosaan tuodaan lämmitettyä vettä. Vastaavasti varastoa purettaessa lämpimintä pintavettä ohjataan kaukolämpökiertoon (Kokkonen 2020, s.24). Kaukolämpövesivarasto voi olla lämminvesivarasto (alle 100 °C) tai kuumavesivarasto (yli 100 °C), jolloin se on paineistettu ja soveltuu jopa kaukolämmön huipputehontarpeen syöttöön. Muita perinteisesti käytettyjä lyhyemmän ajan lämmön varastointimuotoja ovat betonisäiliöt, kaivantovarastot, kuumavesivaraajana toimiva laitoksen syöttövesisäiliö

tai höyryakku, sekä lyhytaikainen muutamaa tuntia ennen kaukolämmön kulutuspiikkiä tapahtuva kaukolämpöverkkoon varaaminen. Kaukolämpöakut sopivat parhaiten lisääntyvien vaihtelevien energianlähteiden hyödyntämiseen tarjoten pitempiaikaisen lämpövaraston kuin kaukolämpöverkko, pienemmät rakennuskohtaiset vesivaraajat tai rakennusten termien massa. Lisäksi etuina ovat suhteellisen pienet lämpöhäviöt ja käytön joustavuus. (Zhang Y. et al. 2021, Koskelainen et al. 2006, s.386.)

Lämmön lyhytaikaisvarastoinnin lisäksi viikkojen, kuukausien tai sitä pidemmän aikavälin yli ulottuvalle lämmön kausivarastoinnille on eritoten uusien lämmöntuotantomuotojen myötä eniten kehitystarvetta ja suurin osa lämpövarastojen tutkimuksesta kohdistuukin niihin. Teknisesti lämmön kausivarastointi on nykyäänkin mahdollista, mutta niiden käytön kustannustehokkuus ja varastoinnissa syntyvien lämpöhäviöiden määrä eivät ole vielä vaaditulla tasolla (Joronen et al. 2021, s.11). Lämmön pitempiaikaiseen kausivarastointiin soveltuvia tekniikoita ovat mm. eri aineiden faasimuutoksiin sitoutuvan lämmön varastointimuodot, sekä kemiallisiin reaktioenergioihin perustuvat lämpövarastot. Näistä faasimuutosvarastot ovat jo käytössä, ja niissä lämpöä varastoivana aineena on käytetty esimerkiksi höyryä (höyryakut), erilaisia suoloja, parafiineja, sekä rasvahappoja. Lämmön pitkäaikaisvarastoinnin yleistymistä ovat hidastaneet mm. korkeammat investointikustannukset johtuen lämpövaraston suuremmasta eristämisen tarpeesta verrattuna lyhytaikaisvarastoihin. Vastavasti lämpöhäviöt varastointijärjestelmästä kasvavat suuremmiksi, mitä kuumempaan väliaineeseen ja mitä pidemmäksi aikaa lämpöä varastoidaan. (Koskelainen et al. 2006, s.385.)

Tärkeimmät lämmön kausivarastointiin käytettävät lämmön sijoitustavat ovat maanalaiset lämpöenergian varastoinnin muodot, kuten pohjavesi- ja kallioperävarastointi, sekä yleisesti lyhytaikaisvarastointiin käytetty säiliövarastointi. Uudet ja kehitteillä olevat varastointimuodot sisältävät lämmön varastointia esimerkiksi erilaisten kemikaalien ja suolojen avulla. Lämmön varastoinnin lisääminen kaukolämmöntuotannossa hyödyttää esimerkiksi uusiutuvien ja vaihtelevien energiamuotojen käyttöönottoa ja kaukolämmön tuotannon sähköistämistä epäsuorasti esimerkiksi uusiutuvan vedyn tuotannon tapauksessa. (IRENA 2022, s.52-53.)

Lämmöntuottajan näkökulmasta lämpövarastoteknologian valinta perustuu sekä taloudellisiin että teknisiin ominaisuuksiin. Ominaisuuksista esimerkiksi energia- ja tehotehiys, lämmönsiirron vasteaika, hyötysuhde, materiaalien kuluminen ja varaston teknistaloudellinen käyttöikä, sekä myös liikuteltavien lämpövarastojen tapauksessa niiden paino vaikuttavat

varastotyypin valintaan ja investointiin. Oikeanlaisten toimintaolosuhteiden ja turvallisuuden takaamiseksi erilaiset automaatiota ja digitaalisia järjestelmiä hyödyntävät valvonta- ja ohjauslaitteet ovat myös tärkeässä roolissa lämpövarastojen hyötyjen maksimoinnissa. (Alanen et al. 2003, s.11.)

Yksi suhteellisen uusi mahdollisuus lämmön varastoimiseen on syntynyt lämpöpumppujen kehityksen myötä: Lämpöä voidaan varastoida perinteisesti säiliöön, luolastoon tai maaperään, mutta käyttöönottoaiheessa varaston lämpöä syötetään kaukolämpöverkkoon lämpöpumpun kautta, jolloin saavutetaan verkoston vaatimat lämpötilatasot ja lämpöpumputkin toimivat paremmalla hyötysuhteella, kun niiden ei tarvitse nostaa lämpötilaa niin suuresta erosta. Kustannusten sekä päästöjen vähentämisen kannalta voikin jatkossa olla edullista yhdistää lämpövarasto ja lämpöpumppu. Esimerkiksi Varkaudessa tällainen järjestelmä on suunnitteilla, jossa lämpöpumpputeknologian avulla varastoidaan lämpöä kallioperään, toisin sanoen kallioperä toimii maalämpöakkuna kaukolämpöverkolle (Sweco 2022).

Kaukolämpöverkon inertiaa eli verkossa kiertävän paineistetun veden sisältämää lämpöenergiaa voidaan pitää myös lämpövarastona. Verkossa kiertävä vesi voidaan lämmittää kuumemmaksi etukäteen kysyntähuippujen tasaamiseksi tai päästöiltään pienempien lämmöntuotantomuotojen lisäämiseksi. Matalalämpötilaisessa kaukolämpöverkossa verkkoon varastoinnin hyödyt ja potentiaali kuitenkin pienentyvät, kun samaan määrään kaukolämpövertä on sidottuna vähemmän lämpöä. Nykytilanteessa verkon sisältämää lämpökuormaa pystytään käytännössä ohjaamaan lämpövaraston tavoin vain isommissa verkoissa ohjauksesta vastaavan henkilökunnan riittävyyden takia. Suoraan kaukolämpöverkkoon varastoinnin etuna on minimaalinen tarve investoida olemassa olevaan infrastruktuuriin. Myös rakennusten terminen massa on hyödynnettävissä lämpövarastona, ja sen hyödyt sekä käytettävyys kasvavat matalaenergiatalojen pienemmän energiankulutuksen myötä ja niiden rakennuskannan lisääntyessä. (Kokkonen 2020, s.22-23, Zhang Y. et al. 2021.)

Vaasan Vaskiluodossa otettiin vuonna 2020 käyttöön maanalainen luolastoon sijoitettu lämpöenergiavarasto, jota ladataan mm. viereisen yhteistuotantolaitoksen sähköntuotannosta syntyvillä hukkalämmöillä sekä esim. tuuli- tai aurinkosähköllä sähkökattiloiden avulla. Alun perin öljyn varastointiin rakennettu luolasto on maailman suurimpiin lämpövarastoihin kuuluva ja kooltaan yhteensä 210 000 m³, lataus- ja purkamistehon ollessa 100 MW ja kapasiteetin 7–9 GWh. Lämpövaraston käyttöönotolla pyrittiin vähentämään kivihiilen käyttöä sekä lisäämään joustavuutta kaukolämmöntuotannossa. Esimerkiksi tammi-maaliskuussa

2021 varaston käytöllä pystyttiin vähentämään energiantuotannon päästöjä 10,5 %. (EPV Energia Oy 2020, Vaasan Sähkö Oy 2019.)

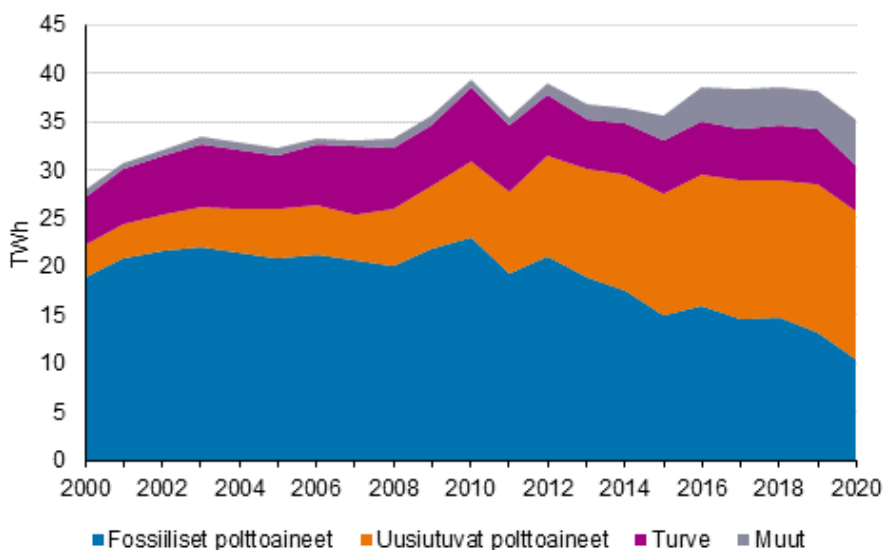
Vaasan lisäksi esimerkiksi Helsingin Mustikkamaalla otettiin vuonna 2021 käyttöön samankaltainen alkuperäiseltä käyttötarkoitukseltaan raskaan polttoöljyn varastointiin rakennettu luolalämpövarasto. Kyseisen lämpövaraston tilavuus on 260 000 m³ ja sen lataus-, sekä purkutehot ovat 120 MW. (Helen Oy 2018.)

Edellisten kokoluokaltaan nykymittakaavassa suurien lämpövarastojen lisäksi ainakin Vantaan Kuninkaalaan ollaan suunnittelemassa lämmön kausivarastoa, joka olisi kooltaan ja kapasiteetiltaan maailman suurin, noin 1 000 000 m³ ja 90 GWh. Lämpö varastoidaan syväälle kallioperään, jolloin hydrostaattisen paineen johdosta lämpöä voidaan varastoida korkeammassa lämpötilassa kasvattaen varastointikapasiteettia tavalliseen samankokoiseen lämpövarastoon verrattuna. (Yle 2020, Vantaan Energia 2021a.)

4 KAUKOLÄMMÖN UUDET TUOTANTOMUODOT

Kaukolämmön tuotanto perustuu Pohjoismaissa pääosin suuriin ja kokonaishyötysuhteeltaan korkeisiin CHP-laitoksiin. Pienissä kaukolämpöverkoissa, sekä vara- ja huippuvoimana käytetään tyypillisesti erillisiä lämpökattiloita. Lukumäärällisesti suurin osa kaukolämmön tuotantolaitoksista Suomessa on erillisiä lämpölaitoksia. (Helin et al. 2018, s.455.)

Kuvassa 10 on esitetty Suomen kaukolämmön tuotanto polttoaineittain tällä vuosituohannella. Kaukolämmön tuotanto kokonaisuudessaan on hieman kasvanut viimeisen 20 vuoden ajankaksolla noin 28 TWh:sta nykyiseen noin 35 TWh:iin. Kuvaajasta voidaan havaita, että viimeisen noin kymmenen vuoden aikana fossiilisten polttoaineiden osuus on pienentynyt kaikista merkittävimmin samalla kun uusiutuville polttoaineille on siirtynyt tämän osuus. Turpeen käyttö on aiemmin pysynyt stabiilina, vasta aivan viime vuosina sillä tuotetun lämmön määrä on lähtenyt laskusuuntaan johtuen vahvasta poliittisen ilmapiirin muutoksesta ja ai-keista lopettaa turpeen käyttö kokonaan energiantuotannossa tulevaisuudessa, joskin viime- aikaiset muutokset energiarintamalla puoltavat turpeen käytön vähintäänkin hetkellistä li- säämistä lämmöntuotannossa. Muut-tuotanto pitää sisällään tilastoitujen hukkalämpöjen ja ulkopuolelta hankitun höyryn käytön, sekä sähkökattiloissa ja lämpöpumpuissa käytetyn sähkön (Suomen virallinen tilasto 2021a).



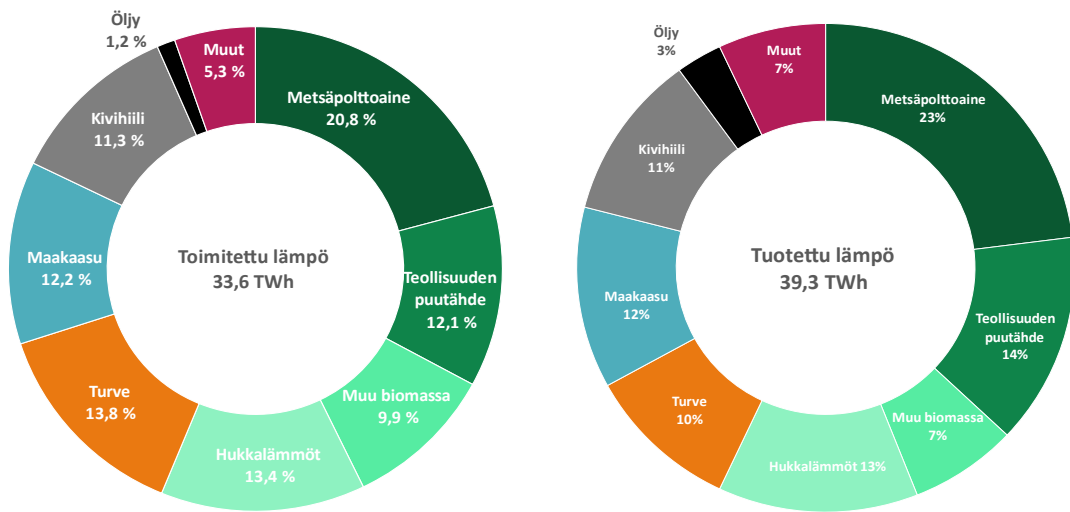
Kuva 10. Kaukolämmön tuotanto polttoaineittain Suomessa 2000–2020 (Suomen virallinen tilasto 2021b)

Kuvassa 11 on esitetty pelkästään uusiutuviin polttoaineisiin perustuvan kaukolämmön yhteis- ja erillistuotannon kehitys tällä vuosituohannella, huomionarvoista on viimeisin vuoden jälkeen 2020 tapahtunut selkeä harppaus uusiutuvilla tuotetun energian määrässä. (Energiateollisuus 2022.)



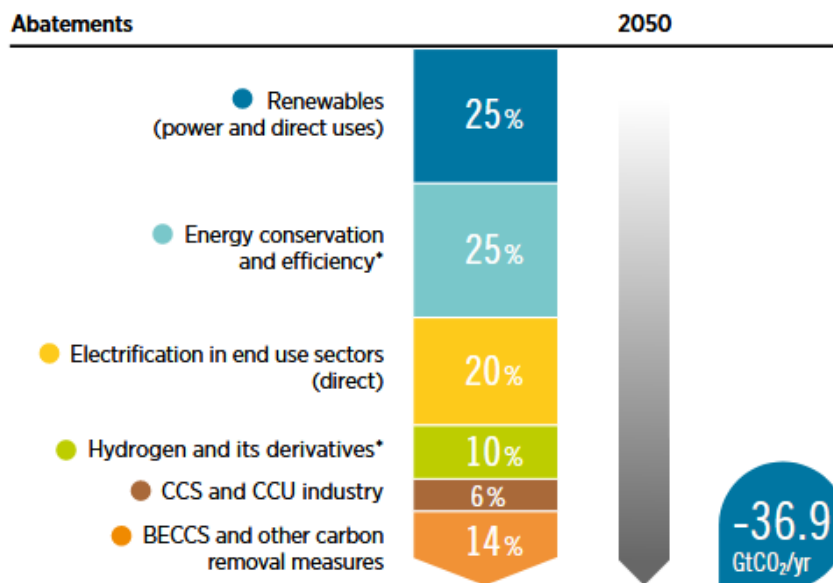
Kuva 11. Uusiutuvilla polttoaineilla tuotetun kaukolämmön yhteis- ja erillistuotannon kehitys (Energiateollisuus ry 2022a).

Kuvassa 12 on vielä tarkemmin eritelty kaukolämmön tuotannossa käytetyt energialähteet vuosina 2020 ja 2021. Toimitetun lämmön määrä nousi merkittävästi vuodesta 2020 vuoteen 2021 johtuen tavallista kylmemmästä talvesta. Hiilineutraalia kaukolämmön tuotantoa oli yli puolet (56 %) vuonna 2021. Hiilineutraaliin kaukolämpöön kuuluvat uusiutuvat energialähteet, mukaan lukien bioenergia sekä hukkalämmöt. Kaukolämmön kotimaisuusaste vuonna 2020 oli 75 % turpeen kuuluessa mukaan kotimaisuuden osuuteen, johon kuuluvat lisäksi edellä mainitut hiilineutraalit kaukolämmönlähteet.



Kuva 12. Suomessa toimitetun kaukolämmön määrä ja jakautuminen energialähteittäin vuonna 2020 (vasen) ja 2021 (oikea) (mukaillen Energiateollisuus ry 2022a).

Kuva 13 esittää IRENAN (2021) tekemän, 1,5 celsiusasteen lämpenemiseen rajoittuvan skenaarion saavuttamiseksi vaadittavia päästövähennystavoitteita kollektiivisesti maapallolla vuoteen 2050 mennessä. Esitetyt päästövähennysten muodot koskettavat myös kaukolämmitystä, esimerkiksi uusiutuvien tuotantomuotojen, energiansäästön ja käytön tehostamisen, sähköistymisen, vetytalouden ja bioenergian sekä hiilidioksidin talteenoton muodoissa.



Kuva 13. Hiilidioksidipäästöjen vuosittainen vähentämisen tarve maapallolla kohti vuotta 2050 ja vähennysten koostumus IRENAN 1,5 °C-asteen skenaariossa (IRENA 2021, s.23).

Suomessa kaukolämmön tuotannon ominaispäästöt olivat vuonna 2021 noin 123 gCO₂/kWh. Päästöt kasvoivat edellisvuodesta, mutta tämä johtui normaalia kylmemmästä talvikaudesta ja siten suuremmasta fossiilisilla polttoaineilla tuotettavasta kaukolämmön huipputehon osuudesta. Pidemmällä aikajaksolla kaukolämmön tuotannon ominaispäästöt ovat laskeneet, esimerkiksi kymmenessä vuodessa laskua on tullut 38 %. (Energiateollisuus 2022.)

4.1 Perinteiset polttoon perustuvat teknologiat

Kaukolämmön tuotanto perustuu nykyään vielä pääosin kiinteiden tai nestemäisten polttoaineiden palamisessa syntyvän lämpöenergian hyödyntämiseen. Polttotekniikalla kaukolämpö tuotetaan joko voimalaitoksissa yhteistuotantona tai erillisissä lämpölaitoksissa. CHP-laitoksissa höyrykattilassa tuotettu höyry luovuttaa energiaa turbiinissa sähköntuotantoon ja lauhtuu sen jälkeisessä kaukolämmönsiirtimessä, josta lämpö siirtyy kaukolämpöverkkoon. Lämpökeskuksissa käytettävissä kuumavesikattiloissa kierrätetään joko samaa kaukolämpöverkon vettä, tai lämpö siirretään verkkoon lämmönsiirtimellä. (AFRY 2020c, s.8.)

Fossiilisten polttoaineiden käyttöä varsinkin aiemmin ennen päästökauppasektorin kehittymistä ovat puoltaneet niiden hyvä saatavuus ja edulliset hinnat, sekä niiden suuri energiatiheys. Muista polttoaineista bioenergian eri muodot ovat laajasti hyödynnettyjä metsien uudelleenkasvun hiiltä sitovan ominaisuuden takia ja niiden saatavuus on ollut hyvää johtuen mm. metsätalouden sivuvirroista, minkä lisäksi bioenergian käyttö lisää paikallista työvoimaa, energian huoltovarmuutta, sekä tehostaa metsien hoitoa. Huoltovarmuutta tukevat myös turve sekä jätteiden poltto, joskin turpeen energiakäytöstä luopumiseksi on aiemmin tehty aloitteita valtiotasolla, ja jätteiden hyödyntämiselle etsitään uusia käyttökohteita energiakäytön sijasta.

4.1.1 CHP - Yhteistuotanto

Lämmön ja sähkön yhteistuotanto eli CHP on suomalaisen kaukolämmityksen alkuajoista asti käytössä ollut lämmöntuotantomuoto, jossa kiinteitä tai kaasumaisia ja vielä nykyään monin paikoin fossiilisia polttoaineita polttamalla tuotetaan sekä lämpöä kaukolämpöverkkoon ja teollisuuteen, että sähköä sähköverkkoon. Suomessa noin kaksi kolmasosaa kaukolämmöstä tuotetaan CHP-laitoksissa. Fossiilisten polttoaineiden osuus energiantuotannossa,

myös CHP-laitoksissa, on vähentynyt viimeisen vuosikymmenen aikana selkeästi erityisesti bioenergian kustannuksella, ja poliittisilla päätöksillä fossiilisten käytöstä pyritään luopumaan kokonaan. Esimerkiksi Suomessa hiilen käyttö energiantuotannossa on tarkoitus lopettaa kokonaan vuoteen 2030 mennessä. Näin ollen CHP-laitoksissa poltettaviksi jäävät jäljelle bioenergian eri muodot, poliittisesti epävarma maakaasu, sekä turve, jonka asemaa ja tulevaisuutta parhaillaan pohditaan Suomessa. Tulevaisuudessa myös esimerkiksi ydinenergialla voi olla mahdollista tuottaa kustannustehokkaasti lämpöä sähkön ohella modulaarisissa ydinreaktoreissa (SMR).

Yhteistuotantolaitoksen etuja ovat hyvä kokonaishyötysuhde (jopa 85–90 %) sekä lämmön ja sähkön tarpeen ajoittuminen samalle ajanjaksolle eritoten pohjoisilla alueilla maapallolla. Yhteistuotannon hyötysuhdetta ja säädettävyyttä voidaan edelleen parantaa lämpöakuilla ja savukaasulauhduttimilla (Energiateollisuus ry 2021b). Kaukolämpöverkkoon lämpöä voidaan syöttää joko turbiinin väliottohöyrystä tai turbiinin jälkeisen lauhduttimen tilalle sijoitusta kaukolämmönvaihtimesta, jolloin puhutaan vastapainelaitoksesta. Sähkön ja lämmön tuotannon suhdetta yhteistuotantolaitoksessa kuvaa rakennusaste. CHP-teknologioista väliotolla varustetun lauhdutushöyryturbiinin rakennusaste on joustava tarpeen mukaan. Muita CHP-teknologioita ovat esimerkiksi kaasuturbiini tai kaasukombivoimalaitos lämmön talteenotolla, sekä erilaiset polttomoottorit. (Eurostat 2017.)

Yhteistuotantolaitokset mitoitetaan yleensä lämmön tuotantoa varten. Lämmön tarpeen ollessa suurin vuoden kylmimpinä hetkinä CHP-laitosta ajetaan täydellä teholla, jolloin saadaan myös eniten sähkön tuotantoa. Muina aikoina sähkön tuotantoa säädellään sähkömarkkinoilla määräytyvän hinnan mukaan sähkön tuotannosta saatavien voittojen maksimimiseksi. (Energiateollisuus ry 2021b.)

Kaukolämmön tuotannon kannattavuutta ja CHP-laitoksen energiatehokkuutta parantamaan käytetään yleisesti kaukolämpöakkuja. Kaukolämpöakulla voidaan vaikuttaa ajettavan CHP-tuotantolaitoksen toimintapisteeseen ja siten energiatehokkuuteen, vähentää muiden (huippu)lämmöntuotantolaitosten käyttöä ja käynnistämistä madaltaen tuotantokustannuksia ja parantaen kannattavuutta, vähentää apujäähdytyksen tarvetta jolloin lämpöä ei hukata, sekä ajoittaa yhteistuotantolaitoksen sähköntuotantoa sähköstä maksetun pörssihinnan kannalta optimaalisille tunneille. Kaukolämpöakun käyttö lisää myös kaukolämpöverkon toiminta- ja toimitusvarmuutta. (Turunen 2019, s.11.)

Esimerkiksi Kiinassa CHP-laitoksilla tuotettu kaukolämpö toimii päälämmitysmuotona ja se onkin osaltaan mahdollistanut Kiinan voimakkaan kasvun ja kehityksen kaukolämpöverkoon liitetyn rakentamisen osalta, sillä maan jatkuvasti kasvava energiantarve vaatii hyvän energiantuotannon hyötysuhteen omaavia CHP-laitoksia. Suurin osa näistä yhteistuotantolaitoksista käyttää edelleen hiiltä polttoaineenaan, mutta vaihtoehtoisia polttoaineita ja kaukolämmön tuotantomuotoja on tutkittu myös Kiinassa. (Sun et al. 2014.)

4.1.2 HOB – Lämmön erillistuotanto

Lämmön ja sähkön yhteistuotannon lisäksi kaukolämpöä tuotetaan myös erillistuotantona lämpökattiloissa (HOB, heat-only boiler). Tyypillisesti lämpökattiloita käytetään pienemmissä kaukolämpöverkoissa lämmön perustuotannossa kattaen suurimman osan tuotannosta, tai suuremmissa verkoissa huippu- ja varatuotantolaitoksina. Lämmön erillistuotannossa käyttö- ja polttoainekustannukset ovat tyypillisesti yhteistuotantoa suuremmat, kun otetaan huomioon yhteistuotannossa tuotetun sähkön määrä ja siitä saatavat myyntitulot. Täten tuotetun energian yksikköhinta korkeampi, mutta toisaalta huippu- ja varavoimana toimiessaan lämpökattiloiden huipunkäyttöaika on selkeästi pienempi kuin aina peruskuormaa tuottavilla yhteistuotantolaitoksilla. Polttoaineena lämmön erillistuotannossa käytetään tavallisesti bioenergiaa kuten metsähaketta ja pellettejä, sekä fossiilisia polttoaineita kuten öljyä ja maakaasua.

Lämmön erillistuotannon laitosten investointikustannukset ovat yleensä selkeästi pienempiä kuin CHP-laitosten, johtuen mm. laitoksen koosta, sähköntuotannon laitteiden kuten turbiniin ja generaattorin puuttumisesta, sekä tuotannon ohjaamisen yksinkertaisemmasta toteutuksesta. Toisaalta taas lämpölaitokset eivät saa sähköntuotannon tukea ja pelkässä lämmön tuotannossa polttoaineiden verotuksella on suurempi vaikutus kuin yhteistuotannossa (AFRY 2020a, s.53).

Kaukolämmön tilastoinnissa erillistuotantoon lasketaan kuuluvaksi lämpökattiloiden lisäksi myös hukkalämmöt, joita niiden hyödyntämiseen käytettävän lämpöpumpputeknologian ohella tarkastellaan myöhemmin luvussa 4.3.2.

4.1.3 Bioenergia

Bioenergialla tuotetaan Suomessa suuri osa kaukolämmöstä, esimerkiksi vuonna 2020 kaukolämmön hankinnasta noin 43 % eli 14,4 TWh oli bioperäisistä energialähteistä, kuten metsäpolttoaineista, teollisuuden puutähteistä ja muusta biomassasta (Energiateollisuus 2022). Tyypillisesti bioenergiaa käytetään erilaisten metsäteollisuuden sivutuotteiden kuten puuhakkeen muodossa CHP-laitoksissa peruskuorman tuottamiseen, tai esimerkiksi puupellettien ja biokaasun muodossa erillisissä lämpökattiloissa perus- ja huipputuotantona. Bioenergian käytön etuna on sen soveltuvuus osin suoraan tai pienin muutoksin jo rakennettuun fossiilisiin polttoaineisiin pohjautuvaan lämmöntuotantokapasiteettiin. Näin ollen alun perin fossiilisia polttoaineita hyödyntäneistä investoinneista on mahdollista saada varteenotettava takaisinmaksuaika, vaikka laitos muutettaisiinkin hyödyntämään hiilineutraaleja biopohjaisia polttoaineita. Esimerkiksi tyypillisesti turpeen käytöllä tukipolttoaineena on saavutettu biomassan sisältämien ja poltossa syntyvien alkali- ja klooriyhdisteiden kattilan lämpöpinnojen korroosiota vähentävä vaikutus, joka voidaan kuitenkin suorittaa myös erillisellä rikin-syöttölaitteistolla. Toinen bioenergian käytön etu liittyy lämmöntuotannon rakenteeseen, sillä bioenergiaa hyödyntävä lämmöntuotantokapasiteetti soveltuu hyvin kaukolämmön pohja- ja peruskuormien tuottamiseen, toisin kuin monet muut uusiutuvan energian muodot ainakaan nyky-kaukolämpöjärjestelmässä. Lisäksi bioenergiaa on mahdollista hyödyntää myös huippu- ja varakapasiteettina fossiilisten polttoaineiden asemasta.

Metsäteollisuuden sivutuotteena syntyvät biomassat ovat olleet hyvä ja hiilineutraali vaihtoehto energianlähteeksi lämmöntuotantoon. Biomassalla on jo nykyisin vahva jalansija lämmöntuotannossa erityisesti Pohjoismaissa ja Baltiassa, esimerkiksi Suomessa biomassalla on korvattu fossiilisia polttoaineita lämmöntuotannossa jo 1970-luvulta lähtien. Bioenergian alkuperällä on suuri merkitys, kun tarkastellaan sen kestävyyttä ja hiilineutraaliutta. Jatkojalostukseen kelpaamattomat metsäteollisuuden sivujakeet, kuten esimerkiksi kuori ja hakkuutähteet, voidaan hyödyntää bioenergian kuten kaukolämmön tuotannossa. Bioenergian hintaan vaikuttaa ratkaisevasti sen hankinta-, kuljetus-, ja varastointikustannukset. Tämän vuoksi paikkakunnilla, joissa on metsäteollisuutta, kaukolämpöä on järkevä tuottaa metsäteollisuudesta syntyvällä bioenergialla.

Bioenergian käyttö kaukolämmöntuotannossa on lisääntynyt erityisesti pienemmissä kunnissa ja kaupungeissa johtuen polttoaineen saatavuudesta ja paikallisuudesta.

Lähitulevaisuudessa bioenergian rooli tulee monin paikoin kasvamaan, ja esimerkiksi Suomessa turpeen energiakäytön vähentäminen pakottaa kasvattamaan bioenergian osuutta huoltovarmuuden takaamiseksi (AFRY 2020a, s.62). Bioenergialla on erityisesti lämpöpumpputeknologian ohella suurta potentiaalia vähentää merkittävästi lämmityksen päästöjä. Kestävästi tuotettu bioenergia tarjoaa nykyiseen energiajärjestelmään käyttövalmiin vaihtoehdon (“drop-in option”) välttäen näin suuria muutoksia ja tarpeita investoinneille. Uusia bioenergiaan pohjautuvia lämmöntuotantoteknologioita ovat myös integroidut prosessit, joissa esim. biopolttoaineiden tuotannossa syntyviä hukkalämpöjä hyödynnetään kaukolämpöverkossa. Myös kosteiden biopolttoaineiden poltossa syntyvistä savukaasuista saatavissa oleva hukkalämpöpotentiaali on merkittävä, ja perinteisten savukaasupesureiden yhteyteen onkin monin paikoin lisätty lämmön talteenottoa hyödyntämään tätä potentiaalia kaukolämmöntuotannossa (Kauppila 2018, s.17-19, 22). Savukaasuista voidaan ottaa talteen myös hiilidioksidiä, jota käytetään esimerkiksi vedyn ja synteettisten polttoaineiden tuotantoon ja hyödynnetään vielä tästä prosessista syntyvää hukkalämpöä kaukolämmössä. (Lindroos et al. 2021, s.1.)

Skenaariot tulevaisuuden energiajärjestelmästä ehdottavat suuriakin lisäyksiä bioenergian käyttöön, esimerkiksi monissa kansainvälisissä skenaarioissa kivihiili korvattaisiin kokonaan biomassalla tulevaisuudessa. Biomassojen mahdollinen hintojen kohoaminen tulevaisuudessa nostaisi kaukolämmön tuotantokustannuksia näkyen myös kaukolämpöasiakkaan energianhinnassa. Tällä on erityisesti merkitystä johtuen Suomen suuresta bioenergian osuudesta kaukolämmön perustuotannossa.

Bioenergia eri muodoissaan on nykyisistä polttoon perustuvista lämmöntuotannon teknologioista vahvin säilyttämään asemansa, joskin senkin käyttöön ja ehdotettuihin käytön merkittäviin lisäämisiin kohdistuu kestävyystekijät huomioiden poliittista epävarmuutta. Bioenergian tuotannon ja käytön kestävyys kokee jo nyt ympäristöllistä painetta monissa maissa sekä poliittista painetta eritoten EU:n tasolla, ja tämä paine tulee kasvamaan tulevaisuudessa kohti hiilineutraalia energiantuotantoa. Toistaiseksi bioenergia määritellään muun muassa Euroopan Unionin päästökauppajärjestelmässä (ETS) hiilineutraaliksi energiantuotannoksi sekä lämmön, että sähkön tuotannossa, eli biomassalle sovellettava päästökerroin on nolla. Bioenergian käyttö ja kasvihuonekaasujen nettonielu huomioidaan kuitenkin maan käytön, maan käytön muutosten, ja metsätalouden sektorissa (LULUCF) (Tilastokeskus 2021). Biomassan käytössä noudatetaan uusiutuvan energian direktiiviä ja biomassan tuotannon ja

käytön täytyy olla RED II -kestävyysskriteerien mukaista ollakseen täysin uusiutuvaa energiaa ja saavuttaakseen nollapäästökertoimen (Työ- ja elinkeinoministeriö 2021a, s.19). Bioenergian käytön haittapuolia ovat maankäytöstä ja puiden kaadosta johtuvat maastonmuutokset, jotka aiheuttavat mm. eroosiota ja tulvia, puun palamisessa syntyy hiilidioksidipäästöjä huolimatta biomassan hiilineutraalin elinkaariajattelun näkökannasta, sekä bioenergia kilpailee monin paikoin maailmalla ihmisten ja eläinten ravinnontuotannon sekä uusien biopohjaisten materiaalien kanssa, joiden tarve tulee vain kasvamaan.

Bioenergialla tuotetun kaukolämmön määrän lisääntyminen toteutuu todennäköisimmin tilanteessa, jossa päästöoikeuksien toteutuneet hintatasot pysyvät korkeina tai jatkavat nousuaan, eikä sähköllä tuotettua lämpöä tueta verohelpotuksin tai sähkön hinnoittelun avulla esimerkiksi kaukolämmön tuotantoon soveltuvien teollisen kokoluokan lämpöpumppujen sähköveroa alentamalla. Toisaalta bioenergialla toimivat lämpölaitokset ja teolliset lämpöpumput eivät suoraan kilpaile keskenään vastaavista paikoista kaukolämmön tuotantorakenteissa, jolloin molemmille tuotantomuodoille on tarvetta. Muihin tuotantomuotoihin vaikuttamisen lisäksi biomassalle kohdistetut suorat ja epäsuorat käytön tuet vaikuttavat bioenergian kilpailukykyyn lämmöntuotannossa, ja esimerkiksi bioenergian verottaminen vaikuttaisi sen hyödyntämiseen pienentävästi turpeen tavoin. (Soimakallio et al. 2020.)

Suomessa on tehty viime vuosina useita suuriakin bioenergiaan pohjautuvia uusia laitos-hankkeita sekä laitospöytämuutoksia, joiden avulla pyritään luopumaan fossiilisista polttoaineista sekä vähentämään lämmöntuotannon hiilidioksidipäästöjä. Esimerkiksi Oulun Energian Laanilan biovoimalaitos valmistui 2020 tuottaen sähköä, kaukolämpöä ja prosessi-höyryä puusta ja kierrätyspolttoaineesta eli SRF:stä kaukolämpötehon ollessa 175 MW (Oulun Energia Oy 2022). Joensuussa Savon Voiman yhteistuotantolaitoksella on taas käynnissä biomassojen polttoon soveltuvan laitteiston muutostyöt eli biokonversio, jonka seurauksena turpeen polttoa vähennetään ensin asteittain ja lopulta korvataan kokonaan biopolttoaineilla vuoteen 2026 mennessä (Savon Voima Oyj 2022). Myös muualle isojen kaukolämpöverkostojen alueille rakennetaan tai on rakennettu uusia biolämpölaitoksia, kuten esimerkiksi Helsinkiin Vuosaareen (kaukolämpöteho 260 MW) ja Espooseen Kivenlahteen (kaukolämpöteho 55 MW) korvaamaan fossiilisten polttoaineiden käyttöä ja toimimaan osaltaan siirtymässä kohti polttoon perustumatonta lämmöntuotantoa (Helen Oy 2022b, KPA Unicon Group Oy 2022).

Tampereella toimivan biohiiltä valmistavan Carbofexin biomassan pyrolyysiin perustuvassa valmistusprosessissa syntyviä sivutuotteita, ylijäämälämpöä, biopohjaista kaasua ja pyrolyysiöljyä hyödynnetään Tampereen sähkölaitoksen kaukolämmön tuotannossa. Biohiilen tuotannossa esimerkiksi tuhannesta tonnista kuusihaketta saadaan tuotettua 1428 MWh puhdasta energiaa, minkä lisäksi jokainen tuotettu biohiilikilogramma sitoo pysyvästi noin 3,5 kg hiilidioksidia, tehden biohiilen ja siihen kytketyn kaukolämmön tuotannosta hiilinegatiivista. (Yle 2018, Carbofex 2021.)

4.1.4 Turve

Turpeen energiakäyttöä on jo monin paikoin vähennetty sekä monien turvetta polttavien lämmöntuotantolaitosten käytöstä luopumisesta on tehty aloitteita. Turpeen perinteinen vahva rooli suomalaisessa energiantuotannossa on perustunut polttoaineen poltto-ominaisuuksiin, kotimaisuuteen, sekä työllistävään vaikutukseen. Lisäksi turvetta ei olla käsitetty Suomessa fossiilisena polttoaineena samassa merkityksessä kuin esimerkiksi kivihiiltä ja öljyä, vaikkei se uusiutuva polttoaine olekaan sanan nykymerkityksessään uusiutumisen kestön takia. Monipolttoainekattiloissa turvetta ja biomassaa poltettaessa turpeen sisältämällä rikillä on pystytty estämään biomassan sisältämän kloorin aiheuttamaa kattilan korroosiota. Näin ollen varsinkin vanhemmissa kattiloissa on ollut olemassa tekninen minimivaatimus (n. 20—30 %) turpeen määrälle tai muulle rikkiptoiselle polttoaineelle (AFRY 2020a, s.11).

AFRY:n tekemän selvityksen (2020) mukaan turpeen poltossakin syntyvien hiilidioksidipäästöjen päästöoikeuden hinta vaikuttaa eniten turpeen käytöstä luopumisen investointeihin. Päästöoikeuden ennakoitua nopeampi kohoaminen päästökaupassa on vähentänyt merkittävästi turpeen energiakäytön kannattavuutta, minkä lisäksi kansallisen verotuksen vaikutukset näkyvät myös kannattavuudessa. Toisaalta taas turpeen käyttö ja turvevarojen ylläpitäminen energiantuotannon huoltovarmuuden kannalta on ennenkin ollut perusteltua, mutta erityisesti nyt muuttuneessa maailmantilanteessa sen merkitystä on nostettu uudelleen esille. Esimerkiksi kotimaisen turpeen varastointi ja logistiikan toteuttaminen ovat biomassaan verrattuna helpompia toteuttaa. (AFRY 2020a, s.2.)

Turpeella tuotetaan energiaa vuositasolla eniten kaukolämmön CHP-tuotannon muodossa. Vuosittainen turpeen energiakäytön määrä vaihtelee kuitenkin riippuen muiden polttoaineiden kuten bioenergian saatavuudesta ja hinnasta, säätilasta ja siten lämmön tarpeesta.

Määrällisesti suurin osa turvetta polttoaineena hyödyntävistä kattiloista on pieniä, teholtaan 3—20 MW_{pa} ja kaukolämmön erillistuotantoon keskittyneitä arinakattiloita, ja kaikkiaan turvetta käyttävistä 3 MW polttoainetehon ylittävistä kattiloista 83 % on kapasiteetiltaan alle 100 MW. Koko Suomen mittakaavassa turvetta hyödynnetään laajasti energiantuotannossa, mutta alueellisia eroja on paljon käytön ollessa muuta maata suurempaa Länsi- ja Pohjois-Suomessa. (AFRY 2020a, s.8.)

AFRY:n raportin (2020a) mukaan pelkät monipolttoainekattiloiden muutosinvestoinnit turpeesta luopumiseksi, tarkoittaen siis mm. rikinsyöttölaitteistojen asentamista, eivät merkittävästi vaikuttaisi kaukolämmön hintaan. Mahdollinen biomassan hinnan nousu nostaisi kaukolämmön tuotantokustannuksia huomattavasti merkittävämmiin kuin nämä turpeen luopumiseen tähtäävät kattiloiden muutosinvestoinnit. Toisaalta turpeen käytön vähenemisen katsotaan lisäävän biopolttoaineiden ja ensisijaisesti metsähakkeen käyttöä. Lisääntyvän bioenergian määrä lämmöntuotannossa riippuisi mm. siitä, korvataanko olemassa olevia ja lähivuosien ja -vuosikymmenien aikana poistuvia CHP-laitoksia osittain erillislämmöntuotannon laitoksilla. Myös hukkalämpöjä hyödyntävien teollisen kokoluokan lämpöpumppujen käytön lisäämisellä voidaan osaltaan korvata turpeella tuotetun kaukolämmön osuutta, vähentäen samalla tarvetta bioenergian lisäämiselle. (AFRY 2020a, s.54-60.)

Turpeen käytön tulevaisuus energiantuotannossa riippuu mm. poliittisten sääntelyjen ja verotuksen linjauksista (verotusta on nostettu useaan otteeseen viime vuosina), uusien energiateknologioiden kehityksestä ja hinnoista, sekä kaukolämmön kysynnän kehittymisestä. Erietyisesti päästöoikeuden viimeaikainen raju hinnannousu näkyy fossiilisten polttoaineiden ohella myös energiaturpeen hinnassa ja kannattavuudessa. Sitralle tehdyn raportin (Soimakallio et al. 2020) mukaan ”aiemmin laadituissa pitkän aikavälin vähähiiliskenaarioissa turpeen energiakäyttö loppui kokonaan, kun päästövähennysten marginaalikustannus oli noin 100 €/tCO₂”. (Soimakallio et al. 2020.)

Energiantuotannon toimitusvarmuuden kannalta turpeella on vielä olennainen rooli Suomessa, sillä turve on tyypillisesti paikallisesti käytetty polttoaine, toisin sanoen turpeen hankinta ja kulutus polttoaineena tapahtuvat lähekkäin. Verrattuna biomassoihin, turpeen varastointi ja kuljetus on kannattavampaa paremman säilyvyyden ja suuremman energiatiheyden johdosta. Huoltovarmuuden kannalta Suomella ei turpeen lisäksi ole muita kotimaisia polttoaineita kuin bioenergia ja polttokelpoiset jätteet. Kivihiilen käytön loppuessa turve jää ainoaksi vaihtoehdoksi biomassan rinnalle monipolttoainekattiloissa. (AFRY 2020a, s.62-63.)

4.1.5 Jätteiden poltto

Jätteiden energiakäytön alkuperäisenä tarkoituksena on ollut vähentää kaatopaikalle menevän jätteen määrää, ja jätteiden poltolla tuotetaan myös osuus kaukolämmön perustuotannosta. Jätteiden energiakäytön osalta ilmastovaikutusten pienentämisen tarve ohjaa niiden hyödyntämistä muilla tavoin esimerkiksi kierrättämällä ja paremmin kiertotaloutta tukevilla tavoilla, vähentäen todennäköisesti jätteillä tuotetun kaukolämmön määrää tulevaisuudessa. Toisaalta polttokelpoiset jätteet soveltuvat polttoaineena hyvin lämmön perustuotantoon niiden jatkuvan tuotannon ja saatavuuden takia. Tavalliset jätteenpolttolaitokset, pois lukien siis ongelmajätteen polttolaitokset, suunnitellaan tyypillisesti siten, että jätteen poltosta syntyvä lämpö saadaan otettua talteen ja hyödynnettyä esimerkiksi kaukolämmön tuotannossa mahdollisimman hyvin (Rämä & Klobut 2020). Jätteiden energiakäyttöön investoidaan vielä, esimerkiksi Vantaan Energian jätevoimalaan tehtävä laajennushanke mahdollistaa kapasiteetin lisäyksen myötä kotimaisen kierrätyskelvottoman jätteen käytön kaukolämmön tuotannossa ulkomaille viennin sijaan. Laajennus lisää hiilineutraalia kaukolämmöntuotantoa noin 600 GWh vuodessa mahdollistaen samalla kivihiilen käytöstä luopumisen energiantuotannossa. (Vantaan Energia 2021b.)

Bioenergian tavoin myös jätteiden poltossa syntyvät hiilidioksidipäästöt voidaan ottaa talteen ja saavuttaa näin ollen hiilineutraali tai jopa hiiltä sitova kaukolämmön tuotantoprosessi. Esimerkiksi Tampereella on suunnitteilla Tammervoiman jätteiden polttoon perustuvan hyötyvoimalaitoksen, Tampereen sähkölaitoksen, sekä Nordic Ren-Gas Oy:n yhteistyöhanke, jossa hyötyvoimalaitoksen hiilidioksidipäästöjä olisi tarkoitus ottaa talteen CCU:n avulla ja hyödyntää talteen otettua hiilidioksidia P2G-tekniikalla synteettisen metaanin tuotannossa. CCU-prosessista saatavaa hukkalämpöä voidaan siirtää myös kaukolämpöverkoon, jolloin se yhdessä jätteenpolton hiilidioksidin talteenoton kanssa vähentäisi merkittävästi lämmöntuotannon päästöjä. Hanke toimisi toteutuessaan isona vetytalouden investointina sekä esimerkkinä myös sektori-integraatiosta. (Tampereen sähkölaitos Oy 2022.)

4.1.6 Fossiiliset

Fossiilisilla polttoaineilla on perinteisesti tuotettu Suomessakin suurin osa kaukolämmöstä. Aiemmillä vuosikymmenillä niiden rinnalle ja korvaamaan on tuotu esimerkiksi jätteen

polttoa, turvetta ja bioenergiaa. Näistäkin huolimatta fossiiliset polttoaineet, kuten kivihiili, maakaasu, ja polttoöljy ovat pysyneet mukana merkittäväillä osuuksilla osana lämmön tuotantoa, kivihiilen ollessa käytössä suurissa lämmöntuotannon peruslaitoksissa (CHP) ja maakaasun sekä polttoöljyn ollessa ennen kaikkea turvaamassa kaukolämmön huippu- ja varatuotantoa. Nykyään kivihiilen käytöstä energiantuotannossa on päätetty luopua kokonaan, minkä lisäksi maakaasun alkuperä ja tuontivaikeudet pakottavat käytön vähentämiseen ja vaihtoehtoisten lämmön tuotantomuotojen etsimiseen. Edellä mainituista syistä polttoöljyn osuus tulee lähivuosien aikana lisääntymään sen saatavuuden, varastoinnin ja huippu/varavoimana toimimisen ansiosta. Kuitenkin pitkän aikavälin tavoite on ensin minimoida ja vähitellen luopua ja lopettaa fossiilisten polttoaineiden käyttö yleisesti energian ja kaukolämmönkin tuotannossa. Kuva 10 osoittaa hyvin fossiilisten polttoaineiden käytön vähenemisen kaukolämmön tuotannossa lähtien edelliseltä vuosikymmeneltä, johtuen uusien ja korvaavien laitosinvestointien keskittymisestä bioenergialla tuotettuun kaukolämpöön sekä muihin vaihtoehtoisiin lämmöntuotantomuotoihin.

4.2 Uudet polttoon perustuvat teknologiat

CCS- ja CCU-teknologioilla eli hiilidioksidin talteenotolla ja sen varastoinnilla tai hyödyntämisellä erilaisissa prosesseissa nähdään olevan merkittävää potentiaalia vähentää hiilidioksidipäästöjä, joita perinteiset polttoon perustuvat teknologiat aiheuttavat. Poltettaessa biomassoja ja niistä vapautunutta hiilidioksidia joko varastoitaessa (BECCS) tai hyödynnettäessä (BECCU) voidaan kaukolämmöntuotannosta tehdä jopa hiilinegatiivista. Tulevaisuudessa myös vedyllä voi olla potentiaalia nousta suureksi energiantuotantomuodoksi, mutta toistaiseksi vetysovellukset ovat pääosin vasta tutkimus- ja konseptitasolla eivätkä laajamittaisessa kaupallisessa käytössä.

4.2.1 BECCS

BECCS tai Bio-CCS määritellään prosesseina, joissa biomassan polttamisesta syntyvät hiilidioksidipäästöt otetaan talteen ja varastoidaan. Nämä prosessit voivat olla joko energiantuotannollisia tai muita teollisia prosesseja, joissa käsitellään suuria määriä biomassapohjaisia hiilidioksidivirtoja. Hiilidioksidi erotellaan näissä prosesseissa samoja teknologioita

hyödyntäen kuin fossiilisten polttoaineiden ja CCS:n (Carbon Capture and Storage) tapauksessa. Mikä erottaa BECCS:n ja CCS:n toisistaan on se, että biomassassa sitoo hiiltä luonnollisesti kasvaessaan, jolloin tämän biomassan polttamisesta syntyvien hiilidioksidipäästöjen talteenotto ja varastointi aiheuttaa hiilidioksidin nettovähennystä ilmakehästä. (EBTP & ZEP 2012, s.5.)

Energiantuotannossa syntyvän hiilidioksidin kaappaaminen voidaan suorittaa kolmella eri tavalla: ennen biomassan tai muun polttoaineen polttamista (pre-combustion), jolloin polttoaine esikäsitellään sisältämään vetyä ja hiilidioksidia joka kerätään talteen, käyttämällä happea ilman sijaan polttoaineen palamisreaktiossa (oxy-fuel combustion), jolloin savukaasuissa on vain hiilidioksidia ja vettä typen jäädessä pois, tai palamisprosessin jälkeen selektiivisin liuottimin savukaasujen käsittelystä ja puhdistuksesta (post-combustion). (EBTP & ZEP 2012, s.8.)

Hiilidioksidin prosessista erottamisen jälkeen sen kuljettaminen tapahtuu joko putkistoja pitkin tai laivoilla ja rekoilla kuljettaen. Hiilidioksidin varastointi puolestaan voidaan järjestää joko syviin suolavesipitoisiin pohjavesivarastoihin, loppuun käytettyihin kaasu- ja öljyesiintymiin, tai syviin louhimattomiin hiilikerrostumiin. Varastoinnin hyvänä puolena on se, että siihen loppusijoitetun hiilidioksidin turvallisuus kasvaa ajan myötä sen mm. reagoitessa maan mineraalien kanssa, jäädessä kiinni huokoiseen kivimateriaaliin ja niiden väliin jääviin taskuihin, sekä liuetessa ympäröivän suolaveden kanssa. Kuitenkaan kaikkialla näitä sopivia varastointipaikkoja ei ole, ja tulevaisuudessa hiilidioksidin talteenoton tarpeen massiivisesti lisääntyessä kaapatun hiilidioksidin määrä kasvaa niin paljon, että sille on järkevää kehittää myös hyödyllisiä käyttökohteita. (EBTP & ZEP 2012, s.8.)

4.2.2 BECCU

Bioenergian polttamisessa syntyvien hiilidioksidipäästöjen talteen ottaminen ja varastointi (BECCS) sekä ennen kaikkea hyödyntäminen (BECCU) esimerkiksi erilaisten synteettisten materiaalien tuotantoprosesseissa mahdollistaa osaltaan hiilineutraaliuden sekä jopa hiilinegatiivisuuden saavuttamisen tulevaisuudessa. Kuten edellä on mainittu, bioenergian käyttö soveltuu hyvin kaukolämmön pohja- ja peruskuorman tuottamiseen, ja bioenergian polttamisesta syntyvien hiilidioksidipäästöjen talteen ottamisella saadaan biopohjaisen kaukolämmön tuotannosta aidosti hiilineutraalia tai jopa hiilinegatiivista. Hiilidioksidipäästöjen

talteenotto-prosessissa syntyy myös paljon hukkalämpöä, ja kaukolämpöverkko onkin yksi potentiaalinen kohde tämän hukkalämmön hyödyntämiselle. Lisäksi talteen otettua hiilidioksidia on mahdollista jalostaa synteettisiksi polttoaineiksi, jolloin edelleen niitä voidaan hyödyntää polttoaineina kaukolämmönkin tuotannossa. (EBTP & ZEP 2012.)

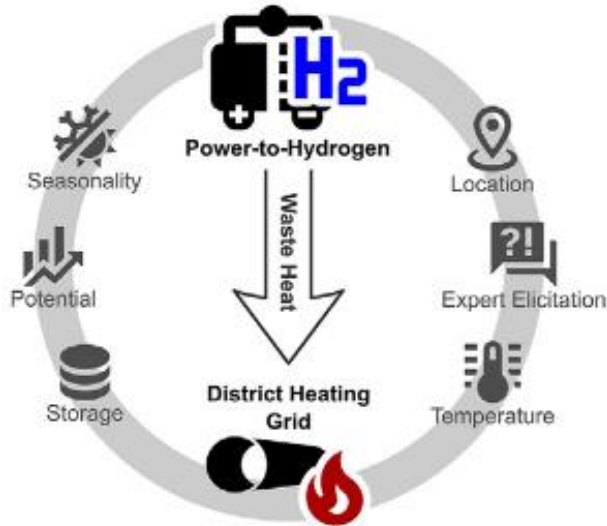
4.2.3 Vety

Vety omaa suurta potentiaalia tulevaisuuden energianlähteenä ja polttoaineena, mutta nykyään sen hyödyntäminen on pääosin vasta alkuvaiheen tutkimuksen- ja kehityksen tasolla. Vaikka vetyteknologiaa on jo toimivana olemassa, puuttuvat teollisen mittakaavan hankkeet ja laitokset vielä toistaiseksi (Työ- ja elinkeinoministeriö 2021b, s.15). Uusiutuvilla energialähteillä tuotettujen vetyyn pohjautuvien energiaratkaisujen markkinoille tuloa on osaltaan hidastanut vahva taloudellinen ja poliittinen panostus energijärjestelmän sähköistämiseen, joka on koettu nopeammaksi ja kustannuksiltaan edullisemmaksi tavaksi vähentää hiilidioksidipäästöjä. Kuitenkin on todennäköistä, että kohti 2040- ja 2050-lukuja mentäessä erilaiset vetypohjaiset energiaratkaisut ja P2H2-teknologiat yleistyvät ja ovat osana energijärjestelmää sekä myös kaukolämmön tuotantoa.

Esimerkiksi IRENA:n (2021) uusimmassa energiakatsauksessa vedyn ja siihen pohjautuvien johdannaisten osuus energiankäytössä tulisi olemaan noin 12 % vuoteen 2050 mennessä. Vedyllä nähdään erityisesti olevan potentiaalia energiaintensiivisillä sektoreilla kuten teollisuudessa ja raskaassa liikenteessä, joissa päästöjen vähentäminen muilla tavoin, esimerkiksi sähköistämällä, nähdään vaikeaksi. Vety toimisi kaukolämpöverkon tavoin uusiutuvilla tuotetun sähkön tuotannon ja kulutuksen tasapainottajana, sekä pitempiaikaisena energiavarastona. IRENAN (2021) raportissa todetaan vuoteen 2050 mennessä tarvittavan noin 5000 GW elektrolyysikapasiteetin lisäyksen nykypäivän noin 0,3 GW kapasiteetista. Tästä elektrolyysituotannosta syntyvällä hukkalämmön määrällä on erittäin merkittävää kaukolämmön tuotannon potentiaalia. (IRENA 2021.)

Vaikka vedystä saatava lämpöenergia perustuu vedyn palamiseen, eroaa vedyn polttaminen merkittävästi muusta polttoon perustuvasta tuotannosta siinä, että vedyn palaessa syntyy lämmön ohella päästönä vain vesihöyryä. Vedyn polttamisen ohella kaukolämmön tuotantoon soveltuva ja ehkä jopa kaukolämmön tuotantoa ajatellen kiinnostavampi sekä nopeammin tuotantopotentiaalia omaava tapa on vedyn tuottamisessa sähköenergian ja elektrolyysin

avulla (P2H2) syntyvän hukkalämmön hyödyntäminen. Kuvassa 14 on esitettyä tähän hyödyntämiseen ja sen kannattavuuteen vaikuttavia tekijöitä.



Kuva 14. Vedyn tuotannosta (P2H2) syntyvän hukkalämmön kaukolämmössä hyödyntämiseen vaikuttavia tekijöitä (Böhm et al. 2021).

Böhm et al. (2021) teki tutkimuksessaan SWOT-analyysin uusiutuvan vedyn tuotantoteknologioiden ja nyky- ja tulevaisuuden kaukolämmön yhdistämisestä. SWOT-analyysin koostuu vahvuuksista, heikkouksista, mahdollisuuksista ja uhista. Teknologiakohtaisiin vahvuuksiin kuuluu vetyä tuottaessa elektrolyysiprosessissa syntyvät suhteellisen korkeat (hukka)lämpötilatasot, jotka sopivat kaukolämpöverkkoon syötettäväksi vähintään paluupuolelle esilämmittämään kaukolämpövettä. Lisäksi vedyn tuotantoprosessit voidaan sijoittaa melko vapaasti, jolloin kaukolämpöverkkoon lämmön syöttäminen niistä on mahdollista ja kustannustehokasta. Korkealämpötilainen elektrolyysi tulee luultavasti olemaan keskeinen osa tulevaisuuden teollisuuden prosesseja, jolloin näiden synnyttämiä hukkalämpöjä pystytään hyödyntämään. (Böhm et al. 2021.)

Teknologiakohtaisiin uhiin puolestaan Böhm et al. listaa matalalämpötilaisesta elektrolyysiprosessista syntyvät hukkalämmöt, jotka voivat olla liian matalalämpötilaisia menestyäkseen markkinaehtoisesti vaihtoehtoisten ja perinteisten kaukolämmön tuotantomuotojen ja hukkalämpöjen rinnalla. Elektrolyysiprosessien tuotanto ja kaukolämpöverkon kysyntä voivat erota toisistaan, jolloin esimerkiksi suuremman lämmöntarpeen aikaan talvikausina vedyn tuotannosta syntyvää hukkalämpöä ei aina välttämättä ole saatavilla. Uusiutuvan vedyn tuotannosta elektrolyysin avulla syntyvä hukkalämpö ei ole mitenkään erityisasemassa

muihin hukkalämmönlähteisiin nähden eikä tarjoa juurikaan parempia ominaisuuksia, joten se joutuu kilpailemaan muiden lämmöntuotantotapojen kanssa kohdaten samoja ongelmia kaukolämpöverkkoon syöttämisen kanssa kuin muutkin hukkalämmönlähteet. (Böhm et al. 2021.)

Vedyn tuotanto elektrolyysillä ja siitä syntyvät hukkalämmöt avaavat mahdollisuuksia kaukolämpöjärjestelmälle, sillä uusiutuvan vedyn tuotanto tulee olemaan välttämätön osa kestäväää energiasysteemiä, jolloin siitä syntyvää hukkalämpöpotentiaalia tulee olemaan runsaasti. Hukkalämpöjen hyödyntäminen teollisuuden elektrolyysiprosesseista helpottuu ja investointien tarve pienentyy, sillä monet teollisuuden prosessit ovat jo tai tullaan yhdistämään kaukolämpöverkkoon ennen teollisuuden prosessien konvertoimista vetypohjaisiksi. Lisäksi kausittaiset lämpövarastot voisivat toimia kesäajan lämpönieluinä, hyödyttäen ja mahdollistaen joitakin vedyn tuotannon teknologioita. (Böhm et al. 2021.)

Uhkia järjestelmätasolla tuottavat infrastruktuuri, eritoten sähköverkko, sillä uusiutuvan vedyn tuotanto elektrolyysin avulla vaatii uusiutuvaa sähköä pakottaen elektrolyysiprosessit lähelle uusiutuvan sähkön kuten tuulivoiman tuotantoa ja pois kaukolämpöverkkojen läheisyydestä. Elektrolyysissä sivutuotteena syntyvä happi voi prosessin sijoittelun kannalta olla arvokkaampi kuin lämpönielut, jolloin tätä ominaisuutta ei kaukolämpöverkossa pystyttäisi hyödyntämään. Kaikki kaukolämpöjärjestelmät eivät myöskään välttämättä kykene madaltamaan virtausta ja kaukolämpöverkon paluulämpötiloja, jolloin tällaisten verkkojen teknoekonominen soveltuvuus vedyn tuotannon hukkalämmön hyödyntämiseen jää heikommaksi. (Böhm et al. 2021.)

4.3 Polttoon perustumattomat teknologiat

Sähköntuotannossa on pitkälti kuluneen vuosikymmenen aikana alettu siirtymään pois fossiilisten kiinteiden polttoaineiden polttamisesta ja samalla uusiutuvien, polttoon perustumattomien sähkön tuotantomuotojen, osuus on merkittävästi kasvanut. Sama trendi on nähtävissä myös lämmöntuotannossa, jossa esimerkiksi lämpöpumpuilla tuotetun kiinteistökohtaisen lämmityksen osuus on kasvanut merkittävästi. Seuraava jo aluillaan oleva kehitysaskele on liittää näitä polttoon perustumattomia lämmönlähteitä, kuten geo- ja järvilämpöä, aurinkolämpöä, sekä erilaisia mahdollisesti aiempaa matalampilämpötilaisia hukkalämpöjä, osaksi kaukolämpöverkkoa. Tämän taas mahdollistavat lämpöpumput ja lämpövarastot,

joiden potentiaali kaukolämmön tuotannon tehokkuuden parantajina ja hiilidioksidipäästöjen vähentäjinä on merkittävä. Alhaisen sähkön hinnan aikaan on myös mahdollisuus tuottaa lämpöä sähkövastuksilla sähkökattilassa. Lisäksi vielä tutkimus- ja kehitysvaiheessa olevat pienet modulaariset ydinreaktorit (SMR) ovat kiinnostava mahdollinen tulevaisuuden lämmöntuotantomuoto.

Monet Suomen kaupungit ja kunnat ovat linjanneet tavoitteikseen lämmöntuotannon hiili-neutraaliuden huoltovarmuuden rajoissa jo ennen Suomen valtion virallista tavoitevuotta 2035. Esimerkiksi Tampere ja Espoo ovat ilmoittaneet tekevänsä näin vuoteen 2030 mennessä ja siirtyä lämmöntuotannossa perinteisistä polttoon perustuvista lämmöntuotantomuodoista polttoon perustumattomiin teknologioihin pois lukien bioenergian käyttö. (Joronen et al. 2021, Fortum 2022b).

4.3.1 Lämpöpumput kaukolämmön tuotannossa

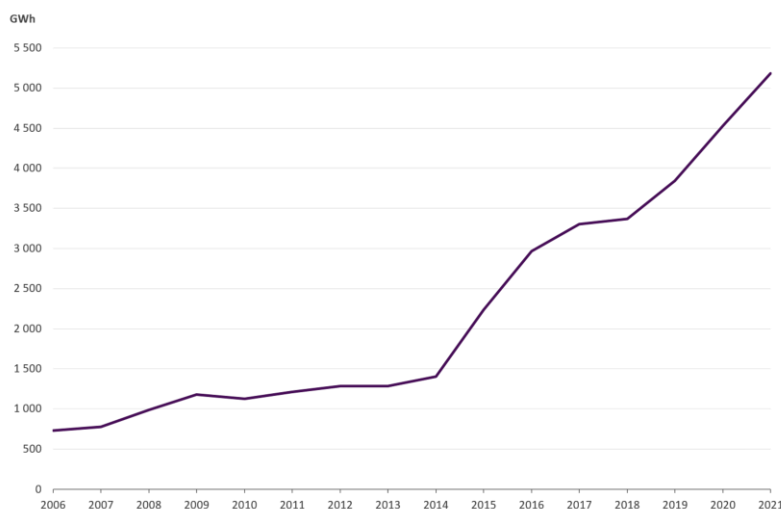
Lämpöpumppujen toiminta perustuu lämmön siirtämiseen matalalämpötilaisemmasta energiavarastosta korkealämpötilaisempaan mekaanisen työn tai muun apuenergian avulla. Lämpöpumppuprosessi koostuu höyrystymis-, puristus-, lauhtumis- ja paisuntaprosesseista sopivaa kylmääainetta hyödyntäen. Erilaisia lämpöpumpputeknologioita ovat mm. kompressiolämpöpumput ja absorptiolämpöpumput. Lämpöpumput mahdollistavat myös erilaiset hybridijärjestelmät, joissa samoilla lämpöpumpuilla pystytään yhdistämään sekä kaukolämmön, että -jäähdytyksen tuotanto säästämällä näin investointikustannuksissa. (Alanen et al. 2003, s.22.)

Lämpöpumppujen tehokkuus ja kannattavuus suuriin teollisen kokoluokan sovellutuksiin kuten esimerkiksi kaukolämpötuotantoon on kehittynyt merkittävästi viime vuosien aikana ja nykyään kaukolämpöyhtiöt investoivat tai tutkivat mahdollisuuksia kyseisiin investointeihin ahkerasti. Lämpöpumppujen tapauksessa edellytys niiden kustannustehokkaalle käytölle on lämmön ja sähkön hintojen suhde: jos tuotetun lämmön hinta pystytään pitämään alle käytetyn sähkön hinnan, ovat lämpöpumput silloin esimerkiksi sähkökattiloilla tuotettua lämpöä edullisempi vaihtoehto. Lämpöpumppujärjestelmien mitoituksessa ja suunnittelussa tulee huomioida käyttökohteen erityispiirteet ja vaatimukset, toisin sanoen lämpöpumppulaitoksia ei ole välttämättä kannattavaa vain kopioida kaukolämpöjärjestelmästä toiseen. Suuremmissa kokoluokissa osana kaukolämmön tuotantoa suunnitteluerot pienenevät, mutta

silti on olennaista huomioida esimerkiksi lämpöpumppulaitosten optimaalinen sijoittelu lämmönlähteiden (esim. hukkalämmön lähteet) ja kaukolämpöverkoston kulutuskohteiden ja pullonkaulojen (virtaus, lämpötila, paine-erot) mukaan.

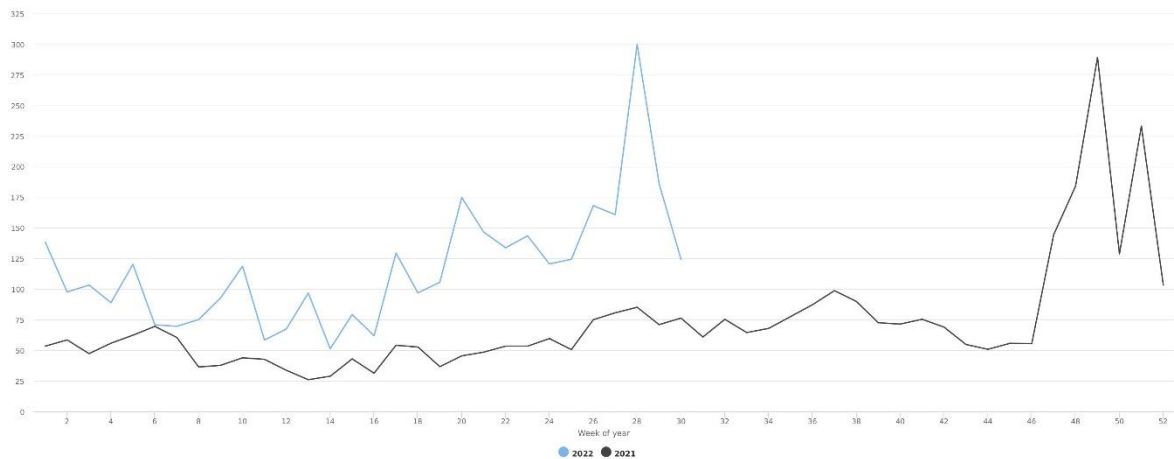
Lämpöpumppujen käytön teknistaloudelliseen kannattavuuteen kaukolämmön tuotannossa vaikuttavat sähkön hinta ja vallitseva verotusluokka (Rämä & Klobut 2020, s.11). Verotuksen osalta kaukolämpöverkkoon lämpöä tuottavien teollisen kokoluokan lämpöpumppujen kuluttama sähkö on siirtymässä verotusluokkaan II eli teollisuuden sähköveroluokkaan, mikä tarkoittaa sähköveron alenemista kyseisillä lämpöpumpuilla ja täten niillä tuotetun kaukolämmön kannattavuuden parantumista käyttökustannusten laskiessa. Lämpöpumppujen lisäksi myös sähkökattilat ja konesalit olisivat siirtymässä kyseiseen verotusluokkaan. (Valtioneuvosto 2021.)

Kuten kuvasta 15 nähdään, erilaisten hukka- ja ympäristölämpöjen (esim. jätevedet, jäähdytysilma, merivesi) käyttö Suomen kaukolämmön tuotannossa on lähtenyt merkittävään kasvuun vuodesta 2014 lähtien. Kun vuonna 2014 hukka- ja ympäristölämpöjä otettiin talteen ja hyödynnettiin alle 1500 GWh vuositasolla, oli vastaava luku vuonna 2021 jo yli 5000 GWh. Vuonna 2020 noin kolme neljäsosaa hyödynnetyistä hukkalämmöistä oli lämmönsiirtimillä talteen otettua lämpöä lähinnä teollisuuden prosesseista ja savukaasuista sekä geotermistä lämpöä, ja loput hieman yli 25 % oli lämpöpumpuilla tuotettua lämpöä lämmönlähteiden ollessa jäteveden ja datakeskusten hukkalämpöä sekä kaukojäähdytyksen paluuvettä.



Kuva 15. Hukka- ja ympäristölämpöjen hyödyntämisen sekä lämpöpumppujen käytön kehitys kaukolämmön tuotannossa Suomessa aikavälillä 2006–2021 (Energiateollisuus ry 2022a).

Muun muassa kehittyneemmät lämmön talteenoton menetelmät energialaitoksissa, sekä uusien, hyötysuhteeltaan aiempia parempien suurten teollisen kokoluokan lämpöpumppujen markkinoille tulo ovat yhdessä matalien sähkön hintojen kanssa avanneet mahdollisuuden lämpöpumpuilla tuotetun kaukolämmön tuotantoon. Lämpöpumput mahdollistavat esimerkiksi eri asteisten hukkalämmönlähteiden hyödyntämisen energiatehokkaasti ja ympäristöystävällisesti, ja niillä voidaan varsinkin energiavarastojen avulla optimoida suuren kokoluokan tuotantolaitosten eri käyttöasteita (Energiateollisuus ry 2016). Lämpöpumppujen kannattavuus riippuu niiden COP-arvosta, pumppujen käyttämän sähkön hinnasta sekä vaihtoehtoisten kaukolämmönlähteiden saatavuudesta ja kustannuksista. Teollisen kokoluokan mekaanisten kompressorilämpöpumppujen COP-arvo vaihtelee tyypillisesti noin 2,5-7,5 välillä riippuen lämpöpumpun kiertoaineen lämpötilaerosta höyrystimen ja lauhduttimen välillä, mutta myös tätä korkeammat COP-arvot (esim. COP=9) ovat nykyään tavallisia (Maaskola & Kataikko 2014 s.18). Verrattuna kiinteistökohtaisiin lämpöpumppuihin, kaukolämpöjärjestelmään kytkettyinä lämpöpumppujen hyödyt voidaan paremmin optimoida ja niitä voidaan hyödyntää myös kaukojäähdytystä tuottaessa (Energiateollisuus ry 2016). Optimaalisinta lämpöpumppujen kannattavuuden ja ympäristön kannalta olisi käyttää niitä lämmöntuotantoon säätövoimana silloin, kun tarjolla on halpaa ja uusiutuvilla energiamuodoilla, kuten tuulivoimalla, tuotettua sähköä. Vaihtoehtoisesti helposti saatavilla olevien ja halpojen ulkoisten lämmönlähteiden tapauksessa silloin, kun lämpöpumppujen COP-arvo on korkea ja sähkö halpaa, lämpöpumput voivat toimia myös peruskuorman tuottajina (Kokkonen 2020, s.24, Helin et al. 2018). Jo nyt havaittavissa oleva sähkömarkkinoiden epävakaisuus ja kausittaisuus tulevat mitä luultavimmin jatkossa vain voimistumaan johtuen kasvavasta uusiutuvan energian määrästä (Helin et al. 2018, s.456). Kuvassa 16 on esitettyinä markkinasähkön Suomen spot-hinnan vaihtelua viime vuoden alusta (2021) aina tämän vuoden (2022) heinäkuun loppuun asti, korostaen sähkömarkkinoiden hintojen volatilitteettia ja lämpöpumppujen sekä muun sähköllä tuotettavan lämmön kannattavuuden vaihteluita. Sähkön markkinahintojen odotetaan jatkavan voimakasta heilahtelua.



Kuva 16. Sähkön Suomen spot-markkinoiden (day-ahead prices) viikoittaisen keskiarvohinnan kehitys tammikuu 2021 - heinäkuu 2022, x-akselilla vuoden viikot ja y-akselilla sähkön viikoittainen markkinakeskihinta yksikössä €/MWh (Nord Pool 2022).

Lämpöpumppujen hyödyntämät lämmönlähteet voidaan jakaa esimerkiksi ympäristöstä saataviin lämmönlähteisiin ja erilaisten prosessien sivuvirtoina syntyviin hukkalämmönlähteisiin. Hukkalämmöistä kerrotaan seuraavassa kappaleessa. Ympäristölämpöihin voidaan lukea myös geolämpö, mutta sillekin on myöhemmin erillinen kappale, koska geolämpö soveltuu lämpötilaltaan monin osin sellaisenaan kaukolämpöverkkoon syötettäväksi. Muita ympäristölämpöjä ovat ilman ja vesistöjen sisältämä lämpö. Esimerkiksi Helsingissä on suunniteltu lämmöntuotantoa kaukolämpöverkkoon merivedestä lämpöpumppujen avulla (Helen Oy 2021). Ruotsissa ja Norjassa tällaisia merivesilämpöpumppuja osana kaukolämpötuotantoa on jo olemassa. (VALOR Partners Oy 2016.)

4.3.2 Hukkalämmöt

Esimerkiksi teollisuuden prosesseista, jätevedestä, liikerakennuksista, datakeskuksista, kaupunkien asuinrakennuksista, sekä kauppojen ja jäähallien kylmäkoneista syntyviä hukkalämpöjä, toisin sanoen jätelämpöjä, on mahdollista hyödyntää kaukolämmön tuotannossa, ja aihe onkin kasvattanut kiinnostusta viime vuosina. Hukkalämmöt itsessään ovat hiilineutraalia lämpöä, sillä ne eivät lisää primäärienergian tuotantoa, eivätkä siten ole riippuvaisia kaukolämmön tuotantoon käytetystä polttoaineesta. Hukkalämmöillä onkin täten suurin potentiaali laskea kaukolämmityksen päästöjä. Euroopan Unionin energiatehokkuusdirektiivi (EED, 2012/27/EU) lajittelee tämän kappaleen alussa mainittuja lämmönlähteitä niin, että

esimerkiksi puhdistetusta jätevedestä talteen otettu lämpö määritellään lisäksi uusiutuvana energiana. Hukkalämpöjä pystytään siirtämään kaukolämpöverkkoon lämpöpumppujen avulla. Kuitenkin esimerkiksi monet teollisuuden prosesseissa syntyvät hukkalämmöt ovat korkean lämpötilatasonsa ansiosta suoraan ilman lämpöpumppua hyödynnettävissä kaukolämpöverkossa (Rämä & Klobut 2020, s.13). Mahdollisia hiilineutraaliuteen ja energiatehokkuuteen liittyviä kysymyksiä ovat lämpöpumppujen käyttämän sähköenergian tuotantotavat, lämpöpumppujen toimintaa ja energiatehokkuutta kuvaavat COP-arvot, sekä hukkalämpöjen keräämisen ja hyödyntämisen helppous kaukolämpöverkkoon vaadittuihin lämpötilatasoihin nähden.

Hukkalämpöjen hyödyntämisen kannattavuus kaukolämmön tuotannossa on hyvin tapauskohtaista. Kannattavuuteen vaikuttavat ainakin lämmönlähteen hinta, kaukolämpöverkkoon syötettävän veden vaadittu lämpötila, sekä lämmönlähteen vakaus ja ennustettavuus. Kaukolämpötuotannon potentiaalia tietyistä hukkalämmönlähteistä arvioitaessa on myös huomioitava, että lämmönlähteen on sijaittava kaukolämpöverkon varrella tai muuten verkostoon soveltuvalla sijainnilla. Muita huomioitavia asioita ovat hukkalämpöä kaukolämpöverkkoon syöttävien lämpöpumppujen suuret investointikustannukset, jolloin ne vaativat riittävän suuret käyttötunnit pitämään tuotetun lämmön hinnan kohtuullisena. Toisaalta kasvaneet päästöoikeuksien hinnat sekä mahdolliset matalamman lämpötilan kaukolämpöverkostot hyödyttävät hukkalämpöjen hyödyntämistä lämpöpumpuilla kaukolämmön tuotantoon. Sähkökulutuksen merkittävän lisääntymisen takia tuotantokohteeseen liitetty sähköverkko saattaa tarvita vahvistamista aiheuttaen lisäkustannuksia. Jos hukkalämmönlähteestä tuotetaan kaukolämpöä talvella eikä menoveden lämpötilaa kyetä lämpöpumpuilla nostamaan muuta verkostoa ja lämmöntarvetta vastaavalle tasolle, voi myös lämmön primauksen hinta vaihtoehtoisilla tuotantotavoilla tulla huomattavan kalliiksi. Optimaalisimmassa tapauksessa hukkalämpö saadaan ilmaiseksi läheltä kaukolämpöverkkoa, sen saatavuus on tasaista ympäri vuoden ja lämpötila on muuttumaton sekä riittävän korkea sopiakseen suoraan tai lämpöpumpuilla korkealla COP-arvolla kaukolämpöverkkoon syötettäväksi. Tällaisia hukkalämmönlähteitä ovat esimerkiksi puhdistetun jäteveden lämpö ja datakeskusten jäähdytyksestä syntyvä lämpö. (Sitra 2019.)

Suomen teollisuudessa suuressa asemassa oleva metsäteollisuus, sekä metalli- ja kemianteollisuus tuottavat prosesseissaan merkittävän määrän lämpöä, jota jo nykyään hyödynnetään tehtaiden omien tuotantoprosessien (lämmön talteenottojärjestelmien kautta esimerkiksi

prosessien esilämmityksessä) lisäksi kaukolämmityksessä. Teollisuuden hukkalämmöillä olisi kuitenkin vielä nykyistä suurempaa potentiaalia olla osana kaukolämmön tuotantoa. Etuna teollisuuden hukkalämpöjen hyödyntämiselle on kaukolämpöverkkoon suoraan (ilman priimausta) soveltuvat lämpötilatasot sekä riittävä ja tasainen, ympärivuotinen lämmön tuotanto.

Seuraavien vaatimusten on täytyttävä hukkalämpöjen hyödyntämisen kannattavuuden varmistamiseksi, sen lisäksi että hukkalämmölle ei löydy kannattavaa ensisijaista tai vaihtoehtoista käyttökohdetta: Lämmön talteenoton on tapahduttava kustannustehokkaasti, hukkalämmön lämpötilan on oltava riittävä sellaisenaan tai edullisesti priimattavissa vaadittuun menolämpötilaan, hukkalämmön syöttö- ja siirtoinfrastruktuurin rakentaminen putkistoinen ja lämmönsiirtokeskuksineen on oltava edullista ja hukkalämmön tuotannon vaihtelujen on oltava mahdollisimman vähäisiä vähintäänkin lyhyellä aikavälillä vähentäen tarvetta lämmön varastoinnille. Toisaalta taas hukkalämmön saatavuus on oltava taattua pitkällä aikavälillä vaatien riskinarvioinnit hukkalämmön tuottajan konkurssin varalle ja estäen isojen prosessimuutosten tekemisen hukkalämmöntuottajan omissa prosesseissa, jotka voisivat poistaa tai vähentää hukkalämmön tuotantoa. Hukkalämmön sijainnin on oltava riittävän taloudellinen ja hyötysuhteeltaan hyvä kaukolämpöverkon kannalta ja varalämmön saatavuus on oltava turvattu lämpöyhtiön toimesta. Edellä kuvatut kohdat koskevat myös esimerkiksi aiemmin esiteltyjen vetyteknologioiden käytöstä syntyvien hukkalämpöjen hyödyntämisen vaatimuksia. (Böhm et al. 2021.)

Hyödynnettävä hukkalämpö otetaan talteen lämmönvaihtimella, joka siirtää lämmön lämpöpumppujärjestelmälle. Riippuen saatavilla olevasta hukkalämmön laadusta ja kaukolämpöverkosta, lämpöpumppujen tuottama lämpö syötetään joko kaukolämpöverkon meno- tai paluupuolelle. Nykyään teollisen kokoluokan lämpöpumppujärjestelmällä on mahdollista tuottaa hukkalämmönlähteestä riippumatta kaukolämpöverkkoon kesällä, keväällä ja syksyllä vaadittavat lämpötilatasot (60–100 °C), mutta ongelmaksi voi muodostua talven aikaisiin suurimpiin lämmön kysyntähuippuihin vaaditut lämpötilat (jopa 120 °C). Kylmimpinä aikoina kaukolämpöyhtiön vaihtoehtona on esim. priimata muulla tuotannolla lämpöpumppujärjestelmän tuottama hukkalämpö kaukolämpöverkon vaatimalle menoveden lämpötilatasolle, tai sitten tuottaa vaadittu lämpö kokonaan muilla tuotantomuodoilla. Koska lämpöpumppuprosessi toimii parhaiten pienemmällä lämpötilaerolla, ei ole järkevää kasvattaa kerralla liikaa järjestelmän syöttämän veden lämpötilaa kohti kaukolämpöverkon vaatimaa

menoveden lämpötilaa. Onkin tyypillistä, että hukkalämpöä syötetään lämpöpumpuilla kaukolämpöverkon paluupuolelle paremmalla COP-arvolla, tai sitten lämpöpumppuja kytketään useita rinnan ja/tai sarjaan halutun lämpötilatason saavuttamiseksi. Lämmön paluuputkeen syöttämiselle rajoitteita voi aiheuttaa paluueden sallittu maksimilämpötila, sillä liian korkea paluulämpötila heikentää kaukolämpöverkon jäähtymää aiheuttaen ongelmia muun muassa virtausmäärien ja paineiden kanssa. (Kaksonen 2021.)

Helsingissä otettiin jo vuonna 2006 käyttöön Helenin toimesta Katri Valan puiston alle rakennettu maailman suurin samassa prosessissa sekä kaukolämpöä, että -jäähdystystä tuottava lämpöpumppulaitos, joka hyödyntää lämmönlähteenään puhdistetun jäteveden hukkalämpöä sekä kesällä merivettä jäähdistyksen tuotannossa (Koskelainen et al. s.558-559). Laitos sisältää kuusi lämpöpumppua, minkä lisäksi yhtiö on investoinut seitsemänteen lämpöpumppuun, jonka tuotanto on tarkoitus käynnistää vuonna 2023. Uuden investoinnin jälkeen laitoksen lämpöteho tulee olemaan 155 MW ja jäähdystysteho 103,5 MW. Katri Valan lämpöpumppulaitoksen lisäksi Helenillä on lämpöpumppuihin perustuvaa kaukolämmön tuotantokapasiteettia Esplanadin puiston alla sekä Vuosaaren suunnitteilla merivesilämpöpumppulaitos. (Helen Oy 2020.)

Datakeskusten ja konesalien jäähdityksessä syntyvällä hukkalämmöllä tuotetaan kaukolämpöä jo moniin Suomen kaukolämpöverkkoihin: Yksi tällainen kohde on Tampereella, jossa Oilonin teollisuuslämpöpumput sekä jäähdyttävät konesalia, että siirtävät konesalin sähkön käytöstä syntyvät hukkalämmöt lämpöpumppujen avulla 95 °C-asteisena Tampereen sähkölaitoksen kaukolämpöverkkoon. Kyseisen järjestelmän kuudella lämpöpumpuilla tuotetaan noin 50 GWh kaukolämpöä vuodessa. (Oilon Group Oy 2021b.)

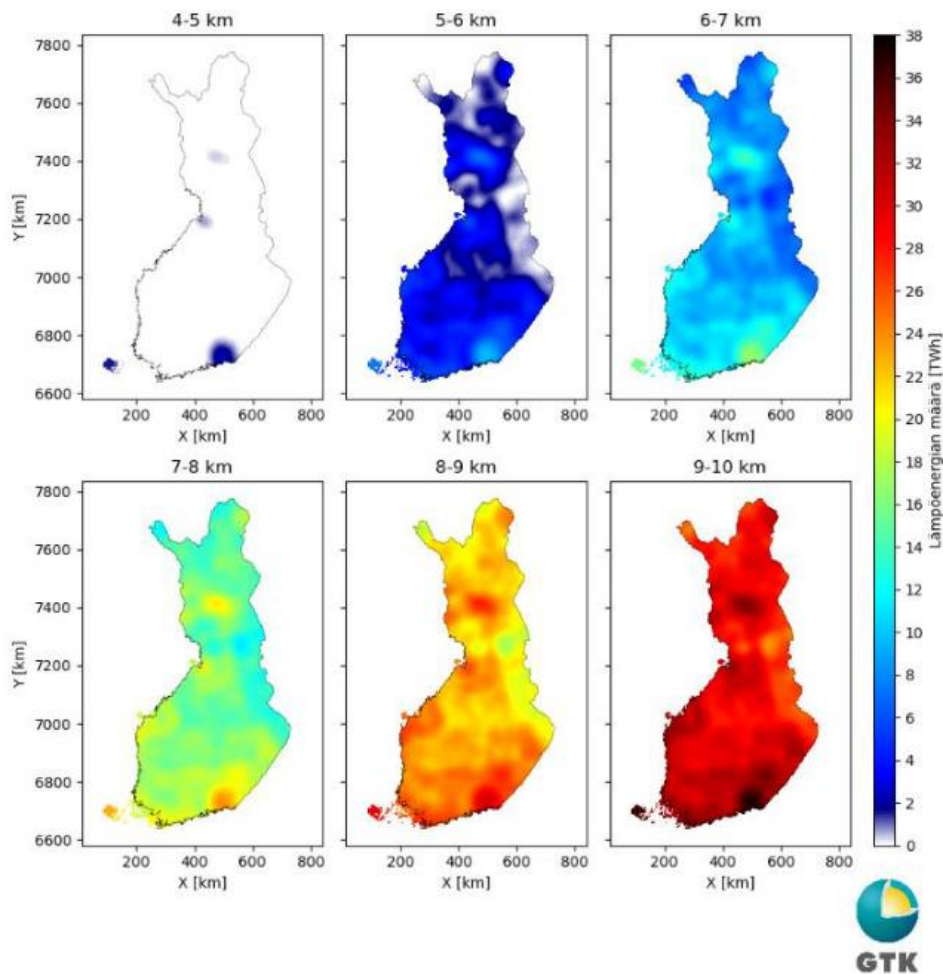
4.3.3 Geoterminen lämpö

Maalämpöä hyödynnetään nykyään laajasti pienemmässä mittakaavassa omakotitaloissa ja taloyhtiöissä yksiköiden sisäisessä lämmöntuotannossa. Maalämpö on maan pintakerrokseen varastoitunutta auringon säteilyenergiaa ja vaatii matalan lämpötilansa takia lämpöpumpun kaukolämmöntuotannon lämmönlähteenä hyödyntämiseksi. Geoterminen lämpö tai geolämpö puolestaan on syvältä maankuoresta johtuvaa lämpöä, joka on usein korkeamassa lämpötilassa ja suoraan kaukolämpöverkkoon hyödynnettävissä.

Geolämpöpotentiaali riippuu maan kallioperästä ja sen aiheuttamasta lämpögradientista määrittäen riittävän lämpötilan saavuttamiseen tarvittavan lämpökaivon porausyvyyden.

Kaukolämmityksessä voidaan hyödyntää kahdenlaista geolämmön muotoa. Syvä geolämpö soveltuu suoraan tuotantopisteeksi kaukolämpöverkkoon, sillä lämpökaivon porausyvyyden ansiosta siitä kyetään tuomaan noin 100 °C-asteista vettä. Syvän geolämmön hyödyntämistä etenkin Suomessa rajoittavat ainakin toistaiseksi porauskustannukset, sillä näin lämpimän veden saavuttamiseksi vaadittu porausyvyys Suomen kovan kallioperän ohella vaatii kallista poraustekniikkaa, jota ollaan vasta kehittämässä. Porauskuksiltaan edullisempi vaihtoehto on porata yleisesti käytössä olevalla poraustekniikalla helposti päästävissä olevalle porausyvyydelle, jolloin puhutaan keskisyvästä geolämmöstä. Tällöin lämpökaiosta ei saada kuitenkaan suoraan kaukolämpöverkkoon soveltuvaa vettä, vaan se täytyy priimata lämpöpumpulla verkkoon soveltuvaksi, jolloin lisäkustannuksia syntyy lämpöpumpuinvestoinnista ja lämpöpumpun kuluttamasta sähköstä. Keskisyvän geolämmön potentiaali tiedetään melko hyvin eikä se ole kovin suuri johtuen matalammista lämpötiloista ja niiden vaatimasta lämpöpumpun lisäyksestä. Syvällä geolämmöllä on selkeästi enemmän potentiaalia johtuen porauskustannusten epävarmasta kehityksestä ja toisaalta syvemältä saatavan lämpötehon muutoksista. (Joronen et al. 2021, s.15.)

Suomessa on vireillä useita syvään geolämpökaivoon perustuvia hankkeita, muun muassa Espoossa, Oulussa ja Helsingissä. Suomen maaperän koostumus vaikuttaa geotermisen energian hyödynnettävyyteen siten, että esimerkiksi kaukolämmön tuotantoon riittävän korkean kiertoveden tai muun lämmönsiirtonesteen lämpötilan saavuttamiseksi on porattava syvälle kallioperään, jolloin puhutaan noin 6 km ja siitä syvemmistä geolämpökaivoista. Kuvassa 17 on havainnollistettu Suomen kallioperästä eri syvyyksiltä saatavan geotermisen lämpöenergian potentiaalia.



Kuva 17. Geotermisen lämmön potentiaali Suomessa eri poraussyvyyksillä (AFRY 2020b, s.48).

Espoon Otaniemessä rakenteilla oleva ST1:n syvän geolämmön pilottiprojekti pyrkii poraamaan kaksi reikää kallioperään noin 6,4 km syvyyteen, joista toiseen pumpataan kylmää vettä. Kylmä vesi ottaa vastaan syvällä kallioperässä olevaa lämpöä ja lämmentyään nousee toista putkea pitkin maanpinnalle lämmönvaihtimen kautta kaukolämpöverkkoon syötettäväksi. Kyseinen pilottiprojekti antaa paljon tietoa geotermisen energian hyödyntämispotentiaalista sekä antaa osviittaa sen investointikustannuksista. Muiden vastaavan kokoluokan projektien aloittaminen riippuu vahvasti kyseisen pilotin onnistumisesta. Lisäksi yleisesti geolämmön potentiaalın suuremman mittakaavan hyödyntämiseksi Suomessa on kallioperän poraustekniikan kehityttävä, jotta geolämpölaitosten investointikustannukset laskevat. (ST1 2022.)

Helenillä alkoi vuoden 2021 aikana poraustyöt Ruskeasuolla, johon on tarkoitus valmistua lämpöpumpuista ja keskisyvästä lämpökaivosta koostuva geolämpölaitos. Keskisyvällä

tarkoitetaan tässä yhteydessä 2,5 km syvyydelle porattavaa kaivoa, jossa maan lämpötila on 40 °C-asteista ja jolloin kaivossa kiertävä alun perin noin 5 °C vesi on lämpöpumpulle saapuessa lämmennyt 10–15 °C:een. Kyseessä on pilottikokeilu mm. poraustekniikan ja geolämpökohteiden teknisten ratkaisujen osalta, ja laitoksen on tarkoitus tuottaa sekä hiili-neutraalia kaukolämpöä (1,8 GWh/a), että -jäähdytystä (0,8 GWh/a). (Helen Oy 2022c.)

4.3.4 Aurinkolämpö

Aurinkolämpö on jäänyt monin paikoin aurinkosähkön varjoon uusiutuvien energiamuotojen vallatessa energiemarkkinoita, mutta myös aurinkolämmöllä on potentiaalia kasvattaa osuuttaan eritoten kaukolämpöverkon osaksi kytkettynä, sillä silloin aurinkolämpöjärjestelmästä saadaan kustannustehokkaampi kuin kiinteistökohtaisena yksittäisenä ratkaisuna. Aurinkolämpöjärjestelmän sopivuus on analysoitava aina järjestelmäkohtaisesti johtuen kaukolämpöverkkojen erilaisuudesta. Teknisesti kaukolämpöverkkoon liittymiselle ei ole esteitä, mutta aurinkolämmön kausittaisuuden takia muuta kaukolämpökapasiteettia ei voida vähentää. Kesäaikana, lämmöntarpeen ollessa alimmillaan, aurinkolämmöllä on mahdollista korvata esimerkiksi fossiilisten polttoaineiden käyttöä ja alentaa näin mahdollisesti lämmöntuotannon muuttuvia kustannuksia. Kuitenkin kustannusten lasku on riippuvainen vaihtoehtoisen kaukolämmön tuotantomuodon polttoainekustannuksista kesäaikana eli esimerkiksi öljyn tai kaasun hinnasta, tai jostain toisesta hiilineutraalista tuotantomuodosta. Aurinkoenergialla tuotetun kaukolämmön tulevaisuuden näkymät riippuvat muun muassa uusiutuvan energian tavoitteista, rakennusmääräysten kehittymisestä, sekä vaihtoehtoisten kesäajan lämmöntuotannon polttoaineiden, kuten fossiilisten, hinnasta ja päästökaupan kehityksestä. Suomen olosuhteisiin aurinkolämpö ei sovellu niin hyvin kuin alueille, joissa aurinko paistaa suuremman osan vuodesta, arvioitu maksimipotentiaali aurinkolämmön tuotannolle Suomessa on noin 20 GWh/a. (Motiva 2020.)

Suomessa aurinkolämmön hyödyntäminen kaukolämmöntuotannossa on vielä hyvin olematonta ja Suomi onkin ollut yksi vähiten aurinkoenergiaa hyödyntävistä ja EU:lta tukia hakevista jäsenmaista (Paiho & Reda 2016, s.917). Saksassa taas on useita kaupunginosia, joissa kaukolämpöä tuotetaan aurinkolämmöllä yhdistettynä kausilämpövarastoon. Myös Ruotsissa ja Kanadassa on aurinkolämpöä hyödyntäviä kaukolämpöjärjestelmiä. (Abdurafikov et al. 2017, s.57.)

Aurinkolämpöjärjestelmän periaate perustuu auringon säteilyenergian muuntamiseen lämmöksi jonkin lämmönsiirtoa tukevan väliaineen avulla. Lämmönsiirtoaine voi olla esimerkiksi vesi-glykoliseos tai ilma. Erilaisia aurinkokeräinmalleja ovat esimerkiksi aurinkosähköpaneeleita muistuttavat elementtirakenteiset tasokeräimet, korkeampia jopa 250 °C sisälämpötiloja kehittävät ja paremmalla hyötysuhteella toimivat tyhjiöputkikeräimet, sekä nestekiertoisiin keräimiin verrattuna turvallisemmat ja käyttövarmemmat ilmakeräimet. (Pekkala 2018, s.11-14.)

Aurinkolämpöjärjestelmä vaatii jonkinlaisen lämpövaraston liitettäessä kaukolämpöverkkoon, sillä vaikka teknisesti on mahdollista lisätä satoja megawatteja aurinkolämpöä kaukolämmöntuotantoon, on aurinkolämmön vaihtelevan tuotannon takia tuotannon ja kulutuksen suhdetta pystyttävä tasapainottamaan ja parantamaan järjestelmän käytettävyyttä. Vaihtoehtoina varastoinnille ovat puskurivaraajat lyhytaikaiseen lämmön varastointiin ja suuren kokuokan lämpövarastot, jotka kykenevät pidempiaikaiseen lämmön varastointiin. Lisäksi aurinkolämmön tuotantoa on usein juuri silloin, kun kaukolämmön kulutus ei ole suurta, eli kesällä. Kesäajan lämmöntarpeen täyttäminen muillakin tuotantotavoilla on helppoa ja toistaiseksi lämmön kausivarastointi ei ole vielä riittävän kustannustehokasta. Aurinkolämpö joutuu myös kilpailemaan asennustilasta katoille toistaiseksi suosittumman ja kustannustehokkaamman aurinkosähkön kanssa. (Pekkala 2018, s.15, Joronen et al. 2021, s.14.)

Toistaiseksi aurinkolämmön hyödyntäminen kaukolämmön tuotannossa on ollut minimaalista ja suurin osa asennetuista aurinkolämpöjärjestelmistä Suomessa sekä myös maailmalla on kiinteistökohtaisia, eritoten käyttöveden lämmitykseen keskittyneitä järjestelmiä. Eniten aurinkolämpöä hyödynnetään Kiinassa, lisäksi esimerkiksi Kanadassa ja Tanskassa on merkittävää aurinkolämpötuotantoa. Aurinkolämpöjärjestelmien kannattavuutta verrattuna vaihtoehtoihin kaukolämmön tuotantomuotoihin laskevat korkeat investointikustannukset, sekä aurinkolämmön kausittaisuus, minkä vuoksi aurinkolämmöllä ei voida koko vuoden mitassa korvata jotain muuta lämmöntuotantomuotoa. Kaukolämpöyhtiön kannalta aurinkolämmöllä kaukolämmön tuottamista tukevat aurinkolämmön hiilineutraalius ja polttoon perustumaton tuotantotapa, jotka tuovat imagohyötyjä ja lisäävät kaukolämmön hyväksyttävyyttä, sekä palveluntarjonnan laajentamisen mahdollisuus alueille ja kohteisiin, joissa kaukolämpöverkkoa ei vielä ole. (Pekkala 2018, s.18-19.)

4.3.5 Sähkökattilat

Kuten lämpöpumpuillakin, sähkökattiloilla pystytään tasaamaan sähköntuotannon ja -kulutuksen vaihteluita tuottamalla sähköä avulla lämpöä esimerkiksi edullisen ja päästöttömän sähköä ylituotannon aikaan. Sähkökattiloiden etuna verrattuna teollisen kokoluokan lämpöpumppeihin on edullisempi investointikustannus, sillä sähkökattila on yksinkertaistettuna vain suuri vedenkeitin. Haittapuolena taas on lämpöpumppuja selvästi huonompi hyötysuhde ($\eta=1$). Toisaalta sähkökattiloiden häviöt ovat minimaalisia verrattuna polttotekniikoilla eri polttoaineista saataviin lämpöenergiämääriin verrattuna. Sähkökattiloiden kaukolämpöveden lämmitykseen käyttämä sähköenergia voidaan tuottaa hiilineutraalisti esimerkiksi tuuli-, aurinko-, vesi-, tai ydinvoimalla. Erityisesti tuuli- ja aurinkovoiman vaihteleva tuotanto volatiileine hintoineen soveltuu hyvin sähkökattiloiden taloudellisesti kannattavaan hyödyntämiseen. Toisaalta juuri vaihtelevan tuuli- ja aurinkovoiman takia sähkökattiloiden yhteyteen tarvitaan lämmön varastointia, jotta sähkökattilan käyttöä saadaan optimoitua ja kaukolämmön päästöjä vähennettyä. (Joronen et al. 2021, s.14.)

Todennäköisesti sähkökattilat yleistyvät kaukolämpötuotannossa lämpöpumppujen ohella ja tavoiteltaessa täysin polttoon perustumatonta kaukolämmön tuotantoa sähkökattilat korvaisivat käytännössä toistaiseksi fossiilisiin polttoaineisiin perustunutta huippu- ja varakapasiteettia. Tämä tulee merkittävästi lisäämään riippuvuutta sähköstä ja sähköä hinta tulee yhä enemmän vaikuttamaan myös lämmön hintaan. Lisäksi sähköä huipputuotanto on vielä toistaiseksi kaukolämpötuotannon tapaan fossiilisten polttoaineiden avulla tuotettua ja päästöjä aiheuttavaa. (Joronen et al. 2021, s.14.)

Kuten lämpöpumputkin, myös sähkökattilat tarvitsevat liittymän sähköverkkoon. Tästä voi aiheutua merkittäviä lisäkustannuksia, jos esimerkiksi lämpölaitoksen yhteyteen rakennetaan sähkökattila ja aiempi liittymä ei ole riittävä. Sähkölämmityksen lisääntyessä kaukolämmön tuotannossa sähköverkon koko voi monin paikoin jäädä riittämättömäksi, jolloin joudutaan investoimaan ja rakentamaan uusia kantaverkkoyhteyksiä. Kantaverkkoinvestoinnit kerätään käytännössä sähkönkuluttajien sähkönsiirron hinnoittelulla. (Joronen et al. 2021, s.14.)

Sähkökattiloilla tuotettava kaukolämpö ei siis ole ongelmaton, mutta niillä voidaan tuottaa suhteellisen edullisesti ja päästöttömästi lämpöä sähköä huipputehon tarpeiden ulkopuolella.

Sähkökattiloiden tekniikka on yksinkertaista ja niiden käynnistämiseen ja alasajoon kuluvat ajat ovat huomattavasti lyhyempiä kuin esimerkiksi lämpökattiloilla.

4.3.6 Kaukolämpöä tuottavat SMR-reaktorit

Pieni modulaarinen ydinreaktori (SMR) tarkoittaa fissioon perustuvaa ydinreaktoria, joka on kooltaan ja kapasiteetiltaan selkeästi nykyisiä ydinreaktoreita pienempi, kymmenistä megawateista satoihin megawatteihin nykyisten gigawattiluokan laitosten sijaan. Modulaarisuus tarkoittaa, että SMR-reaktoreita on mahdollista asentaa moduuleittain useamman reaktorin kokonaisuudeksi skaalaten näin laitospasiteettia. Useampi kappale pienempiä reaktoreita esimerkiksi kaukolämmöntuotannossa lisää huoltovarmuutta, vaikka toisaalta pienemmällä kokoluokalla menetetään ison laitoksen skaalaedut verrattaessa tuotetun energiayksikön hintaa. SMR-reaktorit ovat standardisoituja laitoksia, mikä tarkoittaa, että pääkomponentit voidaan rakentaa valmiiksi ennen asennuspaikalle tuontia ja laitos valmistuu nopeammin. Tällä taas on merkittäviä kustannuksia laskevia vaikutuksia. Vesijäähdytteiset ja kevytvesiteknoologiaan perustuvat SMR-reaktorit ovat lähimpänä kaupallista potentiaalia sekä teknologisista, että sääntelyllisistä syistä, mutta muitakin kehittyneitä reaktoriteknologioita on kehitteillä. SMR-tekniikan hyödyntämistä on Suomessakin kaavailtu tulevaisuuden mahdolliseksi kaukolämmöntuotannon peruspilariksi korvaamaan esimerkiksi hiilen käyttöä ja vähentämään tarvetta bioenergian käytön lisäämiselle. (Tulkki et al. 2017, s.5, Partanen 2019, s.12.)

Ydinvoimalla on ollut ehkäpä kaikista energian tuotantomuodoista suurin poliittisesti polarisoiva vaikutus eurooppalaisessa päätöksenteossa ja siten energiakentässä. Suurin julkinen ja monesti kansalaisten esiin tuoma huolenaihe on ydinvoiman turvallisuus. Ennen kaikkea suuresta kokoluokasta johtuen nykyisten ydinvoimalaitosten sääntely ja luvittaminen on monimutkainen ja aikaa vievä prosessi, joka heikentää erityisesti nyt tutkimuksen kohteena olevien pienien, erityisesti lämmöntuotantoon soveltuvien, modulaaristen ydinreaktoreiden eli SMR:en nopeaa käyttöönottoa.

Nykyiset suuret ydinreaktorit tarvitsevat (lainsäädännöllisesti määritellyt) turva- ja evakuointivyöhykkeet ympärilleen mahdollisen onnettomuuden tai säteilyvuodon sattuessa. Suomessa nämä käytetyt raja-alueet ovat 5 km (turvavyöhyke) ja 20 km (evakuointivyöhyke), mikä tarkoittaa, että alle 5 km säteellä ydinvoimalasta ei saa olla laajaa asutusta, kouluja,

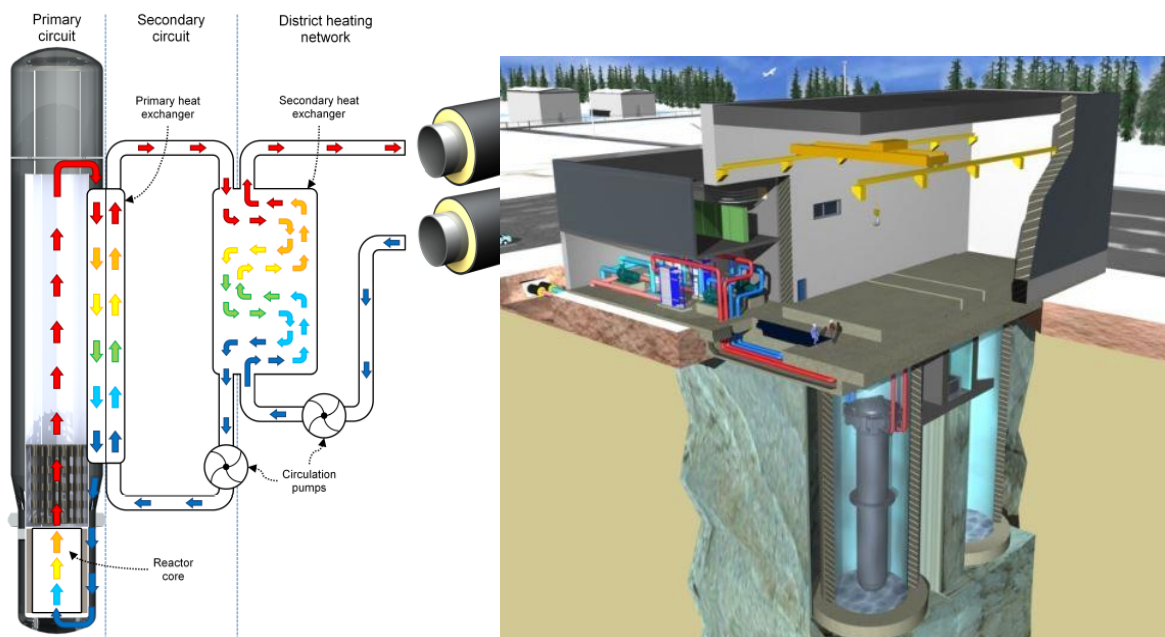
sairaaloita tai muita julkisia rakennuksia, ja että 20 km säteellä sijaitsevilla toimitiloilla ja rakennuksilla on oltava omat evakuointisuunnitelmansa. Pienet, modulaariset ydinreaktorit eroavat kuitenkin nykyisin käytössä olevista suurista ydinvoimaloista siinä, että niissä käytettävän radioaktiivisen ydinpolttoaineen määrä on merkittävästi pienempi, jolloin myös niiden kapasiteetti on pienempi. Tämä tarkoittaa, että hätätilanteessa ne pystytään jäähdyttämään isompia laitoksia helpommin. Lisäksi pienet SMR-reaktorit on mahdollista rakentaa suurimmilta osin maan alle, mikä luo luonnollista suojaa niiden ja läheisten asukkaiden välille. (Partanen 2019, s.77.)

Ydinvoiman etuna energiantuotannossa on myös se, ettei se tuota ollenkaan suoria päästöjä, ja epäsuorien päästöjenkin määrä on hyvin pieni, noin 4 gCO₂/kWh lämmöntuotannossa. Partanen (2019) mallinsi raportissaan, että noin 50—70 % kaukolämmöstä olisi optimaalista tuottaa pienillä modulaarisilla ydinreaktoreilla, vaihteluvälin riippuessa mm. oletetuista reaktoreiden käyttökertoimista ja CHP-tuotannon käytettävyydestä. Tarkasteltaessa koko Suomen tilannetta, jättämällä siis paikalliset erot ja olosuhteet huomioimatta, tämä tarkoittaisi nykyisellä polttoaineiden käytöllä sitä, että käytännössä kaikki fossiiliset polttoaineet sekä turve olisivat korvattavissa SMR-kaukolämmöllä. Kun otetaan huomioon, että loput kaukolämmön tuotannosta on toteutettu bioenergialla ja hukkalämmöillä, jotka luokitellaan päästöttömiksi energianlähteiksi, siirtymällä hyödyntämään SMR-reaktoreiden tuottamaa kaukolämpöä olisi mahdollista poistaa lähestulkoon kaikki kaukolämmön tuotannosta syntyvät hiilidioksidipäästöt. Suomen kaukolämmön tuotannosta syntyvät hiilidioksidipäästöt olivat vuonna 2021 suuruudeltaan noin 4,8 miljoonaa tonnia ja esimerkiksi joulukuussa 2021 päästöoikeuden hinta oli korkeimmillaan jopa 85 €/tCO₂, vuoden 2021 päästökauppahintojen keskiarvon ollessa 54,18 €/tCO₂ (Energiateollisuus ry 2022a, Energiavirasto 2021). Tällöin kaukolämmön päästöjen poistosta syntyvät säästöt olisivat korkeimman toteutuneen hinnan tapauksessa olleet jopa 408 miljoonaa euroa vuodessa ja keskimääräiselläkin vuoden 2021 hinnalla 260 miljoonaa euroa vuodessa. (Partanen 2019, s.55,59.)

Suomessa yhdeksän suurinta kaukolämpöverkkoa käsittää noin 60 % koko Suomen vuotuisesta kaukolämmön kulutuksesta (n. 21 TWh) sekä suurimman osan fossiilisilla polttoaineilla tuotetusta kaukolämmöstä. Näihin Suomen mittakaavassa lämmöntarpeeltaan suurimpiin kaukolämpöverkkoihin soveltuisivat kaukolämmön pohjakuorman tuottajiksi joko pienet modulaariset ydinreaktorit (SMR, kapasiteetiltaan 150—900 MW_{th}), tai mikroreaktorit (kapasiteetiltaan 20—50 MW_{th}). Kapasiteettien vertailun vuoksi esimerkiksi Olkiluoto 3 -

reaktorin lämpöteho on 4300 MW_{th} (TVO 2022). Partanen (2019, s.26) määrittä raportissaan, että kaukolämpöä tuottavan SMR-voimalan vuotuinen huipunkäyttöaika olisi vähintään 5500–6000 tuntia, jolloin käyttökerroin olisi minimissään luokkaa 63—70 %, kun taas optimaalisimmillaan käyttökerroin olisi 85—93 %. (Partanen 2019.)

Pelkkää kaukolämpöä tuottava ydinreaktori eroaisi nykyisin käytössä olevista ydinvoimaloista ollen suunnittelultaan ja rakenteeltaan selkeästi yksinkertaisempi ja siten halvempi valmistaa ja operoida. Kyseinen reaktori ei tarvitsisi esimerkiksi suuria paineita kestäviä painesäiliöitä eikä turbiinisaarekettä, koska se ei tuottaisi ollenkaan sähköä. Lämmöntuotanto vaatii sähköntuotantoa pienemmät lämpötilat ja paineet, tehden reaktoreista ja niiden laitteistojen suunnittelusta yksinkertaisempaa sekä sijoittelusta helpompaa alentaen kustannuksia. Kuvassa 18 on havainnollistettu näitä SMR-ydinkaukolämpövoimaloiden piirteitä. Lisäksi pienemmän kokoluokan reaktorissa on helpompi toteuttaa passiivisia turvajärjestelmiä aktiivisten sijaan, kuten esimerkiksi painovoiman avulla toimivaa reaktoriytimen jäähdytystä reaktoriveden kiehumisen tapauksessa. (Partanen 2019, s.11,13.)



Kuva 18. Kaukolämpöä tuottavan SMR-reaktorin primääri- ja sekundääripiirien sekä kaukolämpöverkon muodostama systeemi sekä vesivirtauksien suunnat, värit kuvaavat veden suhteellista lämpötilaa (vasemmalla). SMR-reaktorin sijoittelu reaktorirakennuksen alle maaperään (oikealla). (mukaiillen Leppänen 2021.)

Vaikka pienet modulaariset ydinreaktorit ovat nykyisiä ydinvoimaloita pienempiä häviten niille suuren mittakaavan tuomassa taloudellisuudessa tuotettua energiayksikköä kohden, pienempi koko ja kapasiteetti tarjoavat muita hyötyä ja ominaisuuksia, joita tuodaan esille seuraavaksi. Matalamman kapasiteetin ansiosta monet pienet reaktorit voidaan suunnitella passiivisesti turvallisiksi vähentäen tarvetta useille aktiivisille turvajärjestelmille sekä antaen mahdollisuuden sijoittaa ne turvallisesti myös lähemmäksi asutusta. Laitoksen sijoittelu- paikkojen mahdollisuus lisääntyy myös koskemaan maan alle rakentamista sekä sijoittamista esimerkiksi lautoille/proomuille tai merelle liikuteltaviin/kiinteisiin asennuskohteisiin, jolloin myös niiden liikuteltavuus parantuu. Useamman pienen modulaarisen ydinreaktorin rakentaminen samaan aikaan on mahdollista ja reaktorin rakentaminen on mahdollista toteuttaa tehtaissa tai telakoilla laitoksen lopullisella sijaintipaikalla rakentamisen sijasta pienentäen näin kustannuksia. Alkuinvestoinnin määrä jää pienemmäksi ja SMR-projektit ovat helpompia hallita johtaen lyhyempiin projektiaikoihin ja tuottaen näin keskimääräisesti nopeammin voittoa sijoittajille. Jotkin SMR-reaktorikonstruktiot mahdollistavat reaktorimoduulin poistamisen mahdollistaen polttoaineen vaihdon/latauksen ja käytöstä poistamisen muualla kuin itse laitoksen sijaintipaikalla. Lisäksi jotkin SMR-toteutukset mahdollistavat teknologian uudelleenkäytön tarkoittaen, että samaa perussuunnittelua on mahdollista hyödyntää eri sijainneissa, erilaisessa ympäristössä ja erilaisessa seismisessä aktiivisuudessa. (Partanen 2019.)

Konseptitasolla oleva ja Lappeenrannan-Lahden teknillisessä yliopistossa suunniteltu, matalalämpötilaista noin 100 °C-asteista kaukolämpövettä tuottava ”FinReactor” olisi kapasiteetiltaan 24 MW_{th} tai 102 MW_{th}. Kyseinen pieni modulaarinen ydinreaktori olisi suunniteltu ja valmistettu Suomessa ja sitä pystyttäisiin kaukolämmityksen lisäksi hyödyntämään kaukojäähdytyksessä sekä suolan erotuksessa juomavedestä. Kyseisen kokoluokan ydinreaktorit (alle 50 MW) eivät tarvitse rakentamisluvan saamiseksi eduskunnan periaatepäätöstä. (Partanen 2019, Hyvärinen 2019.)

Suomalais-ruotsalainen SECURE-projekti suunniteltiin alun perin jo 1970-luvulla ja sitä yritettiin mm. kaupata Helsingin kaukolämmityksen tuotantoon, mutta projekti kaatui poliittisiin päätöksiin. Tämä kapasiteetiltaan 200 MW_{th} passiivisesti turvallinen kaukolämpöreaktori olisi voitu rakentaa maan alle poistaen tarpeen laajoille turvavyöhykkeille. Viime vuosina tätä projektia on uudelleen nostettu potentiaaliseksi vaihtoehdoksi suunnittelun ”ajattomuuden” takia, minkä lisäksi pienillä nykyaikaistamiseen tähtäävillä modifioinneilla se olisi

huomattavasti helpompi projekti toteuttaa kuin vastaavanlaisen reaktorin suunnittelu täysin alusta alkaen. (Leppänen 2021, Partanen 2019.)

VTT:llä on myös oma vuonna 2020 startannut LDR-50-pienreaktoriprojekti, joka pyrkii kehittämään modulaarisen kaukolämpöreaktorin Suomen markkinoille. Nimensä mukaisesti reaktorin lämpöteho olisi 50 MW ja se tuottaisi lämpötilaltaan 65—120 °C asteista kaukolämpövettä. Reaktorin on tarkoitus hyödyntää alhaisia paine- ja lämpötilatasoja, passiivista turvallisuutta, ja konservatiivista teknologiaa, jolloin sen käyttö sopisi jo olemassa oleviin suomalaisiin ydinvoimaregulaatioon sekä ydinjätteen hävittämiskonseptiin. (Leppänen 2021, VTT 2021.)

Edellä esiteltyjen pääosin pohjoismaista osaamista ja suunnittelua hyödyntävien SMR-reaktoreiden lisäksi esimerkiksi Kiinassa on viime vuosina kehitelty ainakin kolmea erilaista pelkästään lämmöntuotantoon soveltuvaa SMR-reaktorityyppiä, jotka olisivat mahdollisesti valmiita ja tuotantokäytössä jo 2020-luvulla: NHR200-II (200 MW_{th}), HAPPY200 (200 MW_{th}), ja DHR400 (400 MW_{th}). Lisäksi kaukolämmön ja sähkön yhteistuotantoon soveltuvia SMR-reaktoreita on suunnitteilla rakennettaviksi mm. Yhdysvalloissa kuluva vuosikymmenen aikana. Etelä-Korealainen Doosan Enerbility on pitkällä omassa SMART-konseptissaan (330 MW_{th}) tehden yhteistyötä yhdysvaltalaisen NuScale SMR-projektin kanssa. (Partanen 2019, s.17-20, Doosan Enerbility 2022.)

4.3.7 SMR:n tulevaisuuden näkymät

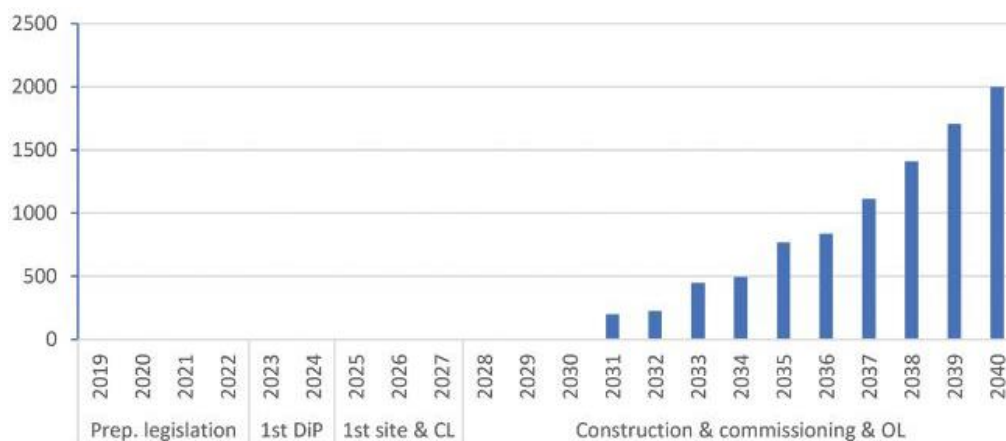
SMR:n ja kokonaisuudessaan ydinenergian käytön tulevaisuuden näkymille ensiarvoisen tärkeää oli ydinenergian sisällyttäminen Euroopan komission esitykseen EU:n taksonomiassa, joka ohjaa yksityistä rahoitusta ja sijoituksia kestävästä kehityksestä mukaisesti ja ilmastoneutraaliuteen tähtääviin (energia)ratkaisuihin. Komission esityksen mukaan ydinenergialla nähdään olevan roolia siirtymässä energiatehokkaaseen ja päästöttömään energiasektoriin, ja tämä esitys on myös linjassa EU:n ilmasto- ja ympäristötavoitteiden kanssa. (European Commission 2022.)

Muun muassa Bulgariassa, Kiinassa, Ruotsissa, Slovakiassa, Sveitsissä, Ukrainassa, Unkarissa ja Venäjällä ydinreaktoreita on jo käytetty lämmön ja sähkön yhteistuotannossa (Leppänen 2021). Globaalisti SMR-markkinoiden on arvioitu olevan vuositasolla 150 miljardia

Kanadan dollaria vuosien 2030 ja 2040 välillä, kyseisen arvion ollessa konservatiivinen (Canadian Small Modular Reactor Roadmap Steering Committee 2018, s.37). Suomessa SMR-tekniikalle nähdään ensisijaisesti olevan kahdenlaisia markkinoita: Suurimmat kaupungit (noin 6 kpl) voisivat hyödyntää yhtä tai useampaa isompaa, 200—400 MW_{th} pelkkää lämpöä tai CHP:ta tuottavia reaktoreita, ja noin 30—40 keskisuurta tai pienempää kaupunkia voisivat käyttää energiantuotannossaan pienempiä mikroreaktoreita, lämpötehoaan kymmeniä megawatteja (Partanen 2019, s.81).

SMR-kaukolämmön kohdalla suurin kysymys lienee, ehtiikö kyseisen tekniikan kehitys, luovuttaminen sekä rakentaminen mukaan energiajärjestelmän uusimiseen vaadittavaan nopeaan vauhtiin. Suomen kovat kansalliset hiilineutraaliustavoitteet eivät anna mahdollisuutta odottaa kauan SMR-reaktoreiden kehitystä ja käyttöönottoa. Ensimmäiseksi Suomessa tulisi muokata ydinenergiaan liittyvää lainsäädäntöä ottamaan paremmin huomioon SMR-reaktoreiden luvitus, lisensointi, valmistaminen ja sijoittelu. Seuraavaksi tulisi suunnitella oma modulaarinen ”FinReaktori” tms., tai hankkia jokin toinen valmis suunnitelma ja modifioida sitä paikallisiin olosuhteisiin ja lainsäädäntöön soveltuvaksi, minkä jälkeen kyseinen SMR-reaktori täytyisi lisensoida ja saada luvitettua sekä suunnitella valmistuslinja, joka olisi rakennuskapasiteetiltaan kyvykäs valmistamaan kolmesta viiteen SMR-reaktoria vuodessa noin vuonna 2030, ja viimeisenä valmistaa itse reaktori(t). Edellä mainittujen lisäksi vuoteen 2030 mennessä tuotantoketjujen tulisi olla kunnossa ja useamman laitoksen asennussijaintien rakentaminen ja valmistelu hyvässä vauhdissa. (Partanen 2019, s.60.)

Kuvassa 19 on havainnollistettu SMR-tekniikan kaupallistamisen vaiheita aikatauluineen. Vaiheet pitävät sisällään lainsäädäntöön tehtävät muutokset, ensimmäisen demonstraatiolaitoksen käyttöönoton ja sen kehittämisen tuotantovaiheeseen, sekä kaupallisten SMR-laitosten rakentamisen ja käyttöönoton. Kuvan 19 mukaan kaikki nämä vaiheet pitäen sisällään myös SMR-tuotannon kokonaiskapasiteetin kasvattamisen 2 GW_{th}:iin olisi tehtävä noin kahdessa vuosikymmenessä, jotta Suomi saisi täyden hyödyn SMR-tekniikan yleistymisestä ja kehityksestä sekä pystyisi saavuttamaan vaadittuja päästöjen vähennyksiä aikataulussa. (Partanen 2019.)



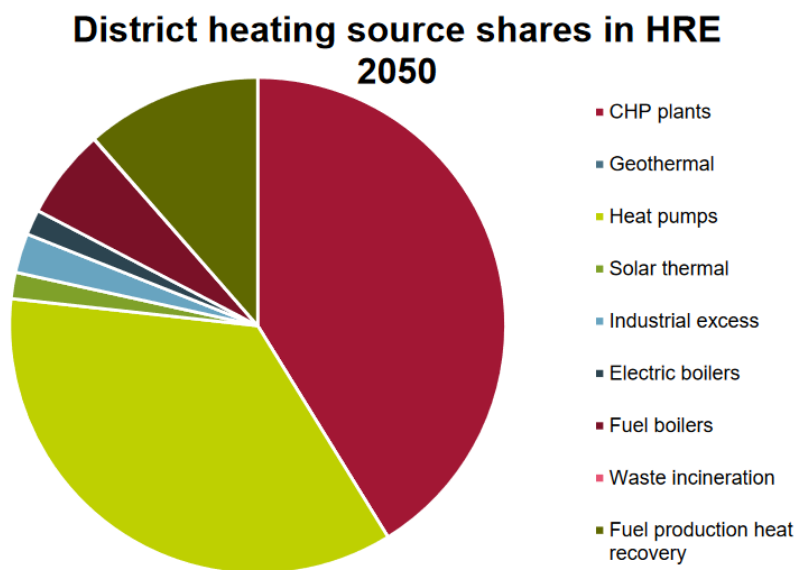
Kuva 19. Mahdollinen tiekartta eri vaiheineen kaukolämmön hiilineutraaliuden saavuttamiseen Suomessa vuoteen 2040 mennessä SMR-reaktoreita hyödyntäen, y-akselin kapasiteetin yksikkö on MW_{th} (Partanen 2019, s.61)

SMR:n kaupallistamisen ja energiantuotannossa hyödyntämisen suurimmat haasteet eivät liity niiden teknisiin, taloudellisiin, tai turvallisuuteen liittyviin ominaisuuksiin, vaan ne ovat ennemminkin poliittisia, lainsäädännöllisiä ja sääntelyllisiä, sekä ydinvoiman yleiseen hyväksyttävyyteen liittyviä esteitä (Partanen 2019, s.82). Jotta SMR-tekniikasta tulisi houkutteleva ja realistinen vaihtoehto kaukolämmön - ja yleensäkin energiantuotantoon, tulisi Suomen ydinenergiaan liittyvään lainsäädäntöön ja sääntelyyn tehdä muutoksia, joihin kuuluisi muun muassa tietynlaisen reaktorimallin tai useamman reaktorin lisensoinnin mahdollistaminen kerralla nykyisen systeemin sijaan, jossa on mahdollista myöntää vain yksi lisenssi yhtä reaktoria kohtaan. Lisäksi nykyisin STUK:n sääntelyn mukaisesti käytössä oleva ja suurille ydinvoimaloille tehty 5 km laajuinen hätävyöhyke olisi pienempien ja passiivisesti turvallisten SMR-reaktoreiden tapauksessa pienennettävissä vaarantamatta nykyistä turvallisuustasoa. Läheisempi sijainti asutukseen nähden mahdollistaisi myös SMR:n paremman hyödynnettävyyden kaukolämmön tuotannossa. (Partanen 2019, s.71.)

4.4 Lämmönlähteiden tulevaisuuden käyttö

Kaukolämmön tuotanto ja sen tulevaisuus on suuren muutoksen keskellä. Suuntaus on kohti uusiutuvia ja päästöttömiä, polttoon perustumattomia tuotantomuotoja, joita liitetään jo nyt osaksi kaukolämmön tuotantoa pyrkimyksenä päästä eroon esimerkiksi kivihilestä ja vähentämällä tarvetta bioenergian lisäämiselle. Kaukolämmön tuotantorakenteeseen kuuluvien lämmönlähteiden tarkkoja osuuksia on vielä vaikea arvioida esimerkiksi 20 tai 30 vuoden

päähän. Aiheesta on kuitenkin esitetty erilaisia arvioita, ja yksi vastaava kaukolämmön tuotantotapojen suhteellisia osuuksia kuvaava arvio on esitetty kuvassa 20. Kuten kuvasta 20 voidaan havaita, jakaisivat CHP-tuotanto ja lämpöpumput keskenään noin 75 % kaikesta kaukolämmön tuotannosta Suomessa vuonna 2050. Huomionarvoista kuitenkin on, että esimerkiksi edellisissä kappaleissa esiteltyä ydinvoimalla tuotettua kaukolämpöä ei tässä arvioissa ole mukana. Myös IRENA arvioi, että vuoteen 2050 mennessä sähköenergia tulisi kasvattamaan osuuttaan energian loppukäytössä nykyisestä (2018) 21 % osuudesta yli 50 %:iin, tarkoittaen sähkön avulla tuotetun lämmön osuudenkin kasvua (IRENA 2021).



Kuva 20. Heat Roadmap Europen (HRE) arvio Suomen kaukolämmön tuotantomuodoista vuonna 2050 (Paardekooper et al. 2018, s.21).

Kaukolämmön tuotannon päästöjen vähentämisen johdosta pääpaino tulevaisuuden kaukolämmöntuotannossa tulee olemaan polttoon perustumattomissa tuotantomuodoissa, joista erityisesti lämpöpumput ja niitä hyödyntävät lämmöntuotantomenetelmät ovat jo saavuttaneet markkinat ollen monesti kustannustehokkain tapa tuottaa kaukolämpöä ainakin tietyn osan vuodesta. Erilaiset hukkalämmönlähteet kasvattavat osuuttaan ja potentiaalisia kohteita etsitään jatkuvasti lisää. Luonnon omien lämmönlähteiden, kuten geolämmön ja vesistöjen lämmön, merkittävästi nykyistä laajempi hyödyntäminen riippuu erityisesti kaukolämpöverkostojen kehityksestä esimerkiksi käytettävien lämpötilojen osalta, sekä kyseisten kohteiden teknoekonomisesta kyvykkyydestä. Aurinkolämpö jäänee Suomessa melko pieneen rooliin kokonaistuotantoa tarkastellessa, mutta paikallisesti sillä voi olla suurempaa merkitystä ja etenkin kesäajan pohjakuormaa sillä pystytään kattamaan.

Sähkön tarpeen lisääntyessä ja toisaalta tasaisen lämmön peruskuorman tuotannon varmistamisessa bioenergiaan perustuva CHP-tuotanto tulee säilyttämään Suomessa vakaan aseman, ja pidemmällä tähtäimellä tätä tukee pyrkimys hiilinegatiivisuuteen hiilidioksidin talteenottoa hyödyntämällä. Bioenergian rinnalle osana peruskuormatuotantoa voi hyvinkin seuraavien noin 10—20 vuoden sisällä liittyä pienet modulaariset ydinreaktorit joko pelkällä lämmön tai sähkön ja lämmön yhteistuotannolla.

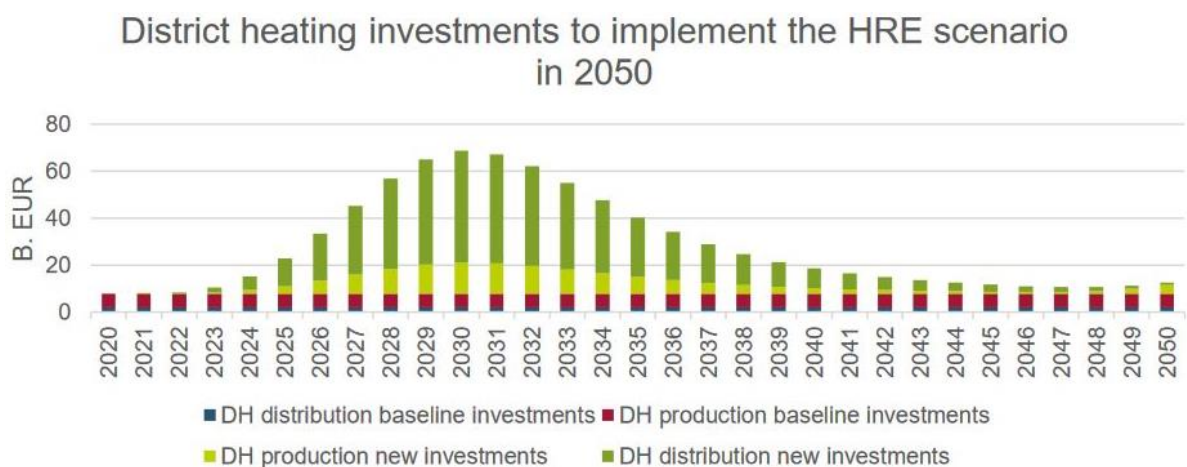
Noin puolet Suomen kaukolämmön tuotannosta tehdään fossiilisia polttoaineita ja turvetta käyttäen, ja melkein koko tämä määrä olisi korvattavissa SMR-ydinreaktoreiden tuotannolla. Tällä olisi vaikutusta myös bioenergian käytön osalta, sillä silloin bioenergian käyttöä ja tuontia ei tarvitsisi lisätä korvaamaan loppuja fossiilisia polttoaineita. Lisäksi osa nykyisin energiaksi käytetystä biomassasta vapautuisi muuhun käyttöön, kuten esimerkiksi kehittyneiden biopolttoaineiden, biohiilen, ja kemianteollisuuden tuotannon raaka-aineiksi. Bioenergian käyttö kuitenkin jatkuisi SMR-reaktoreiden lanseerauksesta huolimatta osana kaukolämpöverkkojen tuotantoa hyvän paikallisen saatavuuden takia sekä talven aikaisen huipputehontarpeen takaajana. (Partanen 2019, s.81.)

Fossiilisten polttoaineiden käyttö laskee minimiin, niiden osuuden kattaessa korkeintaan osan huippu- ja varatuotannosta. Suomen, kuten koko Euroopan muuttuva geopoliittinen tilanne tulee nopeuttamaan energiaomavaraisuuden lisäämistä uusiutuvilla, vaihtoehtoisilla energiamuodoilla yhdessä jo aiemmin päätettyjen päästötavoitteiden ohella. Fossiilisten lisäksi turve tulee toistaiseksi sisällyttämään jo aiemmin mainittuun osuuteen huippu- ja varatuotannon takaajana. Jätteiden poltto on perinteisesti ollut lämmöntuotannossa kannattavaa, mutta jätteiden energiakäyttö on kestävä kehitystä tavoiteltaessa arvojärjestyksessä viimeisten vaihtoehtojen joukossa, joten kestävämpään kiertotalouteen siirryttäessä sen osuus tulee laskemaan.

Vetytalous ja vetyyn perustuva lämmöntuotanto lienee vielä kaikkein kaukaisin toteutuakseen tässä työssä esitellyistä tuotantomuodoista. Kuinka suuren osan se tulee korvaamaan nykyisestä tuotannosta ja etenkin millä aikataululla on vielä vaikea arvioida, mutta vetyä pidetään yleisesti selkeänä tulevaisuuden energianlähteenä. Kaikkien edellä esiteltujen lisäksi on vielä mahdollista, että seuraavien 20—30 vuoden aikana saavutetaan muita energiateknologisia läpimurtoja (esim. fuusioreaktorit), jotka tuovat saatavillemme täysin uusia lämmöntuotannon mahdollisuuksia.

5 KAUKOLÄMPÖ 2030—2050

Kaukolämmitys nähdään osana eurooppalaisen energiatehokkuuden kehittämistä ja energia-sektorin päästöjen vähentämistä. Esimerkiksi Heat Roadmap European tutkimusten mukaan älykkäällä energijärjestelmällä, joka sisältää 50 % kaukolämmitystä ja lisäksi sektori-integraatiota, saavutetaan hyötysuhteeltaan parempi järjestelmä sekä suurempi uusiutuvan energian osuus pienemmillä kustannuksilla, kuin jos sama toteutettaisiin hajautetulla rakennuskohtaisella järjestelmällä ja perinteisillä lämmitystavoilla. Kyseisellä tavalla toteutetulla järjestelmällä saavutettaisiin CO₂-päästöjen vähentyminen 85 %:lla vuoden 1990 tasosta sekä 13 % pienempi primäärienergian tarve verrattuna “tyypilliseen vähähiiliseen” skenaarioon vuoteen 2050 mennessä. Kaukolämpöverkoista tulisi tehdä muuhun energijärjestelmään integroitu osa. Tätä sektori-integraatiota tukisivat aiemminkin mainitut keinot, kuten esimerkiksi vaihtelevan ja uusiutuvan sähkön tuotantoa täydentävä CHP-tuotanto, hukka- ja jäte- lämpöjen hyödyntäminen eri teollisuuden ja palveluiden sektoreista, sekä sähköllä tuotettava kaukolämmitys lämpöpumppujen ja sähkökattiloiden avulla uusiutuvan sähkön ylituotannon aikana. Energiatehokkaiden ja edellä esitettyjen tavoitteiden mahdollistavien kaukolämpöverkostojen olisi oltava lämpötiheydeltään riittävän korkeita, niissä täytyisi olla toimivat ja älykkäät säätö- ja ohjausjärjestelmät, sekä käytettyjen putkistomateriaalien oltava korkealaatuisesti eristettyjä. Tuotanto-ohjautuvasta järjestelmästä kysyntäpainotteisempaan (esim. kysyntäjousto) siirtyminen automaatiikkaa hyödyntäen toisi myös parannuksia lämmönsiirron ja -jakelun energiatehokkuuteen. (Mathiesen et al. 2019, s.5-6.)



Kuva 21. Arvio kaukolämpöjärjestelmiin vaadittujen investointien jakaumasta saavuttaen HRE 2050 -skenaariota tavoitteet (Mathiesen et al. 2019, s.8).

Kuvassa 21 on esitetty Heat Roadmap Europan arvio Euroopan tasolla tehtävien kaukolämpöinvestointien määrästä miljardeissa euroissa ja niiden jakaumasta kohti HRE-skenaariota vuoteen 2050. Kuten kuvasta havaitaan, kaukolämpöjärjestelmiin vaadittavien investointien huippu tulisi olemaan vuonna 2030 ja skenaarion implementoinnin kannalta tätä vuotta edeltävien sekä jälkeisten 5 vuoden jaksojen voidaan katsoa olevan myös erittäin merkittäviä. Eurooppalainen kaukolämmitys tarvitsee siis muutaman vuoden sisällä aivan uudessa mittakaavassa investointeja verrattuna nykytilanteeseen.

5.1 Uusiutuvan kaukolämmön ajurit

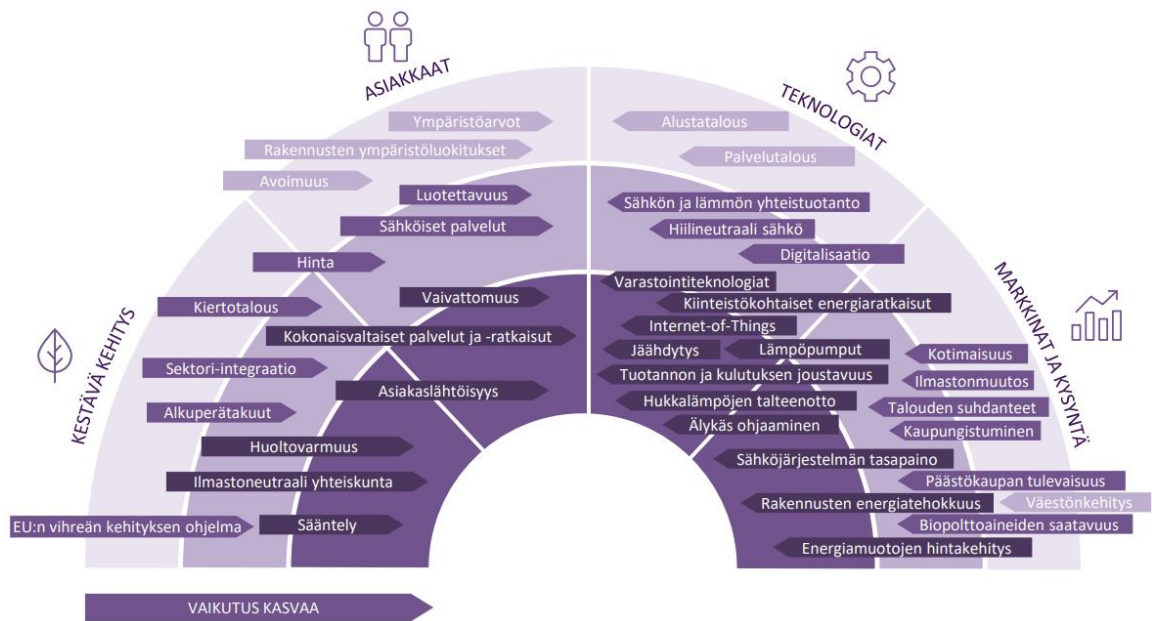
Uusiutuvan kaukolämpöenergian tuotannolla voidaan nähdä olevan monenlaisia hyötyjä. Uusiutuvien ja hiilineutraalien energiamuotojen käyttö tuo ympäristöllisiä etuja vähentyneiden kasvihuonepäästöjen ja ilmansaasteiden muodossa, sekä puhtaan veden säästöjä kaukolämpöveden kierrättämisen ansiosta. Kaukolämmityksellä on mahdollista saavuttaa nopea ja kustannustehokas hiilidioksidipäästöjen vähentäminen hyödyntäen jo olemassa olevaa infrastruktuuria ja suurta kokoluokkaa paikallisissa energiajärjestelmissä, sekä lämmön kysyntäprofiileja pystytään tasoittamaan tuotannoltaan ja jakelultaan optimoidun kaukolämmön avulla. Urbanissa ja rakennustiheydeltään suuressa ympäristössä sillä on etu tilankäytön suhteen, sekä lisääntyvän automaation ja etäohjauksen vuoksi kaukolämmitystä voidaan integroida kaupunkien muihin toimintoihin kiertotaloutta mukaillen. Osana kokonaisenergiantuotantoa tarkasteltuna uusiutuvan kaukolämmön tuotanto lisää kaukolämpöjärjestelmän kyvykkyyttä tasapainottaa sähköverkon tuotannon ja kulutuksen vaihteluita. Sektorien välisiä hyötyjä syntyy sähköverkon lisäksi esimerkiksi metsätalouden, jätesektorin, sekä paikallisen talouden välille työllisyyden ja infrastruktuurin kehityksen muodossa. Lisäksi monipuolinen uusiutuvan kaukolämmön tuotanto parantaa energian hintavakautta sekä energiaomavaraisuutta ja täten huoltovarmuutta. Lukuun ottamatta biomassan käyttöä varauksella, uusiutuvat energialähteet tukevat paikallisten resurssien hyödyntämistä sekä polttoon perustumattomia teknologioita. Hiilineutraalien teknologioiden saatavuuden parantuminen ja sitä myötä niillä tuotetun energian hinnan madaltuminen voidaan nähdä poliittisen vaikuttamisen ohella pääajurina perinteiselle fossiilisten polttoaineiden hallitsemalle energiajärjestelmälle (Rinne et al. 2018). (IRENA 2017, s.12,14.)

Kaukolämpöverkkoa on käytännössä kannattavaa rakentaa vain asukastiheydeltään riittävän tiheille alueille. Synergiaetuina uusiutuvan kaukolämmön ja urbaanin ympäristön välillä voidaan nähdä integraatio asuin-, toimisto-, ja liiketilarakennuksien kanssa sekä yhdistetyn lämmityksen ja jäähdytyksen tuotannon muodossa, jolloin järjestelmästä saadaan ympärivuotisesti hyötyä. Digitalisaation ja automaation avulla kaukolämmön tuotannon ja kulutuskohteiden välillä on mahdollista toteuttaa kysyntäjoustoa sekä muuta tuotannon optimointia. Keskitetyn kaukolämmön tuotannon avulla vältetään hajautettua tuotantoa, ja toteuttamalla se uusiutuvilla energialähteillä voidaan lisätä paikallista ja poliittista hyväksyntää tuotantolaitosten läheisestä sijainnista kaupunkeihin nähden. Yhdistämällä kaukolämpöverkot ja urbaani ympäristö saavutetaan pienempi ominaisenergiankulutus, ja uusiutuvilla tuotetulla kaukolämmöllä lisäksi pienempi hiilijalanjälki. (IRENA 2017, s.14.)

5.1.1 Suomessa

Suomen hallitus on linjannut Pariisin ilmastopöytäkirjaan pohjaten maan olevan hiilineutraali vuonna 2035, keinoina muun muassa lähes päästöttömän sähkön- ja lämmöntuotannon saavuttaminen 2030-luvun loppuun mennessä (Ympäristöministeriö 2021). Energia-ala taas puolestaan on sitoutunut puolittamaan kaukolämmön ja sen kanssa yhteistuotetun sähkön tuotannosta aiheutuvat päästöt vuoden 1990 tasosta vuoteen 2030 mennessä (Energiateollisuus ry 2021c). Kaukolämmityksen osuus Suomen hiilidioksidipäästöistä vuonna 2020 oli vajaa 10 %. Tämä tarkoittaa sitä, että myös kaukolämmön tuotannon hiilidioksidipäästöjä tulee vähentää osana hiilineutraaliuden tavoittelua. Yhden vuoden aikajaksolla tämä päästövähennys osuu merkittävimmin talvella käytettävään lämmön huippu- ja perustuotannon kapasiteetteihin johtuen vuodenajan selkeästi suuremmasta lämmityksen tarpeesta. Kesällä kaupunkien lämmityksen toteuttaminen hiilineutraalisti ei ole ongelma (Tampereen sähkölaitos Oy 2021).

Energiateollisuus ry:n (2020) julkaisema Kansallinen kaukolämpöalan strategia 2030 summaa yhteen muun muassa kaukolämpöalaan kohdistuvia muutosajureita vuoteen 2030 mennessä, jotka ovat esitettyinä kuvassa 22.



Kuva 22. Kaukolämpöalan muutosajurit Suomessa vuoteen mennessä 2030 (Energiateollisuus ry 2020).

Muutosajurit voidaan kuvan 22 mukaan jakaa karkeasti neljään eri kategoriaan: Kestävää kehitystä, kaukolämmityksen asiakkaita, kaukolämpöteknologioita, sekä markkinoita ja kysyntää koskeviin ajureihin. Kestävää kehitystä tukevia ajureita ovat esimerkiksi ilmastoneutraalin yhteiskunnan tavoittelu ja siihen liittyvä sääntely sekä Suomen, että EU:n tasolla, kaukolämpöenergian alkuperätakuiden myöntäminen lämpöyhtiöille, sekä kiertotalouden mukainen muuten hukkaan menevän energian hyödyntäminen erilaisista materiaalivirroista. Kaukolämmön kuluttajien kautta tulevat ajurit ja vaatimukset pitävät sisällään mm. Asiakaslähtöisyyden ja kokonaisvaltaiset palvelumallit, kaukolämmön hinnoittelun, sekä ympäristöarvojen huomioimisen. Teknologiset muutosajurit liittyvät mm. hiilineutraaliin lämmön tuotantoon, hukkalämpöjen hyödyntämiseen ja lämpöpumppeihin, lämmön varastointiteknologioihin, sekä digitalisaatioon ja älykkäaseen ohjaukseen perustuvan lämmöntuotannon operoinnin pitäen sisällään myös IoT:n ja kysyntäjouston. Taloudellisen puolen eli kaukolämmön markkinoita ja kysyntää koskevia ajureita ovat mm. rakennusten parantuva energiatehokkuus, energiamuotojen hintojen ja saatavuuden kehitys päästökaupan kehityksen ohella, energiajärjestelmän tasapainottaminen kokonaisuutena esimerkiksi uusiutuvan vaihtelevan sähköntuotannon osalta, ja viimeisimpänä suurena muutosta aiheuttavana tekijänä maailman geopoliittisen tilanteen muutokset. (Energiateollisuus ry 2020.)

5.1.2 EU:ssa

EU:n hiilineutraaliustavoitteeseen pohjautuva Uusiutuvan energian direktiivi RED luo kannusteita EU-maille ottaa käyttöön hyötysuhteeltaan parempia ja uusiutuvia kaukolämmön tuotantomuotoja mahdollistamalla kaukolämpöasiakkaille oikeuden irtautua sellaisesta kaukolämpöverkosta, jossa lämpöä tuotetaan ympäristöä kuormittavalla tavalla (Bioenergy Europe 2018, s. 68). Kaukolämpöverkosta irtautumisen jälkeen lämmönkuluttajat voivat alkaa tuottamaan kuluttamansa lämmön itse uusiutuvilla energianlähteillä. Esimerkiksi Suomessa tällä on ollut vaikutusta muun muassa talokohtaisten maalämpöenergiaa hyödyntävien lämpöpumppuratkaisujen lisääntymisessä. (Euroopan Unionin virallinen lehti 2018.)

Suurimassa osassa EU-maita lämmityksen ja jäähdytyksen aiheuttamille hiilipäästöille ei ole hintaa sillä EU:n päästökauppa-alue (EU ETS) kattaa vain yli 20 MW suuriset laitokset. Niissä maissa, joissa kaukolämpöä ei ole, lämmöntuotanto tapahtuu yleensä pienillä ja hajautetuilla, alle 20 MW lämpölaitoksilla, tai rakennuskohtaisilla lämpökattiloilla ja -pumpuilla. Jäsenmaat, joissa biolämmöllä on suuri osuus, hyödyntävät joko laajasti kaukolämpöverkostoa lämmöntuotannossaan ja/tai ovat ottaneet käyttöön hiiliverot lämmöntuotannon hiilidioksidipäästöille, kuten esimerkiksi Suomessa ja Ruotsissa. Suurimmat prosentuaaliset osuudet bioenergiaa omassa kaukolämmön tuotannossaan omaavat EU-maat ovat Suomi, Tanska, Viro, Liettua, ja Ruotsi, joilla kaikilla tämä osuus on yli 30 %. (Bioenergy Europe 2018, s.72,76.)

Euroopan Komission heinäkuussa 2021 julkaisema RED II -direktiiviä täydentävä lainsäädäntöpaketti, ”Fit for 55”, pitää sisällään suunnitelman laajentaa päästökauppa koskemaan myös uusia aloja kuten lämmitystä. Nimensä mukaisesti uuden paketin tavoitteena on vähentää päästöjä vähintään 55 % vuoteen 2030 mennessä vuoden 1990 tasosta. Tämä vaikuttaa lämmöntuotannossa käytettyihin energialähteisiin ja ainakin lyhyemmällä aikavälillä myös energian hintaan nostavasti. Toisaalta päästökaupan laajentaminen lämmityssektorille edesauttaa päästövähennyksiin pääsemistä ja nopeuttaa kaukolämpösektorinkin uudistamista. (Energiateollisuus ry 2021d.)

Muissa Pohjoismaissa kaukolämmitystä on priorisoitu rakennuskohtaiseen lämmitykseen verrattuna tukemalla mm. kaukolämmön kannattavuutta sähkönsiirron hinnoittelulla sekä sähköveron alentamisella esimerkiksi konesalien tapauksessa Ruotsissa Tukholman alueella, jossa datakeskuksien ja konesalien suuren keskittymän vuoksi niistä syntyvää hukkalämpöä

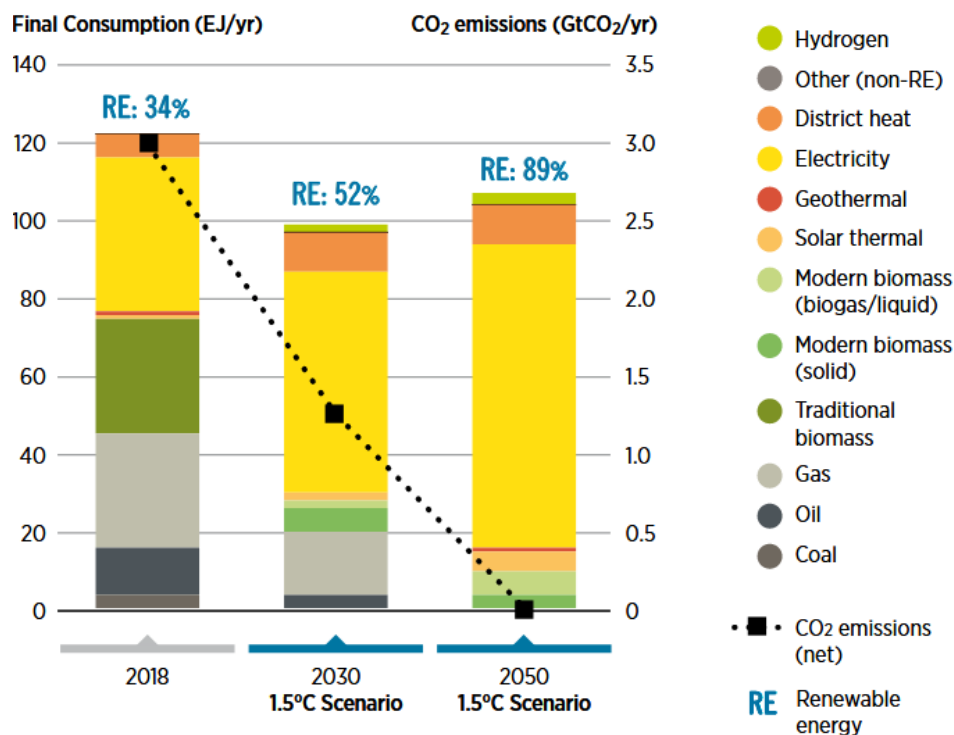
saadaan hyödynnettyä suuria määriä kaukolämmöntuotannossa. Sähköön perustuva kaukolämmön tuotanto ja siihen liittyvät investoinnit ovat kokonaisuudessaan muissa Pohjoismaissa Suomea pidemmällä johtuen suuremmasta määrästä uusiutuvaa sähköntuotantoa, kuten esimerkiksi Tanskassa tuulivoiman tuotanto, sekä alhaisemmasta sähkön kokonaishinnasta esimerkiksi Ruotsissa ja Norjassa (Joronen et al. 2021, s.58).

5.1.3 Maailmalla

Kaukolämmön rooli on vaihteleva eri maissa, ja esimerkiksi institutionaaliset ja historialliset tekijät näyttävän vaikuttaneen sen käyttöön enemmän kuin vallitsevat ilmasto-olosuhteet. Esimerkiksi Tanskassa, jossa aiemmin oli pakollista liittyä kaukolämpöverkkoon, kaukolämmön osuus kokonaislämmöntarpeesta oli 51 % ja Puolassa 34 % vuonna 2017. Kiina on lisännyt viime vuosina runsaasti keskitettyä lämmöntuotantoa maan pohjoisosissa. (IRENA 2017, s.12.)

Maailmalla uusiutuvaa kaukolämpöä tuotetaan pääasiassa biomassalla. Esimerkiksi Tanskassa ja Sveitsissä uusiutuvalla energialla tuotetun kaukolämmön osuudet vuonna 2017 olivat 42 % ja 40 %. Suurin osa kaukolämmöstä maailmalla tuotetaan CHP-laitoksissa, esimerkiksi Saksassa yhdistetty lämmön ja sähkön tuotanto kattaa noin 90 % kaukolämmön tuotannosta. Fossiiliset polttoaineet ovat vielä merkittävässä roolissa kaukolämmön tuotannossa maailmalla. Merkittäviä hiilen käyttäjämaita ovat mm. Kiina, Puola ja Saksa. Myös polttoöljyä ja maakaasua käytetään kaukolämmön tuotannossa, esimerkiksi suurin osa Keski- ja Etelä-Euroopasta lämpiää maakaasulla. Euroopan ulkopuolella esimerkiksi USA ja Japani käyttävät suurimpaan osaan kaukolämmöntuotannostaan polttoaineenaan maakaasua. (IRENA 2017, s.12.)

Kuva 23 IRENA:n (2021) raportista esittää, miten rakennusten energiankulutus ja CO₂-päästöt tulisivat kehittymään maailmalla vuodesta 2018 vuosiin 2030 ja 2050 pitäen maapallon keskilämpötilan nousun korkeintaan 1,5 °C asteessa, ja millaisilla tavoilla tämä energiantarve tultaisiin täyttämään.



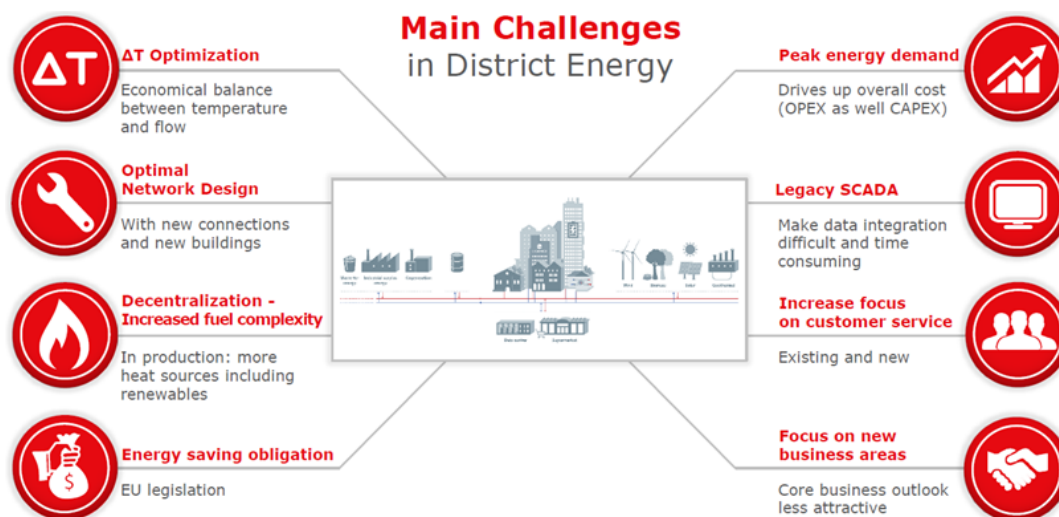
Kuva 23. Globaali rakennusten energian kokonaiskulutus ja sen jaottelu energialähteittäin, CO₂-päästöjen kehitys, sekä uusiutuvan energian osuuden muutokset IRENAN 1,5 °C skenaariossa (IRENA 2021, s.286).

Kuvasta 23 nähdään, että globaali kaukolämmön osuus noin tuplaantuisi vuodesta 2018 vuoteen 2030. Vuodesta 2030 vuoteen 2050 kaukolämmityksen määrän muutokseen ei ole esitetty merkittäviä eroja, mutta käytännössä kaupungistuminen sekä tarve energiatehokkaille kokonaisratkaisuille lisäävät merkittävästi tarvetta kaukolämmölle. Samassa raportissa enustetaan, että uusiutuviin perustuvaa kaukolämmön tuotantoa tullaan kasvattamaan 0,4 EJ (2018) ensin 4,2 EJ (2030) aina 7,3 EJ asti (2050) muun muassa modernin ja ilmaston kannalta kestävän biomassan sekä lämpöpumppujen avulla. (IRENA 2021, s.289.)

5.2 Kaukolämmön kehityksen haasteita

Monesti samat kaukolämpöä ja sen tulevaisuutta koskevat kehityssuunnat ja teknologiat voivat sisältää sekä haasteita, että mahdollisuuksia, riippuen kenen näkökulmalta asiaa käsitellään. Kaukolämmön päähaasteita kuvan 24 mukaan tulevat olemaan kaukolämpöverkostojen suunnittelu, jäähtymän eli ΔT :n optimointi, hajautettu energiantuotanto, huippulämmöntarpeeseen vastaaminen ja huipputuotannon kustannusten minimoiminen erityisesti uusia

lämmönlähteitä käyttöön otettaessa, datan integrointi ja hyödyntäminen älykkäissä järjestelmissä sekä eri tietomallien toimivuus suuressa mittakaavassa, lainsäädäntö ennen kaikkea EU:n tasolla, uusien kannattavien bisnesmallien luominen, sekä asiakaspalvelun laajentaminen ja kehittäminen. (Danfoss 2022.)



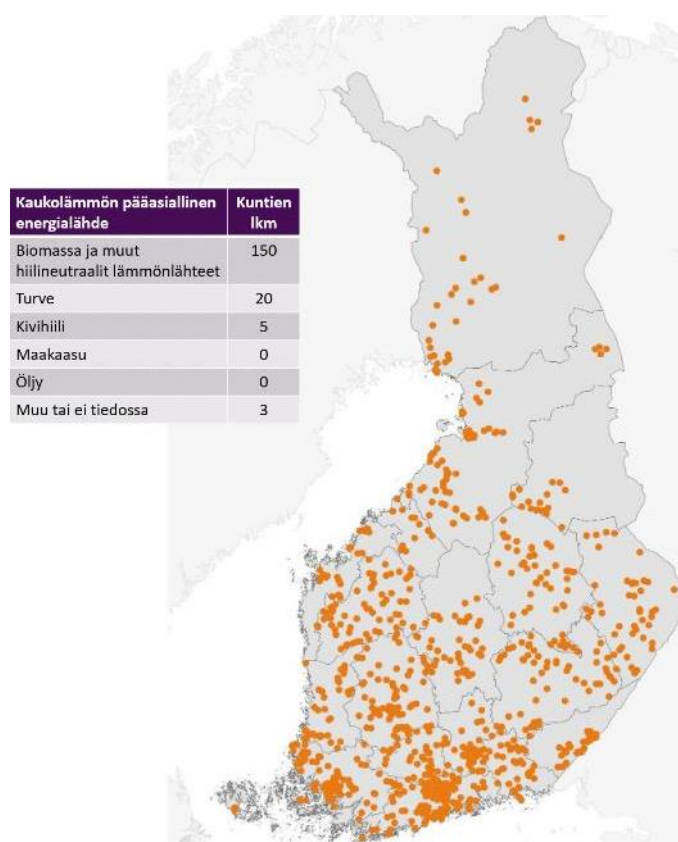
Kuva 24. Kaukolämpöalaan kohdistuvat päähaasteet (Danfoss 2022).

5.2.1 Yhteiskunnalliset haasteet

Lämpöpumppujen laajempi teollinen käyttö kaukolämpöjärjestelmässä voi olla uhattuna, mikäli esimerkiksi lait, rakennusmääräykset ja tuet kannustavat rakennuttajat ja kiinteistöjen omistajat investoimaan pienempiin rakennuskohtaisiin lämpöpumppuihin tms. kiinteistökohtaisiin energiantuotantoihin. Kiinteistökohtaiset ratkaisut johtavat helposti energiajärjestelmän osaoptimointiin vähentäen lämpöpumpuista saatavilla olevien hyötyjen realisointia sekä lisäksi kasvihuonepäästöjä kaukolämmityksen kautta, kun huippulämmöntarpeen aikaan lämpöä joudutaan tuottamaan polttoon perustuvalla säätökapasiteetilla kuten maakaasulla. Myös suuria hukkalämmön lähteitä jää tällöin kaukolämpöverkkoon hyödyntämättä, jolloin ne ympäristöön päästettäessä kuormittavat luontoa. (VALOR Partners Oy 2016.)

Kaukolämmön käyttäjien ja kansalaisten tiedonpuute kaukolämpöä ja sen uudistumista kohtaan voi aiheuttaa haasteita kaukolämmön kehitykselle ja hyväksyttävyydelle. Huolimatta viime vuosien aikana käynnistyneestä muutoksesta kaukolämmön imagokuva voi näyttäytyä kansalaisten mielissä yhä fossiilisena ja saastuttavana lämmön tuotantona, mikä voi vääristää sen kilpailukykyä muihin lämmöntuotantomuotoihin verrattuna. (Paiho & Saastamoinen

2018). Kuitenkin jo nykyään noin 43 % Suomen kaukolämmöstä tuotetaan uusiutuvilla energiamuodoilla ja kuten kuva 25 havainnollistaa, suurin osa (noin 84 %) suomalaisista kaukolämpöä hyödyntävistä kunnista käytti vuonna 2020 päälämmönlähteenään kaukolämmön tuotannossa biomassaa ja muita hiilineutraaleja lämmönlähteitä. Toisaalta Suomessa oli vuonna 2020 vain 5 kaupunkia, jotka tuottivat kaukolämpönsä pääasiallisesti fossiilisilla polttoaineilla (kivihiili), mutta niiden yhteenlaskettu kaukolämpötehokapasiteetti sekä osuus Suomen kaukolämpötuotannon päästöistä olivat kuitenkin merkittäviä.



Kuva 25. Suomen kaukolämmön tuotantoyksiköt (oranssit pallot) ja kaukolämmön tuotannon päälämmönlähteet perustuotannossa kunnittain taulukoituna vuonna 2020 (Energiateollisuus 2022).

Kuva 25 kuvastaa myös Suomen sisäistä kaukolämmön tuotannon jakautumista ja kaukolämmön tuotantopisteiden sijaintia. Kivihiili on käytössä pääasiallisena kaukolämmön energianlähteenä enää vain suurimmissa etelärannikolla sijaitsevilla järjestelmissä, turpeen taas ollessa käytetyin Länsi- ja Pohjois-Suomessa. Biomassaa muiden hiilineutraaleiden lämmönlähteiden ohella käytetään ympäri maata, mutta eniten metsäteollisuutta sisältävillä alueilla.

Kaukolämmön imagon lisäksi kiristynvä kilpailu kuluttajille tarjolla olevien lämmönlähteiden välillä aiheuttaa haasteita kaukolämmölle ja seuraavaan sukupolveen kuuluvien lämmönlähteiden laajamittaiselle käyttöönotolle. Yhteiskunnalliset tuet ja kannustimet yksityiseen lämmöntuotantoon siirtymiselle ovat vieneet pois osan kaukolämpöasiakkaista ja lisäksi saaneet monet nykyisetkin asiakkaat pohtimaan vaihtoehtoisia lämmitysratkaisuja. (Paiho & Saastamoinen 2018.)

Palveluntarjonnan piiriin voisi tulevaisuudessa lisätä nykyisin lämmönkuluttajan vastuulla olevan kiinteistöön sijoitetun kaukolämmön sekundääripuolen operointi- ja huoltopalvelut. Sekundääripiiriin oikeanlainen toimivuus voi olla uhattuna erityisesti tulevaisuuden älykkäässä ja kaksisuuntaisessa kaukolämpöverkossa, mikäli kiinteistöjen omistajilla tai kunnossapitäjillä ei ole riittävää tietotaitoa laitteistojen huollosta, kunnossapidosta, sekä säätämisestä. (Paiho & Saastamoinen 2018.)

Kaukolämpöyhtiöiden omistajapolitiikassa kunnan ja useassa tapauksessa kunnan omistaman kaukolämpöyhtiön edut ovat monesti ristiriidassa, sillä kaukolämpöliiketoiminnan kehittämiseen ei panosteta tai ei ole käytettävissä riittävästi resursseja. Kaukolämpöä ei myöskään nähdä kunnan toimesta välttämättä bisneksenä, vaan sen tuottamisen katsotaan kuuluvan kunnan tarjoamiin perushyödykkeisiin. Monissa paikoin kunta toimii sekä lämmön päätuottajana omistamansa kaukolämpöyhtiön toimesta, että myös yhtenä lämmön pääkuluttajista kunnan omistamien julkisten rakennusten kautta. Tällöin kaukolämpöverkkoon tehtävät suuremman mittakaavan muutokset voivat aiheuttaa ristiriitoja kunnan omistus- ja hallintopolitiikassa. (Paiho & Saastamoinen 2018.)

Yleisesti ottaen kaukolämpöön liittyvän sääntelyn mahdollinen lisääntyminen, poliittisen ilmapiirin muuttuminen, sekä kaukolämmön mahdollisuuksien rajaaminen tai jo pelkästään sen uhka tulevaisuudessa johtuen esimerkiksi kansallisesta lainsäätelystä, kansainvälisistä sopimuksista ja vaalikausien vaihtumisesta, voivat kaikki osaltaan vähentää tai viivästyttää osakkeenomistajien ja kaukolämpöyhtiöiden halukkuutta investoida tulevaisuuden kaukolämpöön aiheuttaen täten haasteita kaukolämmön hiilineutraalille kehitykselle. Toisaalta taas monet suomalaiset kaupungit ovat viime vuosien aikana ottaneet hiilineutraalisuuteen tähtäävät tavoitteet tarkasteluihinsa ja nykyään kaupunkien omat hiilineutraalius-aikataulut ovat monin paikoin Suomen valtion linjausta edellä.

5.2.2 Teknologiset haasteet

Uudet uusiutuviin energialähteisiin perustuvat kaukolämmön tuotantomuodot monimutkaiset ja hajauttavat kaukolämpöverkostoa, toisin sanoen niiden myötä osa kaukolämmön tuotannosta siirtyy keskitetyistä CHP-laitoksista hajautettuun lämmön erillistuotantoon. Relevantteja kysymyksiä tässä transitiossa ovat muun muassa, miten käy kaukolämmön laadunvarmistuksen, monitoroinnin ja toimitusvarmuuden? Kuinka hyvin sektori-integraatio sähköverkon kanssa pystytään toteuttamaan suuremmalla määrällä hajautettua ja sähköntuotantoon sitomattomalla lämmöntuotannolla? Miten käy prosuumereiden eli kaukolämpöverkkoon lämpöä sekä tuottavien, että kuluttavien tahojen verkkoon tuottaman lämmön kanssa, nouseeko esimerkiksi tällöin heidän tuottaman lämmön laatuvaatimukset? Riittääkö osajia uuden kaukolämpösukupolven, siihen kytkettävien uusiutuvien lämmönlähteiden, sekä digitaalisten järjestelmien kehitykseen, käyttöön ja hallintaan? (Paiho & Saastamoinen 2018.)

Uusiutuvia lämmönlähteitä kaukolämpöverkkoon lisättäessä ja erityisesti hiilineutraaliin lämmöntuotantoon pyrittäessä eri tuotantomuotojen skaalautuvuus ja hyötysuhteet korostuvat. Haasteita voi myös tuottaa maankäytöllisen tehokkuuden rajoissa pysyminen tiiviissä ja rakennetussa kaupunkiympäristössä, esimerkiksi geolämpöjärjestelmien ja aurinkokeräimien hyvällä hyötysuhteella toimiakseen vaatimat pinta-alat voivat olla ongelmallisia toteuttaa. Talous, käytetty tekniikka ja lainsäädäntö vaikuttavat siihen, että kaikilla uusilla tai suunnitelluilla lämmönlähteillä ei pystytä suoraan tuottamaan nykyisissä kaukolämpöverkoissa vaadittavaa menoveden lämpötilaa, vaan tämä tuotetun lämmön lämpötila vaihtelee. Tämä vaatii joko mittavia investointeja ja kaukolämpöverkon uudistamista matalalämpötilaverkoksi, tai näiden matalamman lämpötilan lämmönlähteiden priimaamista eli lämpötilan kohottamista jollain toisella lämmönlähteellä nykyverkkoon sopivaksi. Toisaalta huonoin, matalin tai vaihtelevin lämmönlähde ei voi määritellä koko kaukolämpöverkon toimintaa ja sen investointien tarvetta. Kaukolämmön ja yksityisten lämmön tuotantomuotojen monipuolistuminen, sekä kuluttaja- ja kiinteistökohtaisten hybridijärjestelmien lisääntyminen vaikeuttavat kaikki osaltaan kaukolämmön tuotannon ja kulutuksen tasapainottamista. (Paiho & Saastamoinen 2018.)

Kaukolämmön seuraavan sukupolven mahdollistavien digitaalisten järjestelmien toimivuuden ja huollon pitkäjänteinen varmistaminen ovat avainasioita siirtymälle. Järjestelmien

jatkuva päivittäminen mm. tietoturvallisuuden takia voi vaikeuttaa kaukolämpöverkon eri osien operointia ja aiheuttaa haasteita datan hyödyntämiselle, ellei yhteistä ja tietoa tarvitseville osapuolille saatavilla olevaa dataohjautuvaa järjestelmää ole käytössä. Kaukolämpöverkoista, siihen lämpöä tuottavista laitoksista ja laitteista, sekä lämmönkuluttajista saatavaa dataa on kyettävä käsittelemään ja erityisesti prosessoimaan hyödylliseen sekä käyttökelpoiseen muotoon. Myöskin datan siirto ja saatavuus kaikille sitä tarvitseville, erityisesti lämmönkuluttajan ja -tuottajan välisessä rajapinnassa, voi muodostua ongelmaksi. Tietoturvalisuus ja erilaiset kyberuhkat ovat vallitsevia aihepiirejä jo nykyajan informaatioyhteiskunnassa, ja ne tulevat koskettamaan lisääntyvissä määrin myös kaukolämpöä tulevaisuudessa. (Paiho & Saastamoinen 2018.)

Sähkön kulutus kasvaa ja sen kasvu tulee voimistumaan tulevien vuosikymmenten aikana, kun esimerkiksi sähköinen tiedonkulku, sähköistytvä liikenne ja fossiilisten polttoaineiden käytöstä sähköintensiivisiin prosesseihin siirtyvät teollisuuden alat lisääntyvät. Myös tässäkin työssä esitellyissä polttoon perustumattomissa kaukolämmön tuotantomuodoissa tarvitaan sähköä esimerkiksi erilaisten lämpöpumppujen käyttövoimana. Lisäksi esimerkiksi kaksisuuntainen kaukolämpö voi vaikuttaa paikallisen kaukolämpöjärjestelmän ohella kotimaisen sähkömarkkinan kautta pohjoismaisiin sähkömarkkinoihin, jos asiakastuottajien kaukolämpöverkkoon myymällä lämmöllä korvataan merkittävästi sähkön ja lämmön yhteistuotantoa. Tällöin CHP-sähkön määrä markkinoilla vähenisi, lisäten sähkön tuonti-, tai erillistuotannon tarvetta. Edelleen, jos näiden kaukolämmön asiakastuottajien kuluttama lämpö tuotetaan sähkön kulutusta lisäävillä tuotantotavoilla, lisää sekin sähkönkulutusta osaltaan. Jos syntynyttä sähköntarvetta ei kyetä tuottamaan uusiutuvilla energialähteillä ja hiilineutraaleilla tuotantotavoilla, voi kaksisuuntaisen kaukolämmön merkittävä kasvu lisätä jopa päästöjen määrää. (Pöyry Management Consulting Oy 2016, s.23.)

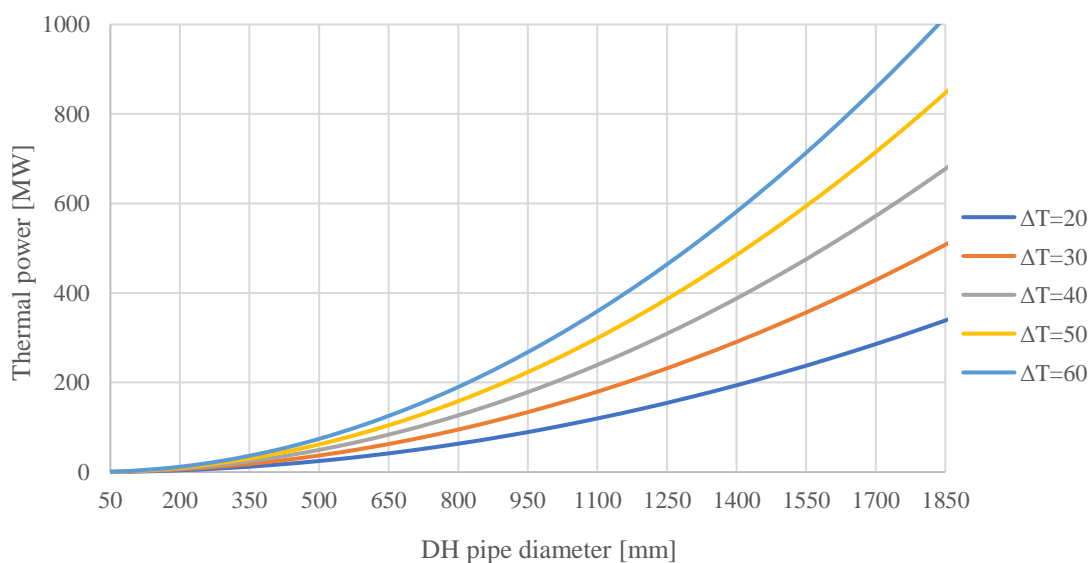
Kansalliset ja kansainväliset päästövähennystavoitteet haastavat kaukolämpöjärjestelmää ylipäänsä. Esimerkiksi Suomen tapauksessa kunnianhimoinen 13 vuodessa saavutettava hiilineutraalius vuoteen 2035 mennessä vaatii nopealla aikataululla tehtäviä toimenpiteitä ja muun muassa energiajärjestelmän monin paikoin radikaaliakin uudistumista.

5.2.3 Taloudelliset haasteet

Kaukolämmön kilpailukykyä koetellaan energiamurroksessa ja sen myötä muuttuvassa toimintaympäristössä. Vaihtoehtoiset, erityisesti yksityisille lämmönkuluttajille suunnatut lämmitysratkaisut, päästöoikeudet ja muut polttoaineisiin liittyvät muuttuvat kustannukset, sekä kaukolämpöverkon investointitarpeet ovat muun muassa seikkoja, jotka tulevat vaikuttamaan kaukolämmön kilpailukykyyn ja siten sen hinnoitteluun sekä taloudelliseen menestykseen. (Paiho & Saastamoinen 2018.)

Kaukolämpöverkkojen avautuminen sähköverkon kaltaiseksi aiheuttaa paitsi teknisiä, myös taloudellisia haasteita. Verkon hallitseminen ja säätäminen eri kuluttajien ja tuottajien mukaan vaatii lisää resursseja, minkä lisäksi kaksisuuntaisen hinnoittelun pitäisi olla tasapuolista, läpinäkyvää ja edelleen kannattavaa kaukolämpöyhtiöille. Tuottavien liiketoimintamallien löytäminen onkin sekä haaste, että mahdollisuus, sillä se pakottaa kaukolämpöyhtiöt miettimään uudenlaisia bisnesmalleja. Kaukolämpöyhtiöiden täytyy pohtia, kuinka hinnoitella sekä jakaa lämmön hinnoittelu yhtiöiden itsensä ja prosumereiden sekä erilaisten hybridijärjestelmien käyttäjien kesken. (Paiho & Saastamoinen 2018.)

Isommassa kuvassa EU:n, Suomen valtion tai kuntien politiikassa tapahtuu muutoksia usein ja nopeasti, mikä aiheuttaa haasteita investointipäätöksien tekoon ja riittävän kannattavuustason saavuttamiseen. Päätöksenteon pitkäjänteisyydellä pystytään helpottamaan investointipäätöksien tekoa, minkä lisäksi erilaiset avustukset esimerkiksi uusiutuvien lämmöntuotantomuotojen tukemiseen tai kaukolämpöverkon osien kehittämiseen seuraavien sukupolvien mukaisiksi auttavat kaukolämpöalaa sen kohdatessa energiamurroksen aiheuttamia taloudellisia haasteita. (Paiho & Saastamoinen 2018.)



Kuva 26. Kaukolämpöputkiston halkaisijan riippuvuus suhteessa verkostossa kiertävän kaukolämpöveden lämpötilaeroon (ΔT) meno- ja paluuputken välillä ja tarvittavaan lämpötehoon, kiertoveden virtausnopeutena on käytetty 1,5 m/s (Planora Oy).

Kuva 26 havainnollistaa kuinka kaukolämpöputkistojen rakentamiskustannukset voivat nousta erittäin merkittävästi, jos kaukolämpöverkkojen menoveden lämpötilaa rajoitetaan. Tämä siksi, että madaltuneen jäähtymän eli menoveden ja paluueden lämpötilaeron takia täytyy verkoston putkistokokoa kasvattaa huomattavasti, jotta kyetään säilyttämään verkoston lämmönsiirtokapasiteetti ja vastaamaan kaukolämpöasiakkaiden lämmöntarpeeseen.

5.3 Kaukolämmön kehityksen mahdollisuuksia

Seuraavissa kappaleissa esitellään kaukolämmitystä koskevia mahdollisuuksia osana nykyistä ja ennen kaikkea tulevaisuuden energia- ja lämmitysjärjestelmää. Hajautetut hiilineutraalit lämmöntuotantomuodot, digitalisaatio ja datan käyttö, sekä uudet bisnesmallit voidaan nähdä merkittävimpinä yksittäisinä tekijöinä kaukolämmön kehitykselle Suomessa (Paiho & Saastamoinen 2018, s.674).

5.3.1 Yhteiskunnalliset mahdollisuudet

Kunnilla ja hallituksella on mahdollisuus toimia suunnannäyttäjinä uusiutuvalle kaukolämmölle. Yhteistyön syventäminen kuntien, kaukolämpöyriyten ja kaukolämpöasiakkaiden

välillä tuo synergiaetuja, sekä lisää kaukolämmön hyväksyttävyyttä ja haluttavuutta poistaen vanhentuneita ennakkoluuloja kaukolämmön nykytilasta ja tulevaisuuden suunnasta. Kuntien omistamat rakennukset sopivat erinomaisesti uusien kaukolämpömallien pilotoinnin kohteiksi, sillä niille projektien taloudelliset tuottovaatimukset eivät ole niin kriittisiä kuin yksityisten tai kaupallisten yritysten toiminnassa. Kunnan tai kaupungin pilotoima kaukolämpöhanke mahdollistaa hyvin myös rakennetun infrastruktuurin yhteensovittamisen esimerkiksi kaavoittamisen tukemana. Lisäksi paikalliset kaukolämmönlähteet ja niihin kytkeytyvät teknologiset ratkaisut lisäävät kuntien ja kaupunkien elinvoimaa ja työllisyyttä, tukevat kiertotaloutta, sekä lisäävät uusiutuvien ja hiilineutraalien energianlähteiden käyttöä vähentäen näin kasvihuonekaasupäästöjä. (Paiho & Saastamoinen 2018.)

Kaukolämmön tuottamisen ja jakelun ohella uusien lisäpalveluiden lanseeraaminen hyödyttää monia osapuolia, kuten kaukolämpöyhtiötä tuottavuuden, sekä kaukolämpöasiakkaita lisääntyneen asumisviihtyvyyden kannalta. Tällaisia lisäpalveluita ovat esimerkiksi asiakkaiden kaukolämmön sekundääripiirin huoltopalvelut, kaukolämpöverkon ja asiakkaiden omien lämmönsiirtopiirien monitorointi ja tuotannon sekä kulutuksen optimointi, energia-konsultointi kaukolämpöasiakkaiden energiatehokkuuden parantamiseksi ja rakennusten lämpöhäviöiden minimoimiseksi, erilaisten lämmöntuotantolaitteiden kuten lämpöpumppujen tai aurinkokeräimien liisuus kaukolämpöasiakkaille, erilaiset valmiit ja etukäteen valmistetut kaukolämpötekniikkaa sisältävät kiinteistöpaketit eri asiakkaiden tarpeisiin, sekä kaupunki-infrastruktuurin ylläpito esimerkiksi sulattamalla lunta ja jäätä pihateiltä ja kaduilta talvisin. Kaukolämpöyhtiön tulevaisuudessa tarjoamat sisä- ja huoneilmaston palvelut lisäävät asumismukavuutta ja -viihtyvyyttä, tarjoten kaukolämpöasiakkaille lisäarvoa sopimuksestaan kaukolämpöyhtiön kanssa. (Paiho & Saastamoinen 2018.)

Uudet kaukolämpöliiketoimintaan liittyvät osakkaat prosuumerit, eli sekä lämmön kuluttajina että tuottajina toimivat henkilöt ja yritykset, pystyvät monipuolistamaan sekä tukemaan kaukolämmön tuotantoa omalla lämmöntuotannollaan. Prosuumerien ansiosta kysyntäjousto ja sektori-integraatio voivat olla helpompia toteuttaa, koska ne mahdollistavat laajemman lämpökuormien siirron ja ajoittamisen. Kysyntäjousto ja lämmönkysynnän säätely vähentävät kaukolämmön huipputuotannon tarvetta ja eritoten fossiilisten polttoaineiden käyttöä, kun niitä käytettäviä huippu- ja varalaitoksia ei tarvitse käynnistää yhtä usein. Kysyntäjouston avulla vapautunutta kapasiteettia on mahdollista myydä muualle tai tarjota uusille

asiakkaille, jolloin paikallisesta ja hiilineutraalista kaukolämmön tuotannosta hyöttyy yhä useampi. (Paiho & Saastamoinen 2018.)

Koko kaukolämmityksen historian ajan sen vahvuuksia muihin lämmöntuotantomuotoihin ovat olleet helppous ja luotettavuus kaukolämpöasiakkaan kannalta. Lämmön toimituksen varmuus joka tilanteessa, jopa kovimpien pakkasjaksojen aikana, lisää asumismukavuutta ja luo turvallisuuden tunnetta. Lisäksi paikallisilla ja uusiutuvilla resursseilla tuotettu kaukolämpö lisää energiaomavaraisuutta ja täten energiaturvallisuutta. (Paiho & Saastamoinen 2018.)

5.3.2 Teknologiset mahdollisuudet

Digitalisaatio mahdollistaa erilaisten kaukolämmön teknologisten kehityssuuntien yhteensovittamisen. Rakennuskohtaisen hetkittäisen energiankulutuksen mittauksen avulla voidaan toteuttaa kysyntäjoustoa samalla, kun tiedetään esimerkiksi sähkön hetkellinen tuotanto ja hintakehitys. Sähkön hinnan ja lämmöntuotannon vaihteluihin varaudutaan lataamalla lämpövarastoja etukäteen halvalla energialla, tarvittaessa voidaan käyttää myös rakennusten omia kaukolämpöinstrumentteja hetkittäisiin lämmöntuotannon ja -kulutuksen tasaamisiin. Digitalisaation ja jatkuvan mittauksen avulla myös kaksisuuntaista kaukolämmön tuotantoa on mahdollista operoida ja optimoida koko energijärjestelmää hyödyttäväksi. (Paiho & Saastamoinen 2018.)

Uudet, polttoon perustumattomat lämmöntuotantomuodot vähentävät hiilidioksidipäästöjä ja lisäävät lämmöntuotannon monimuotoisuutta. Polttoon perustumattomat teknologiat kestävän bioenergian polttamisen ohella lisäävät myös paikallisten energiavarojen hyödyntämistä. Kaksisuuntaisen kaukolämpöverkon käyttöönotto tehostaa ja mahdollistaa osaltaan erilaisten ja uusien hukkalämmönlähteiden hyödyntämistä, sekä voi esimerkiksi parantaa lämpöpumppujen käyttöä säätövoimana. (Paiho & Saastamoinen 2018.)

Lämpöpumpputeknologialla on kaukolämmön tuotannon lisäksi mahdollisuutena myös kaukokylmän tuotanto samalla tekniikalla. Suomelle kyseisen teknologian kehittäminen lisää sekä teknologista kompetenssia, että avaa kaupallisen vientipotentiaalin maihin, joissa ilmenee vielä enemmän jäähdytystarvetta. Myös Suomessa jäähdytystarve tulee lisääntymään ilmastomuutoksen seurauksena sekä asumisviihtyvyyteen panostamisen lisääntyessä.

Kehittynyt lämpöpumpputekniikka mahdollistaa myös matalampien lämpötilatasojen tehokkaan hyödyntämisen. (Paiho & Saastamoinen 2018.)

Lämmöntuotanto sähkön avulla monipuolistaa lämmöntuotantoa ja tuotantopisteitä helpottaen sekä kaukolämpöyhtiöiden toimintaa ja markkina-asemaa, että sähköverkon toimintaa uusiutuvien ja vaihtelevien tuotantomuotojen kuten tuulivoiman merkittävästi lisääntyessä. Sähköllä tuotetulla lämmöllä esimerkiksi lämpöpumppujen tai suorien sähkövastusten avulla on suotuisia vaikutuksia energian tuotannon ja kulutuksen tasapainottamisessa, sillä kaukolämpöverkossa kiertävän veden sisältämä lämpöenergia sekä mahdolliset lämpövarastot toimivat väliaikaisina energiavarastoina tuoden joustavuutta myös sähköverkon toimintaan. Lämpövarastoilla on merkittävä rooli tulevaisuuden kaukolämmöntuotannossa, sillä niiden avulla saadaan kaukolämmön huipputehon tarvetta tasoitettua, sekä enemmän irti uusiutuvista, tuotannoltaan vaihtelevista lämmön lähteistä, kuten esimerkiksi tuulisähköstä tai tulevaisuudessa aurinkolämmöstä. Tulevaisuudessa sähkön ja lämmön tuotantojen profiilit tulevat kääntymään päinvastoin nykytilanteesta, sillä lisääntyvä uusiutuvan sähkön määrä, kuten esimerkiksi tuulivoima, lisää sähkön tuotannon vaihteluja. Vastaavasti taas lämmöntuotannossa polttoon perustuvasta tuotannosta siirtyminen sähköä hyödyntävään lämmitykseen vähentää lämmön tuotannon joustavuutta. Toisaalta lämmön tuotanto nykyään on jo niin joustavaa, että kaukolämmön perustuotanto kykenee joustamaan otettaessa vastaan ja hyödynnettäessä esimerkiksi uusiutuvaa tuulisähköä. (Paiho & Saastamoinen 2018, Kokkonen 2020, s.14.)

Energia- ja kaukolämpöjärjestelmän nopealla aikataululla hiilineutraaliksi uusiminen kiihdyttää myös kaukolämmön tuotantoon käytettävän tekniikan tutkimusta ja kehitystä tuoden uusia innovaatioita ja vaihtoehtoja. Teknologiaa kehittäville maille se tuo etua myös taloudellisesti, kun uutta ja uusiutuviin lämmön tuotantomuotoihin perustuvaa kaukolämpötekniikkaa voidaan markkinoida ja viedä myös ulkomaille. (Paiho & Saastamoinen 2018.)

5.3.3 Taloudelliset mahdollisuudet

Sähkön hinnan nousu ja ennen kaikkea sähkön hintojen volatiliteetti ja kausittaisuus johtuen vaihtelevan uusiutuvan energian rajusta kasvusta tarjoaa kaukolämpöyhtiöille mahdollisuuden hyötyä taloudellisesti sähkön hintapiikeistä ja notkahduksista. Lämmöntuotannon sähköistyminen uusiutuvien ja vaihtelevien tuotantomuotojen kuten tuulivoiman lisääntyessä

monipuolistaa lämmöntuotantoa ja -tuotantopisteitä. Tämä tuo kustannushyötyjä, kun lämmöntuottajat voivat valita tilanteen mukaan suuremmasta määrästä lämmöntuotantovaihtoehtoja edullisimman. Kaukolämmön tuottajat, joilla on sekä CHP-tuotantoa että suuren teollisen kokoluokan lämpöpumppukapasiteettia, hyötävät yhteistuotetun sähkön myynnistä saadusta voitosta, kun sähkön hinta on korkealla, ja toisaalta lämpöpumppujen paremmasta hyötysuhteesta verrattuna esimerkiksi sähkökattiloihin silloin, kun sähkön hinta on matalalla. Lisäksi investoimalla kannattaviin lämpövarastoihin ja integroimalla ne kaukolämpöverkkoon voidaan edelleen lisätä sähkön ja lämmön hintojen vaihtelusta saatavaa taloudellista hyötyä. Edellä mainituin keinoin sekä sähköä, että kaukolämpöä tuottavat suuret energiayhtiöt (n. 10 kpl) pystyvät muun muassa näin suojautumaan sähkön hinnan muutoksilta ja alentamaan lämmön tuotantokustannuksiaan. (Helin et al. 2018, s.456.)

Kaukolämpöyhtiön liiketoiminnan kannalta erilaisen palveluntarjonnan lisääminen ja kehittäminen kasvattaa kaukolämpöyhtiön ansaintamahdollisuuksia, samalla kun se tuo toimintaansa näkyvämmäksi ja lähemmäs kaukolämpöasiakasta. Erilaisia mahdollisia kaukolämpöyhtiön tarjoamia asiakaspalveluja ovat esimerkiksi elinkaaripalvelut, jäähdytyspalvelut, sisäilmapalvelut, koko energiaketjun kattavat palvelut, etäyhteys- ja kaukokäyttöpalvelut, energiatehokkuuspalvelut, huoltopalvelut, sekä leasing-palvelut. (Paiho & Saastamoinen 2018.)

Kaukolämmön lisäksi jäähdytyspalveluihin kuuluvan kaukokylmän lisääminen kaukolämpölaitosten portfolioon voi tuoda merkittäviä taloudellisia mahdollisuuksia lämpöpumpputeknologian yleistyessä kaukolämmön tuotannossa, sillä lämpöpumppuja voidaan käyttää sekä kaukolämmön, että kaukokylmän tuotantoon. Keskitetyn jäähdytyksen lisääminen kaukolämpöyhtiön tuotantomuotoihin tuo saataville myös mahdollisuuden hyödyntää jäähdytyksestä syntyviä matalalämpöisiä hukkalämpöjä (Pöry Management Consulting Oy 2016, s.22). Paikallisen hyödyn lisäksi kaukojäähdytykseen liittyvää tietotaitoa ja teknologiaa voi olla erityisen kannattavaa viedä muihin lämpimämmillä alueilla sijaitseviin maihin, missä on vielä enemmän jäähdytystarvetta.

Hukkalämpöjen hyödyntäminen kehittyneen lämpöpumpputekniikan avulla avaa suuria paitsi teknisiä, myös taloudellisia mahdollisuuksia kaukolämpöyhtiölle. Hukkalämmönlähteet ovat tyypillisesti ilmaisia tai ainakin hyvin edullisia kaukolämpöyhtiölle, ja niiden käyttäminen kaukolämmöntuotannossa minimoikin polttoainekustannuksia sekä poistaa

esimerkiksi tarpeen fossiilisten ja bioperäisten polttoaineiden käyttämisessä tarvittaville polttoaineen käsittelylle ja -varastoinnille vähentäen tuotantokustannuksia.

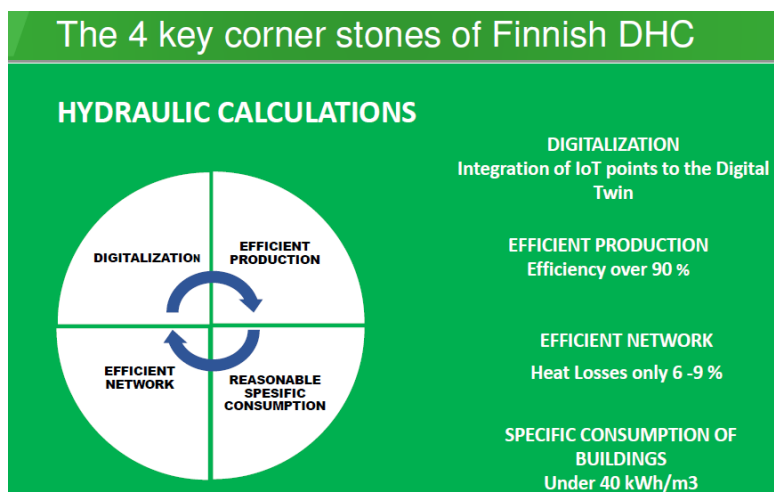
Kysyntäjousto voi olla yksi mahdollinen, tosin kokonaisuuden kannalta maltillista taloudellista potentiaalia edustava kaukolämmön kehityksestä saatava hyöty. Kysyntäjouston muotoja voivat olla kulutuksen pakollinen kysyntäjousto ja lämmön varastoinnilla toteutettava kysyntäjousto. Lisäksi kaikki kysyntäjouston hyvät ja kaukolämpöverkkoa tukevat toiminnot vaativat digitalisaatiota sekä älykkyyttä. Oikein automaation avulla toteutettuna kysyntäjousto tehostaa kaukolämpölaitosten ajoa ja laskee siten käyttökustannuksia. (Paiho & Saastamoinen 2018.)

6 SUOMALAISEN KAUKOLÄMMÖN OMINAISPIIRTEET JA VIENTIPOTENTIALI

Suomalainen kaukolämmitys ja -jäähdytys on saanut kansainvälistä tunnustusta ja palkintoja energia-alalta (mm. IEA, Euroheat & Power...). Kaukolämpöjärjestelmät mahdollistavat energijärjestelmän systeemitason optimoinnin, lämmöntuotannon kustannusten ja ympäristövaikutusten minimoimisen verrattuna erikseen kuluttajakohtaisesti tuotettuun lämmitykseen. Samalla kaukolämmitys tarjoaa lämmönkuluttajalle luotettavan ja varman lämmöntoimituksen oheispalveluineen. (Business Finland 2020.)

6.1 Ominaispiirteet

Nykyaikaisen suomalaisen kaukolämmityksen ja -jäähdytyksen neljänä kulmakivenä kuvan 27 mukaan voidaan pitää digitalisaatiota ja IoT-pisteiden yhdistämistä verkoston digitaaliseen malliin sekä sen mahdollistamia hydraulisia verkostojen laskentamalleja, energiatehokasta (hyötysuhde > 90 %) ja monipuolista lämmöntuotantoa, lämpöhäviöiltään alhaista ja oikein mitoitettua kaukolämpöverkostoa, sekä uudisrakennetun rakennuskannan madaltunutta ominaisenergiankulutusta. Näiden kulmakivien päälle on mahdollista kehittää tulevaisuuden kaukolämpöjärjestelmää entistä joustavammaksi ja monipuolisemmaksi osaksi energiantuotantoa, lisäten siihen erilaisia uusiutuvan energian tuotantopisteitä sekä implementoiden uusia kaukolämpöjärjestelmää kehittäviä palvelu- ja toimintamalleja. Kun verkostojen digitaaliset mallit ovat ajan tasalla, mahdollistuvat erilaiset mallinnukset sekä kaukolämmön tuotannon ja asiakaslaitteiden nopea reagointi mm. vaihteleviin lämmöntarpeisiin ja tuotantokustannuksiin. Kokonaisvaltaisella verkosto- ja tiedonhallinnan avulla saavutetaan hiilineutraaliustavoitteita tukevia sekä lämpöasiakkaita palvelevia kaukolämpöjärjestelmiä, säästäten niiden investointi- ja käyttökustannuksissa. (Planora Oy.)



Kuva 27. Suomalaisen kaukolämmityksen ja -jäähdytyksen ”peruspilarit” (Planora Oy).

Suomalaiset kaukolämpöjärjestelmät soveltuvat hyvin uusien kehityskohteiden, tuotantomuotojen, sekä asiakas- ja palvelumallien alustoiksi ja suunnannäyttäjiksi, sillä ne ovat perustoiminnaltaan vakaita ja luotettavia lämmöntuotannon ja -jakelun hyötysuhteiden ollessa hyvällä tasolla. Dataa tuottavat ja hyödyntävät hybridikaukolämpöverkot käyttävät monipuolisesti erilaisia lämmönlähteitä tuottaen lämpötilaltaan vaihtelevaa (n. 65—120 °C) kaukolämpövertä, jonka siirron ja asiakkaille jakelun aikaisia lämpöhäviöitä on minimoitu verkoston siirtokapasiteetti ja kustannukset huomioiden. Yhdessä kansainvälisesti hyvän maineen kanssa suomalaista kaukolämpöosaamista ja kaukolämpöön liittyviä teknologioita on kannattavaa markkinoida muualle kaukolämmitystä hyödyntäviin tai siitä potentiaalisesti hyötyviin maihin.

6.2 Suomalaisen kaukolämpöteknologian vientipotentiaali

Pitkin työtä on esitelty esimerkein erilaisia Suomessa toteutettuja tai toteutettavissa olevia kaukolämpöteknologioita ja -kohteita, joilla on myös potentiaalia toimia erilaisissa toimintaympäristöissä muuallakin kuin vain Suomessa. Suomalaisen kaukolämpöteknologiavien- nin mahdollisia kohdemaita olisivat kaikki lämmitystä vaativat maat ja kaupunkialueet, mutta eritoten ne, joissa on Suomen ilmaston lailla selkeät vuodenaajat, kuten esimerkiksi keski-Euroopan suuret kaupungit ja taajama-alueet, sekä Kiinan, Venäjän, Kanadan ja USA:n pohjoisosien kaupungit. Euroopan Unionin yhteisiin hiilineutraaliuden tavoitteisiin pääsemiseksi kaukolämmityksen laajempaa hyödyntämistä osana ratkaisua on esitetty ja tähän vedoten kaukolämpöteknologioita olisi vielä helpompi markkinoida uusille alueille.

Potentiaalisia suomalaisia tai Suomessa kehitettyjä ja vientiin sopivia kaukolämpöteknologioita on useita. Näistä jo nyt kansainvälistä liiketoimintaa harjoittaa esimerkiksi useampi teollisen kokoluokan lämpöpumppuja valmistava suomalainen yritys. Suomessa on myös perinteisesti ollut vahvaa tietotekniikan osaamista, ja erilaiset digitaaliset järjestelmät ja automaatioon pohjautuvat ratkaisut tuovat kaukolämpöjärjestelmiin huomattavia parannuksia niin ohjauksen, luotettavuuden, päästöjen vähentämisen, kuin kustannustenkin kannalta. Suomessa on nykyään useampia geolämpöön perustuvia kaukolämpöprojekteja, ja niistä saatavaa kokemusta, projektiosaamista ja kehitettyä poraustekniikkaa olisi mahdollista markkinoida ja viedä muuallekin. Bioenergian hyödyntäminen on runsasta ja metsäteollisuutta on ympäri maata, joten erilaisten biotuotteiden ja kaukolämmön tuotannon yhdistäviä kokonaispaketteja olisi mahdollista markkinoida. Lisäksi bioenergian ja kaukolämmön yhdistäminen hiilidioksidin talteenottoon toisi kokonaisen kiertotaloutta hyödyntävän kokonaisuuden markkinoitavaksi, ollen samalla vahvasti tulevaisuuteen ja hiilineutraaliustavoitteisiin tähtäävä vientiteknologian ja osaamisen kokonaisuus. Suomessakin tutkittua SMR-reaktoritekniikkaa ja ydinkaukolämpöosaamista kannattaisi pyrkiä viemään ydinvoimaa nykyään käyttäviin tai harkitseviin maihin, vaikkei Suomi kehittäisikään itse kokonaan omaa SMR-reaktoriaan. Suuri osuus Suomen kaukolämmön tuotannosta on CHP-tuotantoa, minkä takia erilaiset yhdistetyn lämmön ja sähkön tuotantoon perustuvat teknologia- ja järjestelmäratkaisut ovat markkinoitavissa pitkään kehittyneen osaamistautan myötä. Aurinkolämpöjärjestelmien hyödyntämisestä laajemmassa mittakaavassa Suomen energiantuotannossa ei ole vielä juurikaan kokemusta, mutta mahdollisuuksia teknologian ja järjestelmään integroinnin kehittämiseen riittää. Erilaiset lämpövarastoteknologiat ja eritoten lämmön kausivaraointiin keskittyvät ratkaisut ovat Suomen ilmastonkin kannalta tarpeellisia kehityskohteita, ja tätä teknologiaa tarvitaan myös muualle kehitettävissä ja käytettävissä kaukolämpöjärjestelmissä. Erilaiset järjestelmätason innovaatiot kuten kaksisuuntaisuus, sektori-integraatio, kysyntäjousto, energiasektorin yhteiset hybridialustat, ja niihin liittyvät uudet ratkaisu-, palvelu- ja hinnoittelumallit sekä niistä saadun kokemuksen ja tietotaidon jakaminen omaavat myös potentiaalista vientiarvoa.

7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Vaikka tässä työssä esitellyt kaukolämmön kehityssuunnat ja tuotantomuodot voidaan kategorisoida omiksi haaroikseen ja eri teknologioiden kehityksen kulku ja nopeus vaihtelee osan ollessa jo laajamittaisesti käytössä, eivät ne ole toisiaan poissulkevia. Päinvastoin ne joko täydentävät toisiaan tai monipuolistavat kaukolämmöntuotantoa mahdollistaen samalla lämmöntuotannon päästöjen vähentämisen. Esimerkiksi lämpöpumpputeknologia, erilaiset hukkalämmönlähteet, kaksisuuntainen kaukolämpöverkko ja sektori-integraatio yhdessä digitalisaation ja älykkään ohjauksen kanssa pystyvät yhdessä tuottamaan suuremman potentiaalin sekä lämmöntuotannon ja sen joustavuuden, että päästöjen vähennyksen näkökulmasta kuin rakennuskohtaiset lämmitysmuodot.

Ilmastonmuutoksen, poliittisten päätösten ja maailmantilanteen muutosten johdosta koko energijärjestelmä, kaukolämmitys mukaan lukien, on energiamurroksessa. Perinteisten polttoon perustuvien ja fossiilisia polttoaineita hyödyntävien teknologioiden käyttöä on viime vuosina vähennetty rajusti ja muun muassa EU-maiden keskinäiset ilmastotavoitteet ohjaavat lämmöntuotannossakin kohti hiilineutraaliutta ja erilaisten polttoon perustumattomien teknologioiden käyttöönottoa. Polttoon perustuvissa teknologioissa bioenergian käytöllä on varsinkin Suomessa vahva jalansija ja sillä on viime aikoinakin korvattu fossiilisia polttoaineita käytäviä lämmöntuotantolaitoksia. Tulevaisuudessa esimerkiksi vetytaloudella nähdään olevan potentiaalia myös lämmöntuotannon osalta. Polttoon perustumattomissa teknologioissa lämpöpumpuilla tuotetun kaukolämmityksen osuus erilaisia ympäristö- ja hukkalämmönlähteitä hyödyntäen on noin viisinkertaistunut vajaassa kymmenessä vuodessa. Muita polttoon perustumattomia teknologioita, kuten geo- ja aurinkolämpöä, hyödynnetään jo lämmöntuotannossa ja esimerkiksi syvän geolämmön projekteja on Suomessa meillä useampia. Sähkökattiloiden käytön kannattavuus riippuu vielä lämpöpumppuja enemmän vaihtelevan sähkön markkinahinnan suuruudesta. Ydinvoimalla tuotettua SMR-ydinlämpöä tutkitaan ja kehitetään ja ensimmäiset laitokset maailmalla vaikuttaisivat olevan käytössä tämän vuosikymmenen loppuun mennessä.

Suomalaisen kaukolämmityksen tulevaisuudessa korostuvat kaukolämpötuotantoon ja -verkoihin liittyvien yritysten välinen tiedonkeruu, -hallinta ja tiedon hyödyntäminen digitalisaation avulla, jolloin saavutetaan edullisimmat tuotantokustannukset ja optimoidaan

verkkojen toiminta. Kaukolämmön tuotannossa pyritään minimoimaan polttoon perustuvia tuotantomuotoja vähentäen hiilidioksidipäästöjä ja ympäristövaikutuksia ottaen kuitenkin huomioon kausittaisen sekä hetkellisen lämmitystehontarpeen, tuotantokapasiteetin rakenteen, sekä tuotantokustannukset. Uusiutuvilla ja vaihtelevilla energialähteillä tuotetun sähkön määrän lisääntyessä myös kaukolämpöä tuotetaan merkittävässä määrin enemmän sähkön avulla, esimerkiksi lämpöpumppuja ja sähkökattiloita hyödyntäen, sekä varastoimalla halvemmilla tuotantokustannuksilla tuotettua lämpöä kulutuspiikkien ja lämmityskausien varalle.

Tämän työn perusteella voidaan havaita, että monet lämmön tuotantomuodot sekä toisaalta myös eri teknologiset kehityssuunnat tarvitsevat lämmön varastointia toteutuakseen tai toimiakseen oikealla tavalla ja kustannustehokkaasti. Lämmön kausivarastot tukevat esimerkiksi pienydinlämmön tai aurinkolämmön tuotantoa. Lämpö- ja energiavarastoilla yleensä on siis merkittävä rooli hyödynnettäessä eri energiasektoreiden välisiä synergiaetuja, otettaessa käyttöön uusia ja vaihtelevia tuotantomuotoja, sekä tasapainotettaessa tuotannon ja kysynnän välisiä eroja.

Laajemmassa mittakaavassa esimerkiksi Euroopan Unionin tasolla kaukolämmöllä nähdään olevan tarpeellinen rooli yhteisten päästövähennysten saavuttamisessa, sillä kaukolämpöjärjestelmä tarjoaa keskitettynä järjestelmänä helpomman operoinnin ja säädettävyyden kokonaisuutena kuin yksittäisten lämmityskohteiden, kuten esimerkiksi kaupunkialueilla sijaitsevien omakoti- tai kerrostalojen, omat lämmitysjärjestelmät. Kaukolämpöjärjestelmään syötettävän lämmön tuotantomuotoja voidaan myös helpommin ja nopeammassa aikataulussa vaihtaa kustannustehokkaimman ja ilmastovaikutuksia parhaiten minimoivan mukaan, kuin jos jokainen tuottaisi itse oman lämpönsä. Suomalaisen kaukolämmityksen tuotantopaletti on jo nykyään monipuolinen, ja tämän monipuolisuuden kasvattaminen tulee korostamaan kaukolämpöverkostojen hyviä puolia edettäessä kohti hiilineutraalia yhteiskuntaa.

Käytännössä jo nähtävissä ja tulevaisuuden kaukolämpöjärjestelmässä vielä korostuvaa tulee olemaan erilaisten lämmöntuotantomuotojen ja –teknologioiden yhdistäminen. Polttoon perustumattomat lämmöntuotantomuodot tukevat hyvin hiilineutraaleja polttoaineita käyttävien lämpö- ja yhteistuotantolaitosten tuotantoa monipuolisuudellaan, hajautettavuudellaan, sekä nopeasti lämmöntarpeen muutoksiin reagoimalla. Hiilineutraaliin lämmöntuotantoon siirtymistä edesauttavat lämpölaitoksissa polttoaineena käytettävät uusiutuvat energialähteet kuten bioenergia, ja ilmastovaikutusta pienentämään voidaan laitoksien yhteyteen lisätä

hiilidioksidin talteenottoa. Polttoon perustuvat lämpö- ja yhteistuotantolaitokset yhdessä sähkökattiloiden kanssa kykenevät tuottamaan jokaiseen vuodenaikaan ja lämmöntarpeeseen vaadittua kaukolämmön menoveden lämpötilaa, ja näillä tuotantotavoilla lämpöpumppujen ohella voidaan priimata sitä polttoon perustumatonta lämmöntuotantoa, jonka lämpötila ei riitä itsessään vastaamaan lämmöntarpeeseen. Sähköllä tuotetun kaukolämmön määrää tullaan lisäämään, mutta toisaalta sen tuotannon kannattavuus vaihtelee suuresti volatiliin sähkön markkinahintojen mukaan. On myös huomioitava, että esimerkiksi teollisen kokoluokan lämpöpumppujen kehitys on viimeisen vuosikymmenen aikana ollut nopeaa ja samanlaisia teknologisia kehitysaskeleita on mahdollista odottaa tulevaisuudessakin eri tuotantomuotoihin.

Työssä esitetyt näkemykset ovat osittain kirjoittajan omia näkemyksiä, osittain työssä käytettyjen lähteiden perusteella koottuja. Nykypäivän jatkuvasti muuttuvassa toimintaympäristössä nämä näkemykset ja erilaiset oletukset tulevaisuudesta voivat osoittautua hyvinkin nopealla aikataululla paikkansa pitämättömiksi. Tästä esimerkkinä päästöoikeuden hinnan nousu, jota ei vielä muutama vuosi sitten tehdyissä tutkimuksissa tunnistettu niissä käytetyissä korkean hinnan skenaarioissakaan. Kuitenkin suuri osa tässäkin työssä esitellyistä kaukolämmön kehityssuunnista ja tuotantomuodoista on joko nykyään käytössä tai niiden tutkimus ja kehitys on niin pitkällä, että tulevaisuuden suomalaisen kaukolämmityksen voidaan sanoa koostuvan ainakin näistä rakennuspaloista. Vaikka teknologia näissä ratkaisuisissa olisikin toimivaa ja hyväksi havaittua, niin lopulta talous ja kustannukset ovat lopullisia investointeja ja käyttöönottoa määrittävät tekijät.

Jatkotutkimuksen kohteita voisivat olla esimerkiksi työssä esiteltyjen eri lämmöntuotantomuotojen kustannusrakenteiden arvioiminen ja laskeminen, sekä kaukolämmön kokonaiskustannuksien arviointia kehityssuuntien vaikutukset huomioiden; Esimerkiksi Suomen kaukolämmityskapasiteetin ja huipputehojen arvioiminen sekä mitoittaminen (samalla pysyy kustannuksia ja päästöjä arvioimaan) vuosien 2030, 2040 ja 2050 arvioiduilla lämmöntuotanto ja -kulutusrakenteilla hyödyntäen esimerkiksi EnergyPLAN-sovellusta tai jotain muuta soveltuvaa työkalua. Myös erilaisten tässäkin työssä esiteltyjen kaukolämmön kehityssuuntien, digitalisaation ja niiden yhteisvaikutusten mallintaminen sekä mahdollisuuksien tarkastelu kaukolämpöjärjestelmässä vuosi-, kuukausi-, viikko-, päivä-, tai tuntitasolla toisi lisäarvoa.

8 YHTEENVETO

Tässä työssä käsiteltiin suomalaista kaukolämmitystä ja sen ominaispiirteitä, nykytilannetta, tulevaisuutta, kehityssuuntia ja vientipotentiaalia kaukolämmityksen maailmanlaajuisen tilanteen ja muutosajureiden selvittämisen lisäksi.

Suomalaisen kaukolämmön tulevaisuuden näkymät ovat hyvät, jos aloitettu muutos energiajärjestelmän hiilineutraaliksi saattamisessa uusien tuotantomuotojen kanssa onnistuu ja muita kaukolämmitykseen liittyviä kehityskohteita kuten esimerkiksi digitalisaatiota ja lämmön kausivarastoja saadaan implementoitua kustannustehokkaasti osaksi järjestelmiä, hyödyttäen sekä kaukolämmön tuottajia että kaukolämpöasiakkaita.

Kaukolämmön toimintaympäristö tulee muidenkin energiasektoreiden ohella muuttumaan energiamurroksessa. Muutoksessa korostuvat lämpöenergian hinta ja hinnoittelu, tuotannon ja kysynnän tasapainottaminen, datan hyödyntäminen ja integrointi, lämmöntuotannon huoltovarmuus ja vähäpäästöisyys sekä eri sektoreiden väliset synergiat.

Suomalaisen kaukolämpöjärjestelmän ominaispiirteisiin voidaan luokitella tehokas ja hyötysuhteeltaan hyvä lämmöntuotanto ja -jakelu, monipuoliset tuotantomuodot, datalla ja digitalisaatiolla saavutettavat suunnittelun ja tuotannon optimoinnin kustannushyödyt, sekä kaukolämpöverkkoihin liitetyn rakennuskannan kehittyvä energiatehokkuus. Näiden kaikkien kehittämistä tullaan jatkamaan tavoiteltaessa hiilineutraalia yhteiskuntaa, minkä lisäksi Suomen kannattaa viedä kaukolämmitykseen liittyvää teknologiaosaamista muihin kaukolämmitysmaihin tai vastaavaa tarvetta omaaville alueille. Potentiaalia tälle riittää, sillä esimerkiksi Euroopan Unionin omissa tavoitteissa ja näkemyksissä kaukolämmityksen lisäämistä tarvitaan osaksi taisteluun ilmastonmuutosta vastaan.

LÄHTEET

Abdurafikov R., Grahn E., Kannari L., Ypyä J., Kaukonen S., Heimonen I., Paiho S., 2017. An analysis of heating energy scenarios of a Finnish case district. *Sustainable Cities and Society*, Volume 32, s.56-66. [Verkkójulkaisu]. [Viitattu 3.11.2021]. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.03.015>

AFRY, 2020a. Selvitys turpeen energiakäytön kehityksestä Suomessa, Raportti työ- ja elinkeinoministeriölle. [Verkkójulkaisu]. [Viitattu 8.11.2021]. Saatavissa: https://afry.com/sites/default/files/2020-08/tem_turpeen_kayton_analyysi_loppuraportti_0.pdf

AFRY, 2020b. Finnish Energy – Low carbon roadmap, Final report. [Verkkójulkaisu]. [Viitattu 2.3.2022]. Saatavissa: https://energia.fi/files/5064/Taustaraportti_-_Finnish_Energy_Low_carbon_roadmap.pdf

AFRY, 2020c. Kaukolämpöasiakkaiden mitoituslämpötilan laskeminen. Projektinumero: 101013094. Kaukolämpö ja kaukokylmä, AFRY Finland Oy. [Verkkójulkaisu]. [Viitattu 26.4.2022]. Saatavissa: https://energia.fi/files/5289/Kaukolampoasiakkaiden_mitoituslampotilan_laskeminen_101013094-Loppuraportti_AFRY.pdf

Alanen R., Koljonen T., Hukari S., Saari P., 2003. Energian varastoinnin nykytila [Current Trends in Energy Storage Technology]. Espoo 2003. VTT Tiedotteita – Research Notes 2199. [Verkkójulkaisu]. [Viitattu 26.4.2022]. ISBN 951-38-6160-0. Saatavissa: <https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/tiedotteet/2003/T2199.pdf>

Asumisen rahoitus- ja kehittämiskeskus, 2021. Energia-avustus. Avustettavat korjaukset ja avustuksen laskenta. [Verkkójulkaisu]. [Viitattu 20.10.2021]. Saatavissa: https://www.ara.fi/fi-FI/Lainat_ja_avustukset/Energiaavustus/Avustettavat_toimenpiteet_ja_avustuksen_laskenta

Bioenergy Europe, 2018. Bioenergy Europe, Statistical Report, 2018 Edition. Bioenergy Technology Solutions -kurssimateriaali. Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT. [Verkkójulkaisu]. [Viitattu 19.10.2021]. Saatavissa: rajoitettu saatavuus

Business Finland, 2020. Smart energy District energy Finland. [Verkkójulkaisu]. [Viitattu 11.5.2022]. Saatavissa: <https://www.businessfinland.fi/4965e8/globalassets/finnish->

customers/02-build-your-network/bioeconomy--cleantech/alykas-energia/smart-energy-of-fering_district-heating-and-cooling.pdf

Böhm H., Moser S., Puschnigg S., Zauner A., 2021. Power-to-hydrogen & district heating: Technology-based and infrastructure-oriented analysis of (future) sector coupling potentials. *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 46, Issue 63, s.31938-31951. [Verkkójulkaisu]. [Viitattu 26.2.2022]. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.06.233>

Canadian Small Modular Reactor Roadmap Steering Committee, 2018. A Call to Action: A Canadian Roadmap for Small Modular Reactors. Ottawa, Ontario, Canada. [Verkkójulkaisu]. [Viitattu 14.2.2022]. Saatavissa: https://smrroadmap.ca/wp-content/uploads/2018/11/SMRroadmap_EN_nov6_Web-1.pdf?x64773

Carbofex, 2021. Biomass Pyrolysis Technology / Biochar production equipment. [Verkkójulkaisu]. [Viitattu 15.12.2021]. Saatavissa: <https://www.carbofex.fi/Home>

Danfoss, 2022. Kaukolämpö, Kaukoenergian päähaasteiden ratkaiseminen. [Verkkójulkaisu]. [Viitattu 28.7.2022]. Saatavissa: <https://www.danfoss.com/fi-fi/markets/district-energy/dhs/district-heating/#tab-overview>

DH-luentomateriaalit, 2021. District heating -kurssin sähköiset luentomateriaalit. Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT. Saatavissa: rajoitettu saatavuus

Doosan Enerbility, 2022. Small Modular Reactors. [Verkkójulkaisu]. [Viitattu 1.6.2022]. Saatavissa: https://www.doosanenerbility.com/en/business/smr_smart

EBTP (European Biofuels Technology Platform) & ZEP (Zero Emission Fossil Fuel Power Plants), 2012. Biomass with CO₂ Capture and Storage (Bio-CCS). The way forward for Europe. [Verkkójulkaisu]. [Viitattu 27.2.2022]. Saatavissa: <https://www.etipbioenergy.eu/images/EBTP-ZEP-Report-Bio-CCS-The-Way-Forward.pdf>

Energiateollisuus ry, 2016. Suuret lämpöpumput voivat kattaa yli 10 % kaukolämmön myynnistä. [Verkkójulkaisu]. [Viitattu 10.11.2021]. Saatavissa: https://energia.fi/uutishuone/materiaalipankki/suuret_lampopumput_voivat_kattaa_yli_10_kaukolammon_myyntista.html#material-view

Energiateollisuus ry, 2020. Kaukolämpöalan kansallinen strategia 2030. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 27.6.2022]. Saatavissa: https://energia.fi/files/5123/Kansallinen_kaukolampöalan_strategia_2030.pdf

Energiateollisuus ry, 2021a. Rakennusten kaukolämmitys, määräykset ja ohjeet. Julkaisu K1/2021. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 28.11.2021]. Saatavissa: https://energia.fi/uutishuone/materiaalipankki/rakennusten_kaukolammitys_maaraykset_ja_ohjeet._julkaisu_k1_2021.html#material-view

Energiateollisuus ry, 2021b. Lämmön ja sähkön yhteistuotanto on energiatehokasta. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 10.11.2021]. Saatavissa: <https://energia.fi/energiasta/energiantuotanto/yhteistuotanto>

Energiateollisuus ry, 2021c. Energia-alan vähähiilisyyden tiekartta. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 14.10.2021]. Saatavissa: https://energia.fi/energiapolitiikka/vahahiilisyyden_tiekartta

Energiateollisuus ry, 2021d. EU ja Fit for 55. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 21.10.2021]. Saatavissa: https://energia.fi/energiapolitiikka/eu_ja_fit_for_55

Energiateollisuus ry, 2022a. Energiavuosi 2021 Kaukolämpö. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 23.5.2022]. Saatavissa: https://energia.fi/files/5650/Kaukolampovuosi_2021_v1.4_FINAL.pdf

Energiateollisuus ry, 2022b. Kaukolämpötilasto 2020. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 26.7.2022]. ISSN 0786-4809. Saatavissa: https://energia.fi/files/6804/Kaukolampotilasto_2020_paivitetty20220601.pdf

Energiavirasto, 2021. Päästökaupan huutokauppatulot 409 miljoonaa euroa. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 12.2.2022]. Saatavissa: <https://energiavirasto.fi/-/paastokaupan-huutokauppatulot-409-miljoonaa-euroa>

EPV Energia Oy, 2020. Tulevaisuuden lämpöenergiavarasto otettiin käyttöön Vaasassa. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 25.7.2022]. Saatavissa: <https://www.epv.fi/2020/09/29/tulevaisuuden-lampoenergiavarasto-otettiin-kayttoon-vaasassa/>

Euroopan Unionin virallinen lehti, 2012. Euroopan Parlamentin ja Neuvoston direktiivi 2012/27/EU. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 8.11.2021]. Saatavissa: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:32012L0027&from=EN>

Euroopan Unionin virallinen lehti, 2018. Euroopan Parlamentin ja Neuvoston direktiivi (EU) 2018/2001. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 8.11.2021]. Saatavissa: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L2001&from=en>

European Commission, 2021. European Green Deal: Commission proposes to boost renovation and decarbonisation of buildings. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 13.1.2022]. Saatavissa: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_21_6683

European Commission, 2022. Press release: EU Taxonomy: Commission presents Complementary Climate Delegated Act to accelerate decarbonization. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 16.2.2022]. Saatavissa: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_22_711

Eurostat, 2017. Combined heat and power (CHP) generation, Directive 2012/27/EU of the European Parliament and of the Council. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 3.8.2022]. Saatavissa: https://ec.europa.eu/eurostat/documents/38154/42195/Final_CHP_reporting_instructions_reference_year_2016_onwards_30052017.pdf/f114b673-ae3-499b-bf38-f58998b40fe6

Finlex, 2017. Ympäristöministeriön asetus rakennusten vesi- ja viemärlaitteistoista. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 20.6.2022]. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20171047>

Fortum, 2022a. Avoin kaukolämpö ostohinnat. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 25.7.2022]. Saatavissa: <https://www.fortum.fi/yrityksille-ja-yhteisolle/lammitys-ja-jaahdytys/kaukolampo/avoin-kaukolampo/avoin-kaukolampo-ostohinnat>

Fortum, 2022b. Espoo Clean Heat, Hiilineutraali kaukolämpö Espooseen 2020-luvulla. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 22.6.2022]. Saatavissa: <https://www.fortum.fi/yrityksille-ja-yhteisolle/lammitys-ja-jaahdytys/kaukolampo/espoo-clean-heat>

Galindo Fernández M., Roger-Lacan C., Gähns U., Aumaitre V., 2016. Efficient district heating and cooling markets in the EU: Case studies analysis, replicable key success factors and potential policy implications. JRC104437, EUR 28418 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2016. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 13.12.2021]. ISBN 978-92-79-65048-2. Saatavissa: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC104437>

Hakkarainen J., 2019. Meno- ja paluuvesien lämpötilojen hallinta silmukoidussa kaukolämpöverkossa. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 8.2.2022]. Saatavissa: <https://urn.fi/URN:NBN:fi-fe2019032810358>

Helen Oy, 2018. Jättimäinen luolalämpövarasto toteutetaan Helsingin Mustikkamaalle. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 25.7.2022]. Saatavissa: https://www.helen.fi/uutiset/2018/mustikkamaa_toteutus

Helen Oy, 2020. Helen jatkaa investointeja hiilineutraaliuteen: Helsinkiin uusi, maailman suurimpiin kuuluva lämpöpumppu, joka mahdollistaa kivihiilen käytön vähentämisen nopeammin. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 6.3.2022]. Saatavissa: <https://www.helen.fi/uutiset/2020/uusi-lampopumppu>

Helen Oy, 2021. Meriveden lämmöntalteenoton selvitys etenee, mukaan uusia vaihtoehtoja ja uusi yhteistyökumppani. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 14.7.2022]. Saatavissa: <https://www.helen.fi/uutiset/2021/meriveden-lammontalteenoton-selvitys-etenee-mukaan-uusia-vaihtoehtoja-ja-uusi-yhteistyokumppani>

Helen Oy, 2022a. Avoin kaukolämpö. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 25.7.2022]. Saatavissa: <https://www.helen.fi/yritykset/lampo-yrityksille/avoin-kaukolampo>

Helen Oy, 2022b. Vuosaaren biolämpölaitos. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 25.7.2022]. Saatavissa: <https://www.helen.fi/helen-oy/energia/kehityshankkeet/biolampolaitokset/vuosaari>

Helen Oy, 2022c. Ruskeasuon geolämpölaitos. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 28.1.2022]. Saatavissa: <https://www.helen.fi/helen-oy/energia/kehityshankkeet/biolampolaitokset/ruskeasuon-geolampolaitos>

Helin K., Syri S., Zakeri B., 2018. Improving district heat sustainability and competitiveness with heat pumps in the future Nordic energy system. Energy Procedia, Volume 149, s.455-464. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 10.11.2021]. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.08.210>

Hyvärinen J., 2019. Nuclear energy research activities at LUT. SMR Seminar and MOTEL inauguration. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 12.2.2022]. Saatavissa: <https://finnuclear.fi/wp-content/uploads/2019/10/1-LUT-Hyv%C3%A4rinen-Ydintekniikka-LUTissa-20191017-JHy.pdf>

IEA, 2021. Low-temperature district heating: heating our homes at lower cost. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 25.2.2022]. Saatavissa: <https://www.iea.org/articles/low-temperature-district-heating-heating-our-homes-at-lower-cost>

IPCC, 2018. Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 3.3.2022]. Saatavissa: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/06/SR15_Full_Report_Low_Res.pdf

IRENA, 2017. Renewable Energy in District Heating and Cooling: A Sector Roadmap for REmap, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 2.11.2021]. ISBN 978-92-9260-017-4. Saatavissa: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2017/Mar/IRENA_REmap_DHC_Report_2017.pdf

IRENA, 2021. World Energy Transitions Outlook: 1.5°C Pathway, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 3.3.2022]. ISBN 978-92-9260-334-2. Saatavissa: <https://irena.org/publications/2021/Jun/World-Energy-Transitions-Outlook>

IRENA, 2022. Smart Electrification with Renewables: Driving the transformation of energy services, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 20.6.2022]. ISBN: 978-92-9260-367-0. Saatavissa: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Feb/IRENA_Smart-Electrification_Renewables_2022.pdf

IRENA & Aalborg University, 2021. Integrating low-temperature renewables in district energy systems: Guidelines for policy makers, International Renewable Energy Agency, Aalborg University, Abu Dhabi, Copenhagen. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 8.11.2021]. ISBN 978-92-9260-316-8. Saatavissa: https://vbn.aau.dk/ws/portalfiles/portal/406326231/Integrating_low_temperature_renewables_in_district_energy_systems_Guidelines_for_policy_makers_2021.pdf

IRENA, IEA & REN21, 2020. Renewable Energy Policies in a Time of Transition: Heating and Cooling. IRENA, OECD/IEA and REN21. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 24.11.2021]. ISBN 978-92-9260-289-5. Saatavissa: <https://www.iea.org/reports/renewable-energy-policies-in-a-time-of-transition-heating-and-cooling>

Joronen J., Salhoja P., Vähätiitto J., 2021. Selvitys polttoon perustumattomaan ja hiilinegatiiviseen kaukolämpöön siirtymisestä. Tampereen sähkölaitos. [Verkkójulkaisu]. [Viitattu 8.10.2021]. Saatavissa: https://www.sahkolaitos.fi/globalassets/tiedostot/ohjeet-ja-opasteet/sahkolaitos/vuosiraportit-ja-tilinpaatokset/sahkolaitos_raportti_01092021.pdf

Kaksonen A., 2021. Hukkalämpöjen hyödyntäminen kaukolämpöverkossa. [Verkkójulkaisu]. [Viitattu 1.11.2021]. Saatavissa: <https://urn.fi/URN:NBN:fi-fe2021072641710>

Kauppila K., 2018. Energiaväylä, Pienen aluelämpöverkon hyödyntäminen matalalämpöisenä sekä lämmönlähteiden ja säästöjen tarkastelu, osa 1 yleistarkastelu. EnerSys CM Oy. [Verkkójulkaisu]. [Viitattu 6.7.2022]. Saatavissa: <https://sykli.fi/wp-content/uploads/2018/06/mlt-raportti-osa-1-20180528-20180506.pdf>

Kokkonen T., 2020. District heating in energy sector decarbonization - case Espoo. [Verkkójulkaisu]. [Viitattu 16.11.2021]. Saatavissa: <https://aaltodoc.aalto.fi/handle/123456789/47186>

Koskelainen L., Saarela R., Sipilä K., 2006. Kaukolämmön käsikirja. Energiateollisuus ry. Helsinki: Libris Oy. ISBN 952-5615-08-1

KPA Unicon Group Oy, 2022. Fortumin uusi biolämpölaitos vastaanotettu. [Verkkójulkaisu]. [Viitattu 25.7.2022]. Saatavissa: <https://www.kpau-nicon.com/fi/blog/2020/05/26/fortumin-uusi-biolampolaitos-vastaanotettu-ymparistoystavallista-kaukolampoa-espooseen-kpa-uniconin-toimittamalla-ratkaisulla/>

Leppänen J., 2021. Low-temperature District Heating and Desalination Reactor (LDR) Technology, EcoSMR district heating reactor webinar, VTT Technical Research Centre of Finland Ltd. [Verkkójulkaisu]. [Viitattu 2.11.2021]. Saatavissa: https://www.ecosmr.fi/wp-content/uploads/2021/06/Leppanen_EcoSMR_15062021.pdf

Lindroos T. J., Mäki E., Koponen K., Hannula I., Kiviluoma J., Raitila J., 2021. Replacing fossil fuels with bioenergy in district heating – Comparison of technology options. VTT Technical Research Centre of Finland. Energy, Volume 231, 120799. [Verkkójulkaisu]. [Viitattu 3.5.2022]. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120799>

Lund H., Werner S., Wiltshire R., Svendsen S., Thorsen J. E., Hvelplund F., Mathiesen B. V., 2014. 4th Generation District Heating (4GDH): Integrating smart thermal grids into

future sustainable energy systems. *Energy*, Volume 68, s.1-11. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 3.11.2021]. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.02.089>

Maaskola I., Kataikko M., 2014. Ylijäämälämmön taloudellinen hyödyntäminen Lämpöpumppu- ja ORC-sovellukset. Motiva, Helsinki, tammikuu 2014. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 31.5.2022]. Saatavissa: https://www.motiva.fi/files/13513/Ylijaamalammon_taloudellinen_hyodyntaminen_Lampopumppu- ja_ORC-sovellukset.pdf

Mathiesen B. V., Bertelsen N., Schneider N. C. A., García L. S., Paardekooper S., Thellufsen J. Z., Djørup S. R., 2019. Towards a decarbonised heating and cooling sector in Europe: Unlocking the potential of energy efficiency and district energy. Aalborg Universitet. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 12.5.2022]. Saatavissa: https://vbn.aau.dk/ws/portalfiles/portal/316535596/Towards_a_decarbonised_H_C_sector_in_EU_Final_Report.pdf

Moser S., Puschnigg S., 2021. Supra-Regional District Heating Networks: A Missing Infrastructure for a Sustainable Energy System. *Energies* 14, 3380. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 25.2.2022]. Saatavissa: <https://doi.org/10.3390/en14123380>

Motiva, 2020. Kaukolämmön tuottaminen aurinkolämmöllä. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 9.11.2021]. Saatavissa: https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkolampo/aurinkolampojarjestelmat/kaukolammon_tuottaminen_aurinkolammolla

Motiva, 2021. Mikä on energiatodistus?. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 14.7.2022]. Saatavissa: https://www.motiva.fi/ratkaisut/energiatodistusneuvonta/mika_on_energiatodistus

Motiva, 2022. Kaukolämmön hinta. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 23.5.2022]. Saatavissa: https://www.motiva.fi/koti_ja_asuminen/rakentaminen/lammitysjarjestelman_valinta/lammitysmuodot/kaukolampo/kaukolammon_hinta

Mäkelä V., Tuunanen J., 2015. Suomalainen kaukolämmitys. Mikkelin ammattikorkeakoulu. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 23.5.2022]. ISBN 978-951-588-507-4. Saatavissa: <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/97138/URNISBN9789515885074.pdf>

Nord Pool, 2022. Market data, Day-ahead prices. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 4.8.2022]. Saatavissa: <https://www.nordpoolgroup.com/en/Market-data1/Dayahead/Area-Prices/FI/Weekly/?view=chart>

Oilon Group Oy, 2021a. Heat pump enables communications between district heating and power systems. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 12.5.2022]. Saatavissa: <https://oilon.com/en-gb/heat-pump-enables-communications-between-district-heating-and-power-systems/>

Oilon Group Oy, 2021b. Oilonin teollisuuslämpöpumput tekevät bittien sivuvirroista tamperelaisille kaukolämpöä. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 25.7.2022]. Saatavissa: <https://oilon.com/fi/oilonin-teollisuuslampopumput-tekevät-bittien-sivuvirroista-tamperelaisille-kaukolampoa/>

Oulun Energia Oy, 2022. Voimalaitokset. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 25.7.2022]. Saatavissa: <https://www.ouluenergia.fi/ouluenergia/energiantuotanto/voimalaitokset/>

Paardekooper S., Lund R. S., Mathiesen B. V., Chang M., Petersen U. R., Grundahl L., David A., Dahlbæk J., Kapetanakis I. A., Lund H., Bertelsen N., Hansen K., Drysdale D. W., Persson U., 2018. Heat Roadmap Finland: Quantifying the Impact of Low-Carbon Heating and Cooling Roadmaps. Aalborg University. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 4.3.2022]. Saatavissa: https://vbn.aau.dk/ws/portalfiles/portal/287929983/Country_Roadmap_Finland_20181005.pdf

Paiho S., Reda F., 2016. Towards next generation district heating in Finland. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 65, November 2016, s.915-924. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 1.12.2021]. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.07.049>

Paiho S., Saastamoinen H., 2018. VTT Technical Research Centre of Finland Ltd. How to develop district heating in Finland?. Energy Policy, Volume 122, s.668-676. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 11.12.2021]. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.08.025>

Partanen R., 2019. Nuclear District Heating in Finland, The Demand, Supply and Emissions Reduction Potential of Heating Finland with Small Nuclear Reactors. Think Atom. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 12.2.2022]. ISBN 978-952-7139-14-1. Saatavissa: https://thinkatom-net.files.wordpress.com/2019/04/nuclear-district-heating-in-finland_1-2_web.pdf

Pekkala J., 2018. Aurinkolämpö osana kaukolämpöjärjestelmää. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 23.2.2022]. Saatavissa: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/152569/Pekkala_Joni.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Planora Oy, 2022. Yrityksen omat materiaalit sekä käydyt keskustelut. Saatavissa: rajoitettu saatavuus

Polar Night Energy, 2022. Verkkosivut. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 6.3.2022]. Saatavissa: <https://polarnightenergy.fi/>

Pöyry, 2010. Kaukolämpöjärjestelmän paluueden hyväksikäyttö kiinteistöjen lämmityksessä. Selvitys 60N50162.01-E0001, 24.2.2010. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 8.2.2022]. Saatavissa: <https://docplayer.fi/1158112-Energiateollisuus-ry.html>

Pöyry Management Consulting Oy, 2016. Kaksisuuntaisen kaukolämmön liiketoimintamallit. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 12.12.2021]. Saatavissa: https://media.sitra.fi/2017/02/27175247/Kaksisuuntaisen_kaukolammon_liiketoimintamallit-2.pdf

Rinne S., Auvinen K., Reda F., Ruggiero S., Temmes A., 2018. Clean district heating - how can it work? Smart Energy Transition. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 25.1.2022]. Saatavissa: http://smartenergytransition.fi/wp-content/uploads/2018/11/Clean-DHC-discussion-paper_SET_2018.pdf

Rämä M., Klobut K., 2020. Hukkalämpö kaukolämpöjärjestelmissä. VTT Asiakasraportti, vol. VTT-CR-00340-20, VTT Technical Research Centre of Finland. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 28.1.2022]. Saatavissa: https://energia.fi/files/4831/Hukkalampo_kaukolampojarjestelmissa_-_maarittely_ja_luokittelu_VTT_2020.pdf

Rämä M., Niemi R., Similä L., 2015. Poistoilmalämpöpumput kaukolämpöjärjestelmässä. VTT Asiakasraportti, vol. VTT-CR-00564-15, VTT Technical Research Centre of Finland. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 20.10.2021]. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2015/VTT-CR-00564-15.pdf>

Savon Voima Oyj, 2021. Kaksisuuntainen kaukolämpöjärjestelmä vie Leppävirtaa harppauksen kohti hiilinegatiivisuustavoitetta. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 25.7.2022]. Saatavissa: <https://savonvoima.fi/kaksisuuntainen-kaukolampojarjestelma-vie-leppavirtaa-harppauksen-kohti-hiilinegatiivisuustavoitetta/>

Savon Voima Oyj, 2022. Savon Voiman Joensuun voimalaitoksen uudistus vie kohti hiili-neutraalia lämmön- ja sähköntuotantoa. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 25.7.2022]. Saatavissa: <https://savonvoima.fi/savon-voiman-joensuun-voimalaitoksen-uudistus-vie-kohti-hiilineutraalia-lammon-ja-sahkontuotantoa/>

Sitra, 2019. District heating from waste water, Turku. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 11.7.2022]. Saatavissa: <https://www.sitra.fi/en/cases/district-heating-from-waste-water-turku/>

Soimakallio S., Sankelo P., Kopsakangas-Savolainen M., Sederholm C., Auvinen K., Hei-
nonen T., Johansson A., Judl J., Karhinen S., Lehtoranta S., Rasanen S., Savolainen H., 2020.
Turveraportti: Turpeen rooli ja sen käytöstä luopumisen vaikutukset Suomessa. Sitra. Tek-
ninen raportti. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 7.4.2022]. ISBN 978-952-347-186-3. Saatavissa:
<https://www.sitra.fi/julkaisut/turpeen-rooli-ja-sen-kaytosta-luopumisen-vaikutukset-suomessa/>

ST1, 2022. Ajankohtaista geolämmöstä. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 5.3.2022]. Saatavissa:
<https://www.st1.fi/geolampo>

Sun F., Fu L., Sun J., Zhang S., 2014. A new waste heat district heating system with com-
bined heat and power (CHP) based on ejector heat exchangers and absorption heat pumps.
Energy, Volume 69, s.516-524. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 2.11.2021]. Saatavissa:
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.03.044>

Suomen virallinen tilasto (SVT), 2021a. Polttoaineluokitus 2021. Polttoainemikkeiden ja
muiden energialähteiden määritelmät 2021. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 8.11.2021]. Saata-
vissa: https://tilastokeskus.fi/tup/khkinv/khkaasut_polttoaineluokitus.html

Suomen virallinen tilasto (SVT), 2021b. Sähkön ja lämmön tuotanto, liitekuvio 5: Kauko-
lämmön tuotanto polttoaineittain 2000–2020. Helsinki: Tilastokeskus. [Verkkajulkaisu].
[Viitattu 3.11.2021]. ISSN 1798-5072. Saatavissa: http://www.stat.fi/til/salatuo/2020/salatuo_2020_2021-11-02_kuv_005_fi.html

Sweco, 2022. Varkauteen suunnitellaan kansallisesti ainutlaatuista kaukolämpövarastoa.
[Verkkajulkaisu]. [Viitattu 25.4.2022]. Saatavissa: [https://www.sweco.fi/ajankohtaista/uuti-
set/varkauteen-suunnitellaan-kansallisesti-ainutlaatuista-kaukolampovarastoa/](https://www.sweco.fi/ajankohtaista/uutiset/varkauteen-suunnitellaan-kansallisesti-ainutlaatuista-kaukolampovarastoa/)

Tampereen sähkölaitos Oy, 2021. Kaukolämmön tulevaisuus. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu
8.10.2021]. Saatavissa: [https://www.sahkolaitos.fi/yrityksille-ja-taloyhtiaille/lamporatkai-
sut/kaukolammon-tulevaisuus/](https://www.sahkolaitos.fi/yrityksille-ja-taloyhtiaille/lamporatkaisut/kaukolammon-tulevaisuus/)

Tampereen sähkölaitos Oy, 2022. Hiilidioksidin talteenotto ja hyödyntäminen. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 25.7.2022]. Saatavissa: <https://www.sahkolaitos.fi/yrityksille-ja-taloyhtiaille/lamporatkaisut/hiilidioksidin-talteenotto-ja-hyodyntaminen/>

Tilastokeskus, 2021. Kasvihuonekaasupäästöt laskivat 2020, kansainväliset velvoitteet vuosille 2013–2020 saavutettavissa. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 12.2.2022]. Saatavissa: https://www.stat.fi/til/khki/2020/khki_2020_2021-12-16_tie_001_fi.html

Tulkki V., Pursiheimo E., Lindroos T., 2017. District heat with Small Modular Reactors (SMR). VTT technical research centre of Finland. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 14.2.2022]. Saatavissa: <https://www.vttresearch.com/sites/default/files/julkaisut/muut/2017/OA-District-heat-with-Small.pdf>

Turku Energia, 2021. Ensimmäisenä Suomessa! Kaksisuuntainen matalalämpöverkko lämmitää taloja Skanssissa. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 25.7.2022]. Saatavissa: <https://www.turkuenergia.fi/valopilkku/lammitys-ja-jaahdytys/ensimmaisena-suomessa-kaksisuuntainen-matalalampoverkko-lammitaa-taloja-skanssissa/>

Turunen J., 2019. Kaukolämpöakun käytön optimointi ja lyhyen aikavälin suunnittelu. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 6.3.2022]. Saatavissa: <https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/123456789/27207/Turunen.pdf?sequence=4>

TVO, 2022. OL3 Rakenne ja tekniset tiedot. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 9.2.2022]. Saatavissa: <https://www.tvo.fi/tuotanto/laitosyksikot/ol3/rakennejateknisetiedot.html>

Työ- ja elinkeinoministeriö, 2021a. Turvetyöryhmä, työpaperi. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 13.4.2022]. Saatavissa: [https://tem.fi/documents/1410877/67934370/Turvety%C3%B6ryhm%C3%A4,+ty%C3%B6paperi+30.03.21.pdf/e03ce6ed-5858-c9bb-962f-9c944244e146/Turvety%C3%B6ryhm%C3%A4,+ty%C3%B6pa-](https://tem.fi/documents/1410877/67934370/Turvety%C3%B6ryhm%C3%A4,+ty%C3%B6paperi+30.03.21.pdf/e03ce6ed-5858-c9bb-962f-9c944244e146/Turvety%C3%B6ryhm%C3%A4,+ty%C3%B6paperi+30.03.21.pdf?t=1617109410705)

Työ- ja elinkeinoministeriö, 2021b. Sektori-integraatiotyöryhmän loppuraportti. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 12.5.2022]. ISBN 978-952-327-697-0. Saatavissa: https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/163298/TEM_2021_47.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Vaasan Sähkö Oy. 2019. Kestävän kehityksen investointi kannatti: lämpövarasto laski päästöjä 10,5 %. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 25.7.2022]. Saatavissa:

<https://www.sttinfo.fi/tiedote/kestavan-kehityksen-investointi-kannatti-lampovarasto-laskipaastoja-105-?publisherId=58661976&releaseId=69908975>

VALOR Partners Oy, 2015. Kaukolämmön kysyntäjousto. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 28.6.2022]. Saatavissa: https://energia.fi/files/439/Kaukolammon_kysyntajousto_loppuraportti_VALOR.pdf

VALOR Partners Oy, 2016. Suuret lämpöpumput kaukolämpöjärjestelmässä tiivistelmä. Energiateollisuus ry. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 10.11.2021]. Saatavissa: https://energia.fi/files/977/Suuret_lampopumput_kl-jarjestelmassa_Tiivistelma.pdf

Valtioneuvosto, 2021. Lämpöpumppujen, konesalien ja sähkökattiloiden sähköveroalennukselle tukea selvityksestä. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 24.1.2022]. Saatavissa: <https://valtioneuvosto.fi/-/10623/polttoon-perustumattoman-lammontuotannon-kilpailukykyvoitaisiin-parantaa-sahkoveronalennuksilla>

Valvira, 2016. Asumisterveysasetuksen soveltamisohje. Osa I, Asumisterveysasetus § 1-10, Ohje 8/2016. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 20.6.2022]. Saatavissa: <https://www.valvira.fi/documents/14444/261239/Asumisterveysasetuksen+soveltamisohje/ac8d5e16-97be-456c-9c9c-ce8560f2092e>

Vantaan Energia, 2021a. Lämpövaraston rooli osana kehittyvää kaukolämpöjärjestelmää. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 25.7.2022]. Saatavissa: <https://www.vantaanenergia.fi/lampovaraston-rooli-osana-kehittyvaa-kaukolampoa/>

Vantaan Energia, 2021b. Vantaan Energian jätevoimalan laajennus mahdollistaa kivihielestä luopumisen jo vuonna 2022. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 25.7.2022]. Saatavissa: <https://www.vantaanenergia.fi/vantaan-energian-jatevoimalan-laajennus-mahdollistaa-kivihielestä-luopumisen-jo-vuonna-2022/>

Varmelast, 2021. The story - in brief. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 13.12.2021]. Saatavissa: <https://www.varmelast.dk/om-varmelast/historien-kort>

VTT, 2021. Kohti puhdasta kaukolämpöä: Merkittävä patentti VTT:n kehittämälle pienydinreaktorin jäähdytysratkaisulle. Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 14.2.2022]. Saatavissa: <https://www.vttresearch.com/fi/uutiset-ja-tarinat/kohti-puhdasta-kaukolampoa-merkittava-patentti-vtt-kehittamalle>

Yle, 2018. Ensimmäisenä Suomessa: Tampereen Hiedanrannassa tuotetaan hiilidioksidinegatiivista kaukolämpöä, Yle Uutiset. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 15.12.2021]. Saatavissa: <https://yle.fi/uutiset/3-10470198>

Yle, 2020. Vantaalle louhitaan maailman suurin lämpövarasto, turpeen käyttö lopetetaan ja jätevoimalaa laajennetaan – fossiiliset polttoaineet jäävät pois vuonna 2026. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 25.7.2022]. Saatavissa: <https://yle.fi/uutiset/3-11556904>

Yle, 2021. Hiekka voi olla uusi mahdollisuus varastoida energiaa – Kankaanpähän rakennetaan maailman ensimmäinen hiekka-akku kaupalliseen tarkoitukseen, Yle Uutiset, Energia. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 28.11.2021]. Saatavissa: <https://yle.fi/uutiset/3-12151803>

Ympäristöministeriö, 2021. Hiilineutraali Suomi 2035, Hallituksen ilmastopolitiikka: kohti hiilineutraalia Suomea 2035. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 14.10.2021]. Saatavissa: <https://ym.fi/hiilineutraalisuomi2035>

Ympäristöministeriö, 2022. Rakentamismääräykset. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 13.1.2022]. Saatavissa: <https://ym.fi/rakentamismaaraykset>

Zhang L., Li Y., Zhang H., Xu X., Yang Z., Xu W., 2021. A review of the potential of district heating system in Northern China. *Applied Thermal Engineering*, Volume 188, April 2021, 116605. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 17.11.2021]. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.116605>

Zhang Y., Johansson P., Kalagasidis A. S., 2021. Applicability of thermal energy storage in future low-temperature district heating systems – Case study using multi-scenario analysis. *Energy Conversion and Management*, Volume 244, 15 September 2021, 114518. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 17.11.2021]. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114518>

LIITE 1: Suomalaisen kaukolämmityksen kehitysvaiheet.

