



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

Kaukojäähdytyksen potentiaali Suomessa

Joona Seppä

Ympäristötekniikka

Kandidaatintyö

Lokakuu 2022

TIIVISTELMÄ

Kaukojäähdytyksen potentiaali Suomessa

Joona Seppä

Oulun yliopisto, Ympäristötekniikan tutkinto-ohjelma

Kandidaatintyö lokakuu 2022

Työn ohjaaja yliopistolla: DI- Jari Pulkkinen

Tässä kandidaatintyössä tutkittiin kaukojäähdytyksen tämänhetkistä tilannetta, sekä sen tulevaisuuden potentiaalia Suomessa. Työssä selvitettiin kaukojäähdytyksen tämänhetkisiä tuotantomääriä ja tapoja, sekä arvioitiin niiden muutoksia tulevaisuudessa. Tarkemmin tarkasteltiin suomessa käytettäviä kaukojäähdytyksen tuotantomenetelmiä, jakelumenetelmiä, sekä tämänhetkisiä tuotantomääriä ja paikkoja. Lopuksi tutkittiin voisiko kaukojäähdytyksellä olla enemmän kysyntää tai sovelluskohteita tulevaisuutta ajatellen, sekä kaukojäähdytyksen tämänhetkisiä ongelmia ja mahdollisia tulevaisuuden ratkaisuja. Tutkimus suoritettiin kirjallisuusselvityksenä.

Tutkimustulokset osoittivat, että kaukojäähdytys on ympäristöystävällinen ja energiatehokas tapa tuottaa viilennystä. Kaukojäähdytystä tuotetaan kompressoriteknikalla, absorptiotekniikalla, lämpöpumpuilla, sekä vapaajäähdytyksenä. Näistä yleisimmät tuotantotavat ovat vapaajäähdytys ja lämpöpumppujäähdytys. Kaukojäähdytyksen jakelu tapahtuu maanalaisia verkostoja pitkin kuten kaukolämmönkin.

Suomessa kaukojäähdytystä tuotettiin 336 GWh vuonna 2021, joka on kolme kertaa enemmän kuin esimerkiksi vuonna 2010, jolloin kaukojäähdytystä tuotettiin 110 GWh. Suomessa kaukojäähdytystä on saatavilla melkein kaikissa suurkaupungeissa, mutta haja-asutusalueilla sitä ei ole ollenkaan. Suomessa suurimmat kaukojäähdytyksen tuottajat ovat Helen Oy, Turku Energia Oy, Tampereen Sähkölaitos Oy, sekä Fortum Power and Heat Oy.

Kaukojäähdytyksen tuotannossa ja jakelussa suurin ongelma on kaukojäähdytysverkkojen hidas ja kallis rakentaminen, mikä rajoittaa niiden rakentamista. Kaukojäähdytyksen kysynnän arvioidaan nousevan tulevaisuudessa, johtuen ilmastonlämpenemisestä ja rakennuskannan kasvusta. Kaukojäähdytyksellä uskotaan olevan suuri rooli tulevaisuuden älykkäissä energiajärjestelmissä, sekä on tutkittu että sitä voitaisiin soveltaa myös harvemmin asutuille alueille laitteistojen hyötysuhteiden parantuessa.

Asiasanat: Kaukojäähdytys, Kaukokylmä, CHC

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ	1
SISÄLLYSLUETTELO.....	3
1 Johdanto	5
2 Kaukojäähdytyksen tuotanto.....	6
2.1 Kompressorijäähdytys.....	7
2.1.1 Kylmäaineet.....	8
2.2 Lämpöpumput	10
2.2.1 CHC- lämpöpumpulaitos	11
2.2.2 Absorptiolämpöpumppu	11
2.3 Vapaajäähdytys	13
2.4 Kaukojäähdytyksen jakeluverkosto	16
2.4.1 Eristetyt ja eristämättömät kaukojäähdytysputket.....	16
2.4.2 Putkistoa kuormittavat tekijät.....	17
2.5 Asiakkaat, käyttökohteet ja ongelmat	19
3 Kaukojäähdytys suomessa	20
3.1 Tarjoajat suomessa	21
3.1.1 Fortum.....	21
3.1.2 Helen.....	23
3.1.3 Tampereen sähkölaitos	25
3.1.4 Turku energia.....	26
3.1.5 Muut kaukojäähdytystä tuottaneet yritykset.....	27
3.2 Yleisesti.....	28
4 Kaukojäähdytys tulevaisuudessa.....	31
4.1 Ilmastonmuutoksen vaikutus jäähdytyksen tarpeeseen.....	31
4.2 Rakennuskannan muutos.....	32
4.3 Uusia teknologioita	32
4.3.1 Älykkäät sähköverkot	32
4.3.2 Yleiset parannukset.....	34
5 Johtopäätökset ja pohdinta	35
5.1 Pohdinta.....	37
6 Yhteenveto	39
7 Lähteet.....	40

1 JOHDANTO

Kaukojäähdytystä on tuotettu Suomessa jo vuodesta 1998 alkaen. Se on kuitenkin noussut pinnalle vasta muutamia vuosia sitten johtuen EU:n uusista ympäristöpakotteista. Kaukojäähdytyksellä pyritään vähentämään sähkönkulutusta, sekä luomaan kulutusjoustoja suomalaisen sähköverkon käyttäjille. Kaukojäähdytys toimii tekniikkana hyvin samalla tavalla kuin kaukolämpö. Kaukojäähdytyksellä pystytään talteen ottamaan lämpöä sellaisista paikoista, missä se muuten menisi hukkaan. Kaukojäähdytyksellä pystytään viilentämään asuin- ja työtiloja, joista saadaan samalla lämpöä hyödynnettäväksi esimerkiksi käyttövetenä, sekä teollisuuden prosesseissa. Kaukojäähdytyksellä tuotettu kylmä on ympäristöystävällisempää, kuin paikallisjäähdytyksellä, eli ilmalämpöpumpuilla ja viilennyslaitteilla tuotettu kylmä. Kaukojäähdytyksen etuna on myös, että se siirtää meluisat viilennyslaitteet pois kaupunkiympäristöistä ja sijoittaa kylmäntuotannon yhteen paikkaan. Näin saadaan vähennettyä myös kylmäaineista aiheutuvaa meluhaittaa. (Laitinen et al. 2016)

Kaukojäähdytys on Suomessa yleistynyt teknologia, joka tarjoaa vaihtoehdon paikallisille jäähdytyslaitteille kaupunkiympäristöissä lisääntyneeseen jäähdytystarpeeseen. Kaukojäähdytys toimii kaukolämmön tavoin ja sitä voidaan käyttää esimerkiksi asuin- ja toimistotilojen viilennykseen. (Laitinen et al. 2016)

Tämän kandidaatintyön tavoitteena oli selvittää kaukojäähdytyksen tämänhetkinen tilanne Suomessa, sekä sen mahdollinen potentiaali tulevaisuudessa. Työ suoritettiin kirjallisuusselvityksenä.

Työn tutkimuskysymykset

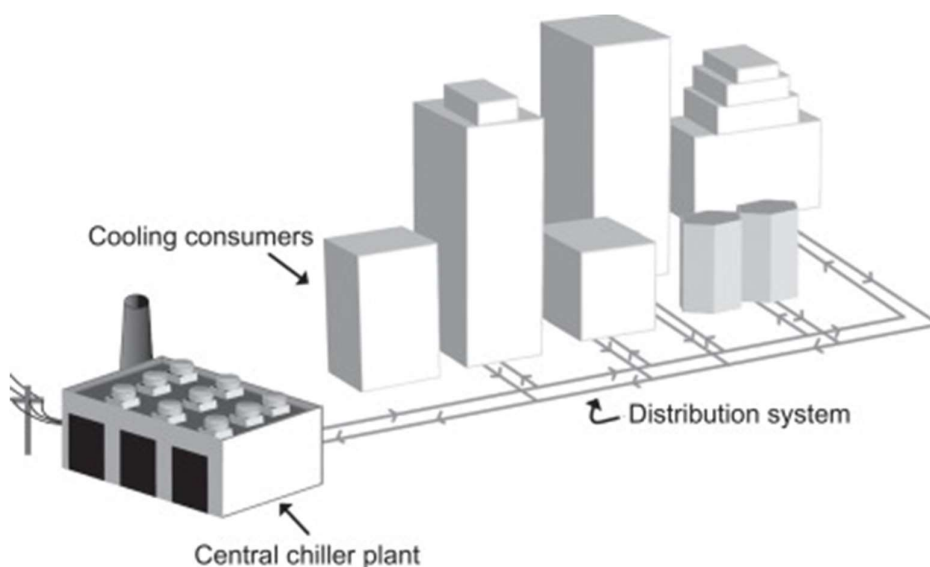
1. Minkälaisilla tekniikoilla kaukojäähdytystä tuotetaan, siirretään ja jaetaan?
2. Millainen rooli kaukokylmällä on Suomessa tällä hetkellä?
3. Millainen potentiaali kaukokylmällä on Suomessa tulevaisuudessa?

2 KAUKOJÄÄHDYTYKSEN TUOTANTO

Kaukojäähdytys voidaan systeeminä jakaa kolmeen osaan tuotanto, siirto, sekä jakelu. Kaukojäähdytyksen tuotantoon voidaan käyttää, joko mekaaniseen jäähdytykseen perustuvia menetelmiä, tai luonnonkylmään perustuvia menetelmiä. Yleisimpiä mekaanisia menetelmiä ovat kompressorijäähdytys ja lämpöpumppujäähdytys. Kuvassa 1. on esitelty yksinkertainen kaukojäähdytyssysteemi ja sen eri osat. (Tredinnick & Phetteplace , 2016, s. 167-188.)

Usein kaukojäähdytyssysteemit toimivat synergiassa kaukolämmityssysteemien kanssa. Esimerkiksi Sähkön ja lämmön yhteistuotantolaitoksissa (Combined heat and power, CHP) prosessissa syntyvä hukkalämpö voidaan käyttää hyödyksi, joko kaukolämpönä tai tarvittaessa kaukokylmänä absorptioprosessin avulla. (U.S. Department of energy, 2021)

Kaukolämmön ja jäähdytyksen tuotantolaitoksessa (Combined heating and cooling, CHC) kaukojäähdytyksestä voidaan suoraan prosessoida kaukolämpöä ja kaukolämmöstä voidaan prosessoida kaukokylmää. (Kukkola, 2021)

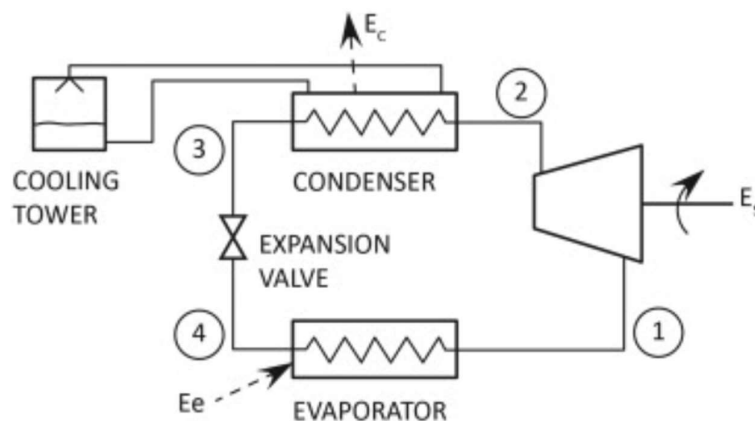


Kuva 1. Kaukojäähdytyssysteemi (Phetteplace et al., 2013)

2.1 Kompressorijäähdytys

Kompressorijäähdytys perustuu suljetussa systeemissä kiertävään kylmäaineeseen ja sen faasimuutoksiin, joita ohjataan paineen ja lämpötilan muuntelulla. Paineen muutos saadaan aikaan kompressorin tekemällä mekaanisella työllä. Kompressorina voidaan käyttää kierukka- eli scroll-kompressoria, mäntäkompressoria, ruuvikompressoria, tai turbokompressoria. Kuvassa 2. on esitetty kompressorijäähdyttimen toimintakaavio ja numeroitu eri toimintavaiheet. (Smith & Parmenter, 2016, s. 125–187.)

Kompressorijäähdytys soveltuu paremmin paikallisjäähdytykseen, mutta sitä voidaan käyttää myös kaukojäähdytyksen tuotantoon, mikäli valitaan suurempaan jäähdytyksen tuotantoon soveltuva kompressorityyppi. (Smith & Parmenter, 2016, s. 125–187.)



Kuva 2. Kompressorijäähdyttimen toimintakaavio (Smith & Parmenter, 2016, s. 125–187.)

Alla olevassa luettelossa on lueteltu kompressoritoimisen jäähdyttimen eri toimintavaiheet ja kylmäaineen faasimuunnokset. Vaiheet on merkitty numeroin kuvaan 2 (Smith & Parmenter, 2016, s. 125-187.):

1. Kompressori paineistaa höyrystimessä (Evaporator) täysin höyrystyneen kylmäaineen, sen matalasta höyrystymispaineesta vaadittuun kondenssi paineeseen nostamalla höyryn lämpötilaa.
2. Kuuma paineistettu kylmäainehöyry johdetaan lauhduttimelle (Condenser), jossa höyry kondensoituu vakioaineessa luovuttaen samalla lämpöä, joka johdetaan jäähdytystorniin tai muuhun lämpövarastoon.
3. Kondensoitunut korkeapaineinen nestemäinen kylmäaine johdetaan paineenalennusventtiilin kautta takaisin höyrystimelle.
4. Nestemäinen kylmäaine höyrystyy absorboiden lämpöenergiaa höyrystimestä ja sen ympäristöstä.

Käytettävissä olevista kompressoriteknologioista kaukojäähdytyksen tuotantoon soveltuvat parhaiten tehoalueensa puolesta Ruuvi- (0-5MW) ja Turbokompressorit (0-30MW). Mäntä ja kierukkakompressorit soveltuvat paremmin laitteisiin, joissa jäähdytyksentarve on alle 1MW. (Smith & Parmenter, 2016, s. 125–187.)

2.1.1 Kylmäaineet

Höyrykompressioon perustuvissa jäähdytysjärjestelmissä voidaan käyttää monia erilaisia kylmäaineita. Kylmäaineiden käyttöä ohjataan lainsäädännöllisesti arvoilla ilmastonlämmitys potentiaali (Global Warming Potential, GWP), sekä otsonikerroksen heikennys potentiaali (Ozone Depletion Potential, ODP). GWP-arvo mittaa kuinka suuri kasvihuonevaikutus on yhdellä kilolla tiettyä kylmäainetta sen vapautuessa ilmakehään. GWP-arvon vertailukohteena käytetään hiilidioksidia. Esimerkiksi mikäli yksi kilo HFC-134a kylmäainetta pääsee ilmakehään, sen kasvihuonevaikutus vastaa 1430 kiloa hiilidioksidia. ODP-arvo mittaa kylmäaineen suhteellista negatiivista vaikutusta otsonikerrokseen. ODP-arvon referenssilukuna käytetään kylmäaineen R11 otsonihaitallisuutta. Alla olevassa taulukossa 1. on eritelty yleisimpien kylmäaineiden GWP ja ODP lukuja. (Darment, 2022)

Taulukko 1. Yleisimpien kylmäaineiden GWP ja ODP arvoja (Linde- gas, 2022)

Kylmäaine	GWP	ODP
HFC-134a	1430	0
HCFC-123	77	0,02
Propaani (R290)	3,3	0
HFO-1234yf	4	0
CO ₂ (R-744)	1	0
Ammoniakki (R-717)	0	0

Kylmäaineiden GWP ja ODP arvoja säätelevän asetuksen (Montreal protocol) mukaan Euroopassa ei saa käyttää eikä valmistaa kylmäaineita, joiden ODP on suurempi kuin nolla, sekä kylmäaineita, joilla on keskiverto tai korkea GWP-arvo (150–2500 tai suurempi) tulisi vähentää. (IIFIIR, 2005)

Kylmäaineen valintaan vaikuttavat lainsäädännön lisäksi myös kylmäaineen termodynaamiset ominaisuudet, kuten lämpötila ja painevaatimukset, sekä haitallisuuteen vaikuttavat tekijät kuten syttyvyys ja myrkyllisyys. Ympäristöystävällisemmillä kylmäaineilla on kuitenkin heikompi hyötysuhde (Coefficient of performance, COP), joten ne vaativat suuremman määrän ulkoista työtä kylmän tuottamiseen kuin esimerkiksi valmistus- ja käyttökiellossa oleva R11. Alla olevassa taulukossa 2. on esitetty approksimoituja COP- arvoja joillekin kylmäaineille. (Coker, 2015, s. 623–727.)

Taulukko 2. Kylmäaineiden COP- arvoja (Coker, 2015, s. 623–727.)

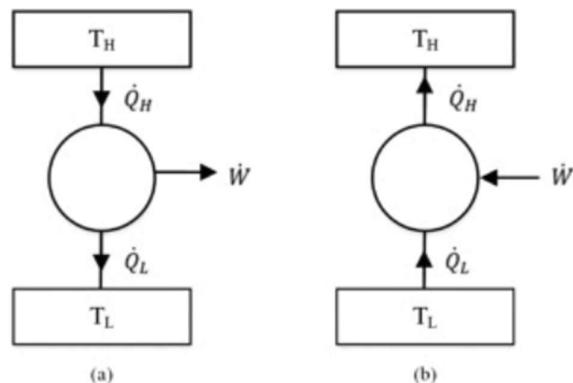
Kylmäaine	Coefficient of Performance
R-11	5,09
R-133	4,92
Ammoniakki (R-717)	4,76
R-12	4,7
R-22	4,66
CO ₂ (R-744)	2,56

2.2 Lämpöpumput

Lämpöpumppu on laite, joka siirtää lämpöä kahden kohteen välillä. Lämpöpumpulla voidaan siirtää lämpöä matalammasta lämpötilasta korkeampaan lämpötilaan, jolloin prosessi vaatii ulkoista työtä. Mikäli lämpöä siirretään korkeammasta lämpötilasta matalampaan lämpötilaan, prosessissa vapautuu energiaa ja pumppu toimii silloin lämpövoimakoneena. Lämpöpumpun avulla voidaan siis lämmitellä jotain tilaa tai viilentää sitä. Kuvassa 3. on lämpövoimakoneen ja lämpöpumpun energiakaaviot. (Assad, et al., 2021, s. 163–180.)

Lämpöpumput luokitellaan pääosin kolmeen ryhmään sen mukaan mitä tilaa ne käyttävät lämpövarastona. Yleisimmät lämpövarastot ovat ilma, vesi ja maa. Esimerkiksi jos halutaan viilentää tilaa, lämpövarastoon siirretään tällöin lämpöä lämpöpumpun työn avulla. Lämpövarastona voidaan käyttää myös teollisuuden prosesseja ja niissä tarvittavaa lämmitys tai viilennysenergiaa. Lämpöpumpuissa käytetään tehokkuuden mittarina samaa arvoa kuin kylmäaineissa eli COP-arvoa. Lämpöpumpun COP- arvo lasketaan lämpöpumpusta saadun lämpöenergian ja pumpun pyörittämiseen kuluvan energian suhteena. (Neave, 2002, s. 41–1–41–9.)

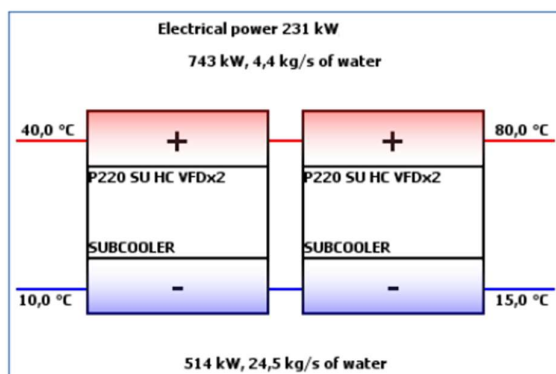
Lämpöpumput toimivat joko kompressorin avulla tai absorptioin avulla ja ne ovat yleisin tapa tuottaa kaukokylmää Suomessa. (Energiateollisuus, 2022)



Kuva 3. Lämpövoimakone (a) ja lämpöpumppu (b) (Assad, et al., 2021, s. 163–180.)

2.2.1 CHC- lämpöpumppulaitos

CHC-lämpöpumppulaitoksessa pystytään tuottamaan samoilla laitteilla, sekä kaukolämpöä että kaukokylmää hyödyntäen vastakkaisen prosessin hukkalämpöä. CHC-laitoksessa Kaukojäähdytyksestä saatava lämpö voidaan ohjata kaukolämpöverkkoon käytettäväksi esimerkiksi tehtaiden prosesseissa ja kaukolämpöverkosta tuleva viileä vesi voidaan prosessoida kaukojäähdytykseksi. (Kukkola, 2021)



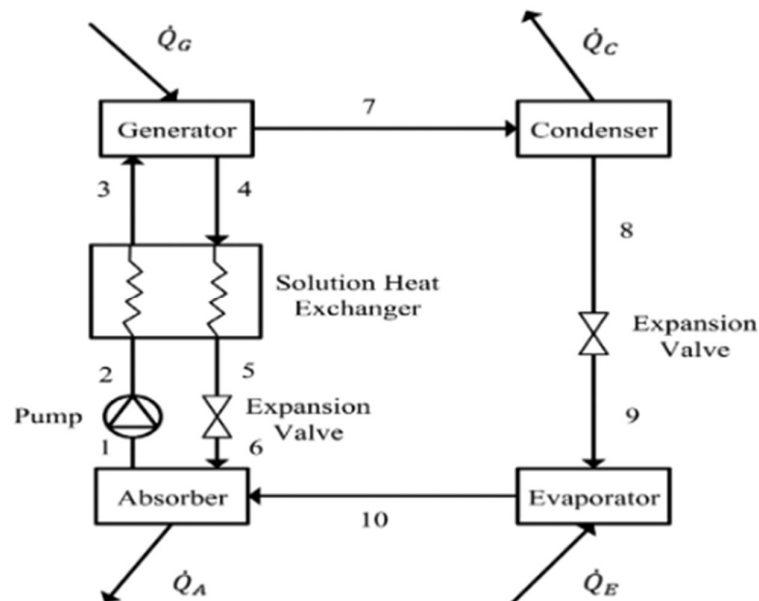
Kuva 4. CHC-lämpöpumpun toimintaperiaate (Kukkola, 2021)

Yllä olevassa kuvassa 4. on Oilonin 231kW CHC-lämpöpumppu. Pumpulla pystytään saavuttamaan 514kW viilennysteho, sekä 743kW lämmitysteho. CHC-pumppu käyttää lämpövarastona alueen kaukolämpöverkkoa ja pystyy hyödyntämään sieltä viileän paluueden käytettäväksi kaukojäähdytykseen. CHC- lämpöpumppuilla pystytään saavuttamaan noin 4–7 yhteenlaskettu COP-arvo ja yllä olevan kyseisen lämpöpumpun COP on 5,4. (Kukkola, 2021)

2.2.2 Absorptiolämpöpumppu

Absorptiolämpöpumpun toimintaperiaate perustuu kompressoripumpun tavoin kylmäaineen kiertoon. Absorptiolämpöpumpussa kuitenkin kiertää kylmäaineen lisäksi myös absorptioliuosta. Absorptioliuoksen käyttö vähentää jäähdytysprosessissa tarvittavan mekaanisen työn määrää ja on tällöin energiatehokkaampi verrattuna kompressoritoimiseen pumppuun. Absorptiopumppu eroaa CHC- lämpöpumpusta siten että se vaatii ulkoisen energialähteen ja sitä voidaan käyttää ainoastaan jäähdytykseen. Absorptiopumppu koostuu imeyttimestä (Absorber), höyrystimestä (Evaporator), lauhduttimesta (Condenser), keittimestä (Generator), sekä lämmönvaihtimesta,

liuos pumpusta ja paineenalennusventtiilistä. Kuvassa 5. on esitelty absorptiopumpun toimintakaavio. (Assad, et al., 2021, s. 163-180.)



Kuva 5. Yksivaiheisen absorptiopumpun toimintakaavio (Assad, et al., 2021, s. 163–180.)

Alla olevassa luettelossa on lueteltu absorptiolämpöpumpun toimintavaiheet ja kylmäaineiden faasimuunnokset. Toimintavaiheet on numeroitu kuvaan 5.

Vaiheet 1–3:

Kylmäaine/absorbentti liuos pumpataan matalapaineisesta imeyttimestä korkeapaineiseen keittimeen. Keittimeen tuodaan ulkoista lämpöä (Q_G), joko maalämmön avulla tai hyödyntämällä CHP-laitoksissa prosessin hukkalämpöä. Keittimen 80–120 asteen lämpötila erottelee kylmäaineen absorbentista. (Assad, et al., 2021, s. 163–180.)

Vaiheet 4–6:

Keittimessä eroteltu absorpentti kierrätetään takaisin imeyttimeen lämmönvaihtimen ja paineenalennusventtiilin kautta. Lämmönvaihtimessa absorpentti, joka on korkeassa lämpötilassa ja paineessa, luovuttaa keittimelle menevään liuokseen lämpöä. Paineenalennusventtiili laskee absorpentin lämpötilaa imeyttimeelle sopivaksi (Q_A). (Assad, et al., 2021, s. 163–180.)

Vaiheet 7–10

Korkeapaineinen kylmäainehöyry kondensoituu lauhduttimessa korkeapaineiseksi kylläiseksi nesteeksi. Kylmäaine luovuttaa tällöin lämpöä (Q_C) jäähdytystorniin. Kylmäaine kulkeutuu paineenalennusventtiilin kautta höyrystimelle, missä se ottaa vastaan lämpöä (Q_E) jäähdytettävästä tilasta ja höyrystyy matalapaineiseksi höyryksi. Kylmäainehöyry kulkeutuu imeyttimeen, missä se imeytyy absorpenttiin. (Assad, et al., 2021, s. 163–180.)

Riippuen absorptiolämpöpumpun koosta, yleisimmin kylmäaine/absorpentti parina käytetään joko ammoniakkaa ja vettä ($\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$) tai vettä ja litiumbromidia ($\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$). (Assad, et al., 2021, s. 163–180.)

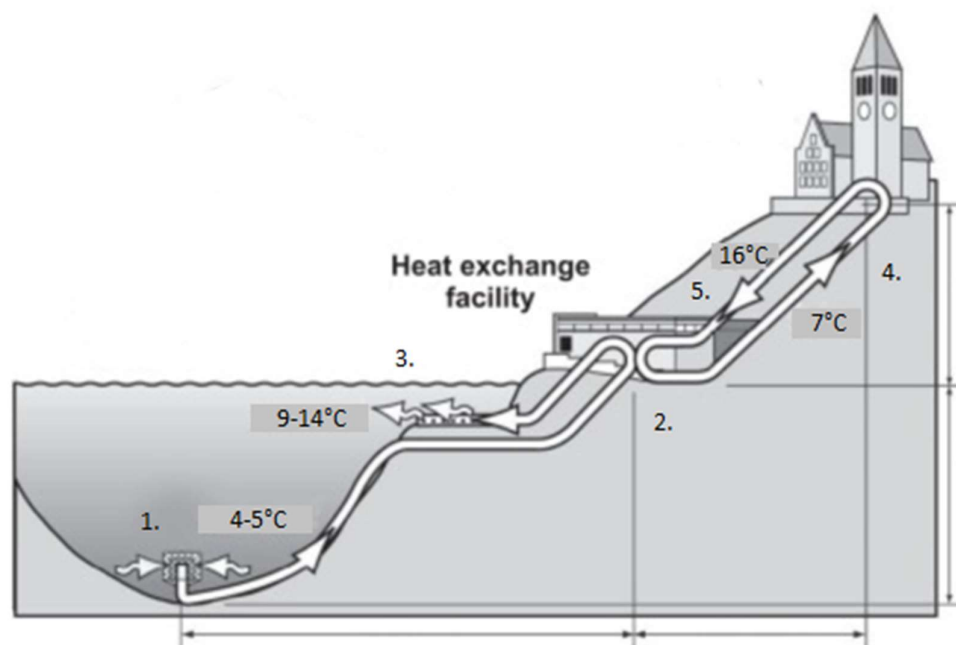
2.3 Vapaajäähdytys

Vapaajäähdytys on Kompressori- ja lämpöpumppujäähdytystä ekologisempi vaihtoehto ja se on, Energiateollisuus (2022) kaukojäähdytystilaston mukaan, Suomen toiseksi yleisin kaukojäähdytysmenetelmä. Vapaajäähdytys käyttää viilennykseen luonnon tarjoamia kylmänlähteitä, kuten luonnonvesiä, ilmaa, sekä lunta ja jäätä. Yleisin tapa tuottaa kaukojäähdytystä vapaajäähdytys periaatteella on kuitenkin luonnonvesien käyttö. (Energiateollisuus, 2022) Kuvassa 6. on esitelty vapaajäähdytyslaitos ja sen toimintaperiaate.

Vapaajäähdytyksessä viilennysteho saadaan vesistöjen syvänteiden kylmästä vedestä. Syvänteiden kylmällä vedellä voidaan jäähdyttää kaukojäähdytysverkossa kiertävää vettä, jolloin viilennykseen ei tarvita erillisiä viilennysyksiköitä, kuten kompressoreita.

Vedellä jäähdyttäminen tapahtuu levylämmönvaihtimien avulla ja on tällöin energiatehokkaampaa ja ympäristöystävällisempää verrattuna kompressori- ja absorptiojäähdytykseen. Vedellä jäähdyttäminen onnistuu kuitenkin vain, mikäli syvänteen vesi on riittävän kylmää, eikä viilennyksen tarve ylitä viilennyskapasiteettia. Sesonkiaikaan viilennys tarpeen ollessa suuri, ja syvänteen veden lämpimämpää, laitoksessa saatetaan joutua käyttämään absorptiopumppuja vapaajähdytyksen tukena. (Sayadi et. al., 2020)

Vaikka absorptiopumppuja joudutaankin käyttämään vapaajähdytyksen kanssa, laitoksen sähkönkulutus on silti huomattavasti vähäisempää kuin erillisten lämpöpumppu tai viilennyslaitteiden sähkönkulutus. (Sayadi et. al., 2020)



Kuva 6. Vapaajähdytyslaitoksen toimintaperiaate Cornell Universityn vapaajähdytysprojektin mukaan. (Peterson & Munther 2020, muokattu)

Alla olevaan luetteloon on lueteltu vapaajähdytyslaitoksen toimintavaiheet. Vaiheet on numeroitu kuvaan 6. (Sayadi et. al., 2020; Kuopion energia, 2018)

1. Vesistön syvänteestä pumpataan jäähdytyslaitokseen 4–5 °C vettä.
2. Jäähdytyslaitoksessa syvänteestä otetulla kylmällä vedellä jäähdytetään kaukojäähdytysverkoston vettä lämmönvaihtimien avulla. Jäähdytyksen tarpeen ollessa suurempi tai vesistön ollessa liian lämmin voidaan käyttää apuna absorptio toimisia lämpöpumppuja.
3. Laitoksessa lämmennyt vesi palautetaan takaisin vesistöön. Vesistöön palaavan veden lämpötila on noin 9–14 °C.
4. Jäähdytyslaitoksessa kaukojäähdytysverkossa kiertävä vesi viilennetään noin 7 °C, jonka jälkeen se kulkeutuu asiakkaan lämmönvaihtimelle.
5. Kaukojäähdytysverkosta palaa lämmintä, noin 16 °C vettä takaisin jäähdytyslaitokselle jäähdytettäväksi uudelleen.

Vesistöä otettu vesi ja kaukojäähdytysverkon vesi tulee olla erillisissä verkostoissa, sillä suoraan vesistöä otetussa vedessä saattaa olla epäpuhtauksia ja ne saattavat vahingoittaa verkostoa. (Sayadi et. al., 2020)

Vapaaäähdytys on toimintavarma teknologia tuottaa kaukokylmää, sillä lämmönvaihtimien käyttö vähentää laitteiston huoltotarvetta verrattuna esimerkiksi kompressoritoimiseen jäähdytyslaitokseen. (Looney & Oney, Sayadi et. al., mukaan, 2020)

Vapaaäähdytyslaitokseen voidaan myös liittää kaukolämpöliittymä, jolloin viilennettävistä asuinrakennuksista saatava hukkalämpö voidaan käyttää hyödyksi absorptioprosessin avulla kaukolämpönä. Tätä teknologiaa hyödynnetään esimerkiksi Kuopion savilahden vapaaäähdytyslaitoksella. (Kuopion energia, 2018)

Vapaaäähdytyksen ympäristöedut näkyvät myös jäähdytysaineiden käytön tarpeettomuudessa. Toisin kuin muissa jäähdytysmenetelmissä, vapaaäähdytyksessä lämmön välittäjäaineena toimivat vesi ja vesi (H₂O/H₂O), jolloin välttyään ympäristöä kuormittavien kylmäaineiden käytöltä. (Sayadi et. al., 2020)

2.4 Kaukojäähdytyksen jakeluverkosto

Kaukojäähdytettyä vettä siirretään kaukolämmön tavoin putkia pitkin. Putket voivat sijaita joko maanpinnan yläpuolella tai alapuolella. Kaukojäähdytysputkistoa suunniteltaessa tulee huomioida putkiston käyttöikä, huoltovarmuus, kustannukset, sekä sen soveltuvuus sitä ympäröivään ympäristöön. Maanpinnan yläpuolella sijaitsevan putkiston kustannukset ovat rakentamisvaiheessa huomattavasti halvemmat, kuin maanalaisen putkiston. Maanpinnan yläpuolelle rakennetun putkiston huolto ja vuotojen paikantaminen on myös huomattavasti helpompaa kuin maanalaisen putkiston. Maanpinnan yläpuolelle rakentaessa putkisto on kuitenkin herkempi kärsimään ulkoista vahinkoa, esimerkiksi ajoneuvot voivat vahingoittaa putkistoa onnettomuustilanteessa. Vaikkakin maanalainen putkisto on kalliimpi rakentaa ja sen huoltaminen on vaikeampaa, se on kuitenkin helpompi sijoittaa ympäristöön. Maanalainen putkisto on myös turvallisempi ja energiatehokkaampi, sillä sitä ympäröivä maa itsessään toimii tällöin eristeenä ulkoa saapuvalla lämpöenergialle ja suojana putkistolle. (Phettaplace et al., 2013)

2.4.1 Eristetyt ja eristämättömät kaukojäähdytysputket

Viileämmille alueille voidaan rakentaa eristämättömiä kaukojäähdytysputkistoja. Tämä vähentää rakentamiskustannuksia, mutta heikentää putkiston energiatehokkuutta. Eristämättömän kaukojäähdytysputkiston asennuksessa tulee kuitenkin huomioida energiatehokkuuden laskun vaikutus jäähdytyslaitoskapasiteettiin, sekä kuljetetun jäähdytysveden lämpötilaan. Mikäli putkistoon saapuva lämpömäärä vaatii laitосkapasiteetin nostoa, tulee harkita eristetyn putkiston käyttöä. Eristetty putkisto on huomattavasti kalliimpi, mutta siinä on merkittäviä hyötyjä verrattuna eristämättömään putkistoon. Eristetyllä putkistolla voidaan kuljettaa jäähdytettyä vettä huomattavasti pidempiä matkoja, eikä kausivaihteluilla ole niin suurta vaikutusta sen toimintaan. Talviaikaan jäähdytysveden tarpeen ollessa pienempi ja veden syöttönopeuksien hidastuessa jäähdytysvesi ehtii pitkällä matkalla lämmetä ja tämä vaikuttaa asiakkaalle toimitetun jäähdytysveden tehokkuuteen negatiivisesti. Eristetyissä putkistoissa veden lämpeneminen on vähäisempää eikä aiheuta ongelmia. Putkiston energiatehokkuuteen

vaikuttaa myös rakennusvaiheessa valittu putkistoa ympäröivä maa-aines. (Tredinnick & Phetteplace , 2016, s. 167-188.)

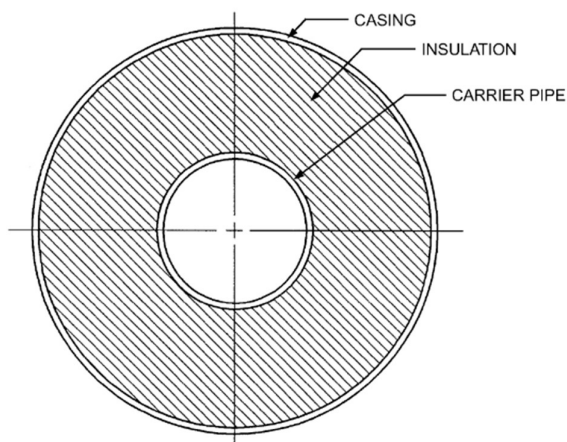
2.4.2 Putkistoa kuormittavat tekijät

Putkistoon kohdistuu useita kuormittavia tekijöitä sen elinaikana. Uudessa putkistossa on tärkeää huomioida että se pysyy tiiviinä, myös korkean putkistopaineen aikana. Putkisto tulee myös suojata ulkoiselta kosteudelta, kuten sadevesiltä ja maaperän kosteudelta. Mikäli putken eriste kastuu, sen eristävä vaikutus heikkenee ja eriste on tällöin hyödytön. Putken metalliosat, kuten kuljetusputki ja liitokset, ovat herkkiä korroosiolle ja ne tulee ruostesuojata aina. Eristetyissä putkistoissa ruostesuojaukseksi riittää usein eristeen tarjoama suoja, sillä ruostuminen on elektrokemiallinen reaktio ja vaatii anodin ja katodin. Suojaamattomissa putkistoissa ympäröivä maakerros toimii katodina ja aiheuttaa elektronivirran kuljetusputkesta maaperään. Suojaamattomien putkistojen tapauksessa voidaan käyttää katodista suojausta, missä teräsputki pinnoitetaan jollain toisella metallilla, kuten magnesiumilla, alumiinilla tai sinkillä. Tällöin pinnoitteesta tulee anodi kuljetusputken sijasta ja pinnoite kuluu vaurioittamatta putkea. Katodisen suojauksen keskimääräinen elinikä on noin 20 vuotta. (Phettaplace et al., 2013)

Putkiston rakennusvaiheessa putkistolle tehdään tiiviystesti, jolla testataan putkiston vuotokohdat. Putkistoon rakennetaan myös erillisiä huoltoaukkoja, mistä päästään helposti käsiksi putkistoon, mikäli ongelmia esiintyy. Putkiston tiiviys on tärkeää, sillä vuotava putkisto ruostuttaa kuljetusputken sekä liitokset ja pilaa eristeen. Huoltoaukkojen rakentamisessa tulee myös huomioida niiden vaikutus putkistoon. Huoltoaukot tulee rakentaa niin etteivät ne kerää vettä ja ne tarjoavat turvallisen pääsyn putkistoon käsiksi. (Phettaplace et al., 2013)

Putkistoon kohdistuu korroosion lisäksi myös ulkoisista voimista aiheutuvaa kuormitusta. Mikäli putkisto on rakennettu autotien viereen tai alle, sitä ympäröivä liikenne kohdistaa putkistoon ulkoista painetta, mikä voi taivuttaa putkea ja murtaa liitoksia. Talvisin myös routiminen saattaa nostaa tai laskea putkistoa jostain kohdista, joka johtaa samoihin ongelmiin. Putkistomateriaalin tulee olla vahvaa ja joustavaa, jotta se ei kärsi ulkoisten

voimien aiheuttamista vaikutuksista. Tästä syystä käytetään erilaisia putkistomateriaaleja, mitä toimivat paremmin tietyissä olosuhteissa. Putkea ympäröivällä maanrakentamisella voidaan myös ennaltaehkäistä maanmuodon muutoksista aiheutuvia ongelmia. (Phettaplace et al., 2013)



Kuva 7. Kaukojäähdytysputki (Phettaplace et al., 2013)

Kuvassa 7. on eristetty kaukojäähdytysputki. Eristetty kaukojäähdytysputki koostuu kuljetusputkesta (Carrier pipe), eristeestä (Insulation), sekä kotelointi materiaalista (Casing). Materiaaleille on useita vaihtoehtoja, jotka soveltuvat eri tilanteisiin ominaisuuksiensa ja hintansa puolesta. Kuljetusputken ja koteloinnin materiaalia mietittäessä tulee huomioida materiaalin vastustus korroosiolle, materiaalin vahvuus, hinta, sekä materiaalin liitosmahdollisuudet. Taulukkoon 3. on listattu eri materiaalien ominaisuuksia toimia kaukojäähdytysputki materiaalina. (Phettaplace et al., 2013)

Taulukko 3. Kaukojäähdytysputken materiaaliveikkojen ominaisuuksia (Phettaplace et al., 2013)

Materiaali	Liitosten tiiviys	Eristettyjen liitosten mahdollisuus	Korroosion vastustus	Vahvuus haudatuissa olosuhteissa	Hinta
Hitsattu teräs	Erinomainen	Kyllä	Hyvä	Erinomainen	Kallis
Juotettu kupari	Keskiverto	Kyllä	Keskiverto	Hyvä	Kallis
Sementti	Huono	Ei	Huono/Keskiverto	Erinomainen	Halpa/Keskiverto
FRP	Huono/Keskiverto	Kyllä	Keskiverto	Hyvä	Halpa/Keskiverto
PVC	Huono	Ei	Huono/Keskiverto	Huono	Halpa
HDPE	Hyvä	Kyllä	Keskiverto	Huono	Keskiverto

2.5 Asiakkaat, käyttökohteet ja ongelmat

Kaukokylmä soveltuu kaikenlaisiin asuin ja julkisiin tiloihin. Suomessa kaukokylmää käytetään tällä hetkellä enimmäkseen suurten julkisten tilojen, kuten kauppakeskusten, toimistojen, sairaaloiden, sekä koulujen viilentämiseen. Kaukokylmää on tarjolla myös uusille ja vanhoille asuinalueille, mikäli alueilla on riittävä kiinteistömassa. Kaukokylmä tarjoaa kustannustehokasta ja ympäristöä säästävää viilennystä asiakkailleen ja sen tuottaminen on helppoa ja perustuu hukkaenergian käyttöön. Kaukokylmällä voidaan vähentää kylmäaineista aiheutuvaa ympäristökuormitusta, sillä kylmäaineiden käyttö keskittyy tuotantolaitosten alueelle, missä sen käyttö on turvallista ja valvottua. Kaukokylmän tuotannossa käytettäviä kylmäaineita myös ohjataan lainsäädännöllä ja erilaisilla säädöksillä, jotta ympäristövaikutukset saataisiin minimoitua. Kaukokylmä myös poistaa melusaastetta kaupunkiympäristöstä, kun melua aiheuttavat jäähdyttimet eivät sijaitse asuinrakennusten yhteydessä, toisin kuin paikallisjäähdytyksessä. Kaukojäähdytyksellä saadaan tehokkaasti hyödynnettyä niin teollisuuden hukkalämpöjä, kuin viilennettävien rakennusten jäähdyttämisestä saatavaa hukkalämpöä. Hukkalämpö mikä muuten johdettaisiin jäähdytystornien kautta mereen, voidaan kaukokylmän avulla kierrättää kaukolämmöksi ja kaukokylmäksi. Kesäisin saatava hukkalämpö useimmiten hyödynnetään tehtaiden prosesseissa, sekä lämpimänä käyttövetenä. (Tuomenoja, 2020)

Kaukokylmän myynti on kaksinkertaistunut viimeisen viiden vuoden aikana. Yleistymistä kuitenkin jarruttaa sen sijaintiriippuvuus. Suurin osa kaukokylmän tuotantolaitoksista pyritään rakentamaan vesistöjen läheisyyteen, jotta tuotannossa saataisiin hyödynnettyä myös vapaajäähdytystä. Kaukojäähdytyksen toimitus asiakkaille vaatii myös erillisen jakeluverkoston, jonka rakentaminen on hidasta ja kallista. Tällä hetkellä kaukojäähdytystä on tarjolla asuinrakennuksiin vain suurkaupunkialueilla, joissa verkkoa on jo ehditty rakentamaan verrattain laajoille alueille. Kaukojäähdytyksen integrointi uusien asuinrakennuksiin on helppoa, mutta vanhoihin rakennuksiin kaukokylmäjärjestelmän asentaminen onnistuu vain laajan LVIS- saneerauksen yhteydessä. Vanhoihin rakennuksiin kaukojäähdytyksen asennus vaatii erillisten jäähdytyspaneelien tai -patterien asennuksen, mitkä vaativat myös säännöllistä paikallishuoltoa. (Tuomenoja, 2020)

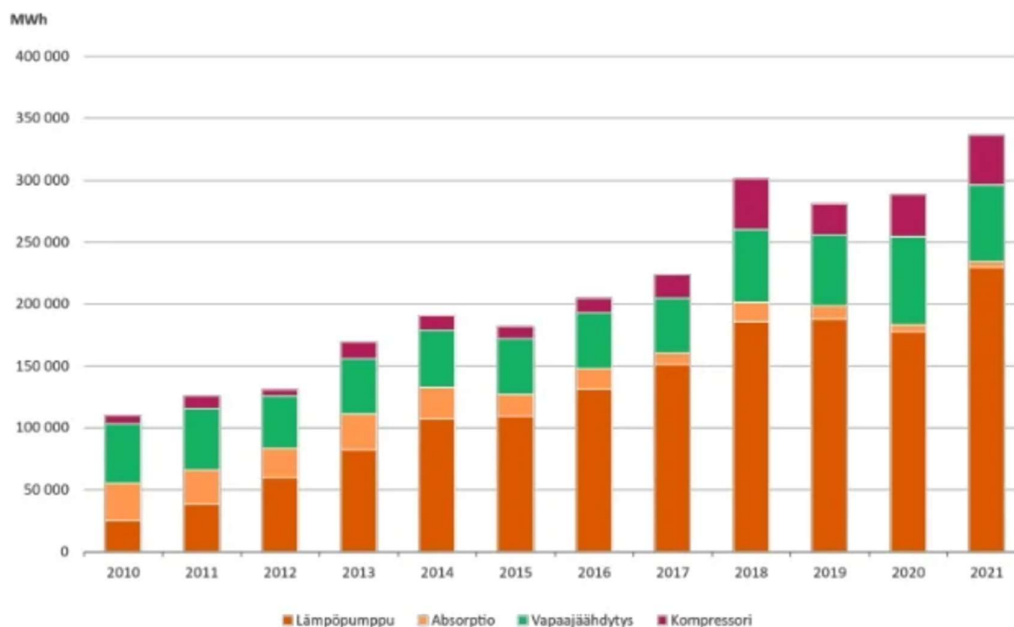
3 KAUKOJÄÄHDYTYS SUOMESSA

Suomessa on tuotettu kaukojäähdytystä vuodesta 1998 alkaen. Vanhimpana kaukojäähdytyksen tuottajana ja toimittajana toimii Helen Oy. 2000-luvun jälkeen kaukojäähdytyksen tuotantoon liittyivät Lahti energia Oy, Turku energia Oy, Vierumäen infra Oy, sekä Lempäälän lämpö Oy. Vuoden 2010 jälkeen kaukojäähdytyksen tuotannon on aloittanut myös Tampereen sähkölaitos Oy, Porin energia Oy, Kuopion energia Oy, Alva Oy, Etelä-Savon energia Oy, sekä Fortum Oy. Alla olevassa taulukossa 4. on lueteltu Suomessa kaukojäähdytystä tuottavat energiayhtiöt, sekä kaukojäähdytystoiminnan aloitusvuosi. (Energiateollisuus, 2022)

Taulukko 4. Suomessa kaukojäähdytystä tuottavat yhtiöt, sekä kaukojäähdytystoiminnan aloitusvuodet. (Energiateollisuus, 2022)

Energiayhtiö	Kaukojäähdytystoiminnan aloitusvuosi
Etelä-Savon Energia Oy	2018
Fortum Power and Heat Oy	2012
Helen Oy	1998
Jyväskylän Energia Oy	2016
Kuopion energia Oy	2017
Lahti Energia Oy	2000
Lempäälän Energia Oy	2008
Pori energia Oy	2012
Tampereen Sähkölaitos Oy	2012
Turku Energia Oy	2000
Vierumäen Infra Oy	2002

Suomessa yleisimmät tuotantomenetelmät ovat lämpöpumppujäähdytys, sekä vapaajäähdytys. Suomen kaukokylmän tuotannosta 68,2 % on tuotettu CHC- ja CHP lämpöpumpuilla ja 18,5 % on tuotettu vapaajäähdytyksellä. Jäljelle jäävä 13,2 % on tuotettu kompressori ja absorptio toimisilla jäähdytyslaitoksilla. Kompressoritoimisilla laitoksilla tuotetaan 11,9 % ja absorptioitoimisilla 1,3 % Suomen kaukojäähdytyksestä. Vuonna 2021 Kaukojäähdytystä tuotettiin 336 GWh tästä 229 GWh tuotettiin Lämpöpumpuilla ja 62 GWh tuotettiin vapaajäähdytyksellä. Kaukojäähdytyksen tuotanto on kasvanut vuodesta 2010 yli kolminkertaiseksi. Vuonna 2010 kaukojäähdytystä tuotettiin 110 GWh, josta vapaajäähdytystä oli vain 48 GWh. Alla olevassa kuvassa 8. on esitetty kaukojäähdytyksen tuotanto megawattitunteina vuosina 2010–2021. (Energiateollisuus, 2022)



Energiäteollisuus

Kuva 8. Kaukojäähdytyksen tuotanto suomessa vuosina 2010-2022. (Energiäteollisuus, 2022)

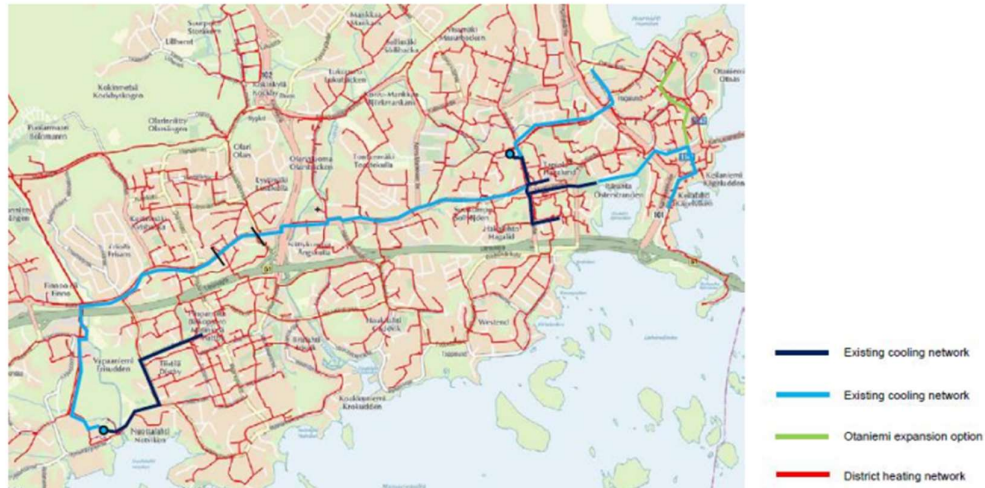
Jäähdytyksen tuotannon määrään vaikuttavat huomattavasti myös sääolosuhteet. Kuvassa 8. näkyy vuoden 2018 kohdalla piikki, joka johtui suuresta helle-aallosta. Esimerkiksi Helen tuotti heinäkuussa 2018 kaksinkertaisen määrän kaukojäähdytystä verrattuna vuoden 2017 heinäkuuhun helteen takia. (Helen, 2018)

3.1 Tarjoajat suomessa

3.1.1 Fortum

Fortum toimittaa kaukojäähdytystä Espoon, Kauniaisten ja Kirkkonummen alueelle. Kaukojäähdytysverkon alue on esitetty kuvassa 9. Fortumin suurin kaukokylmää tuottava laitos on Suomenojan lämpöpumppulaitos, missä jäähdytyksen tuotannosta vastaa kolme 20-25MW CHC-lämpöpumppua. Fortumilla on kaiken kaikkiaan viisi kaukojäähdytystä tuottavaa lämpöpumppuyksikköä, jotka sijaitsevat Suomenojan-,

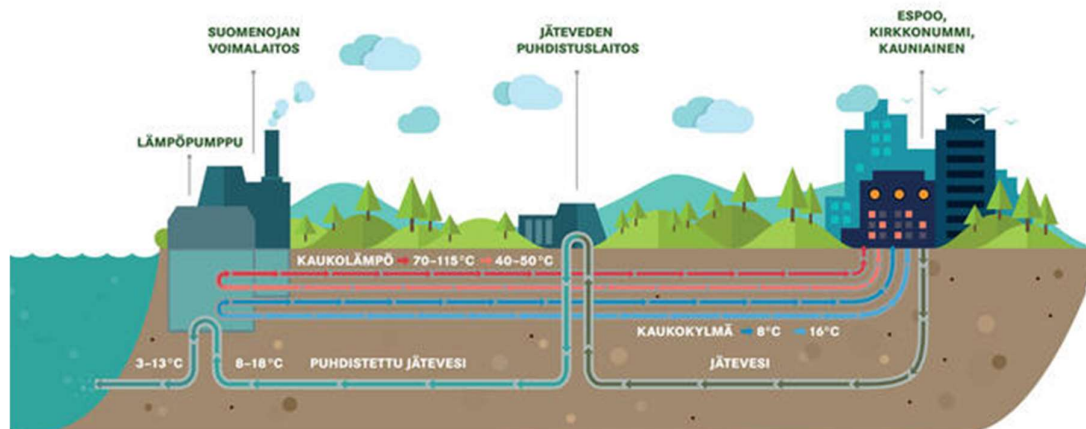
Tapiolan-, Kivenlahden-, Vermon- ja Otaniemen lämpöpumppulaitoksilla. (Hytönen, 2021)(Energiateollisuus, 2022)



 fortum

Kuva 9. Fortumin kaukojäähdytysverkko Espoossa. (Palomaa 2018, Turtiainen 2020, mukaan)

Suomenojan lämpöpumppulaitos toimittaa kaukokylmää Espoon alueelle. Suomenojan lämpöpumppulaitos käyttää kaukokylmän tuotantoon kesäisin merivettä, sekä ympäri vuotisesti Helsingin seudun ympäristöpalveluiden (HSY) vesilaitoksen puhdistettua jätevedettä. Jätevedestä saadaan talteen otettua lämpöä, joka voidaan käyttää kaukolämpönä sellaisenaan, tai lämpö voidaan käyttää CHC- lämpöpumpuilla kaukojäähdytyksen tuotantoon. Merivedestä saadaan kaukokylmää vapaajäähdytyksen keinoin. Suomenojan lämpöpumppulaitoksen lämpöpumput käyttävät hiilineutraalia sähköä tuottaen tällöin päästötöntä kaukolämpöä ja jäähdytystä. Kuvassa 10. on esitetty Suomenojan lämpöpumppulaitos. (Hytönen, 2021)(Fortum, 2021)



Kuva 10. Suomenojan lämpöpumppulaitos (Fortum, 2022)

Fortumin lämpöpumppulaitoksilla tuotettiin 36 899MWh kaukojäähdytystä vuonna 2021. Tästä määrästä kaikki jäähdytys tuotettiin lämpöpumppujen avulla. Fortumin jäähdytyksen piirissä on yhteensä 32 rakennusta. Rakennukset ovat toimistotiloja, kouluja, kauppakeskuksia ja asuinrakennuksia. Esimerkiksi Espoon Accountor tower, sekä kauppakeskus Ainoa kuuluvat Fortumin kaukojäähdytys verkkoon. (Fortum, 2022)(Energiateollisuus 2022)

3.1.2 Helen

Helen toimii suomen suurimpana kaukojäähdytyksen tuottajana ja toimittajana. Helenin kaukolämpöverkko kattaa koko Helsingin kantakaupunki alueen ja sen piirissä on 593 rakennusta. Helenillä on kaiken kaikkiaan 18 kaukojäähdytystä tuottavaa yksikköä, joista suurimmat sijaitsevat Salmisaaren ja Katri Valan lämpöpumppulaitoksissa. Helen tuotti kaukojäähdytystä yhteensä 200 010 MWh vuonna 2021. Kuvassa 11. on Helenin kaukojäähdytysverkon piiri, sekä kiinteistöjäähdytyksen piiri. (Energiateollisuus, 2022)



Kuva 11. Helenin kaukojäähdytysverkon alue, sekä kiinteistöjäähdytyksen alue. Kaukojäähdytysverkon alue on maalattu tumman sinisellä ja kiinteistöjäähdytyksen alue on maalattu vaaleansinisellä. (Juvonen, 2020)

Katri valan lämpöpumppulaitos on maailman suurin kaukolämpöä ja jäähdytystä tuottava lämpöpumppulaitos. Katri Valan lämpöpumppulaitoksen 6 lämpöpumppua tuottavat yhteensä lämpöä teholla 126MW ja jäähdytystä teholla 80MW. Lämpöpumput vähentävät hiilidioksidipäästöjä 80% verrattuna lämmön ja jäähdytyksen erillistuotantoon, sillä ne hyödyntävät hukka-energiaa. Lämpöpumput ottavat lämpönsä Helsingin seudun puhdistetusta jätevedestä, sekä kaukojäähdytyksellä viilennettävistä rakennuksista. Lämpöpumppulaitos käyttää hyödyksi myös kylmää merivettä vapaajäähdytyksen keinoin. (Helen, 2018)

Helenillä on jäähdytyksen apuna myös suuria maanalaisia tekojärviä, joihin voidaan varastoida kylmää yöaikaan jäähdytyksen tarpeen ollessa pieni. Tekojärvien kylmä voidaan käyttää päiväaikaan kaukojäähdytykseen. Suomen suurin kaukojäähdytysvarasto on vesimäärältään 25 miljoonaa litraa ja se sijaitsee 100 metrin syvyydessä Esplanadin puiston alla. Helenin toinen maanalainen jäähdytysvarasto on kooltaan 11 miljoonaa litraa ja se sijaitsee Pasilassa. (Helen, 2018)

3.1.3 Tampereen sähkölaitos

Tampereen sähkölaitos tuotti vuonna 2021 yhteensä 37 231MWh kaukojäähdytystä. Tuotetusta määrästä 20 000MWh tuotettiin vapaajäähdytyksellä, 16 000MWh tuotettiin kompressorijäähdytyksellä ja loput lämpöpumpuilla. Tampereen sähkölaitoksella on yhteensä 5 kompressoriyksikköä, joista 4 sijaitsee Kaupinojan laitoksella ja yksi siirrettävässä kaukojäähdytyslaitoksessa. Tampereen sähkölaitoksen piirissä on 61 rakennusta, jotka sijaitsevat kaikki Tampereen keskusta-alueella. Kuvassa 12. on Tampereen sähkölaitoksen kaukojäähdytysverkon alue. (Energiateollisuus, 2022)

Kaupinojan kaukojäähdytyslaitos tuottaa pääosin vapaajäähdytystä. Laitoksella on kuitenkin myös 4 kompressoriyksikköä lisäämässä jäähdytystehoja tarvittaessa. Kompressoriyksiköt tuottavat jäähdytystä 23MW yhteisteholla. Vapaajäähdytykseen Kaupinojan laitos ottaa kylmää Näsijärven syvänteestä. Kaupinojan laitos on täysin automatisoitu ja miehittämätön. (Oilon, 2022)

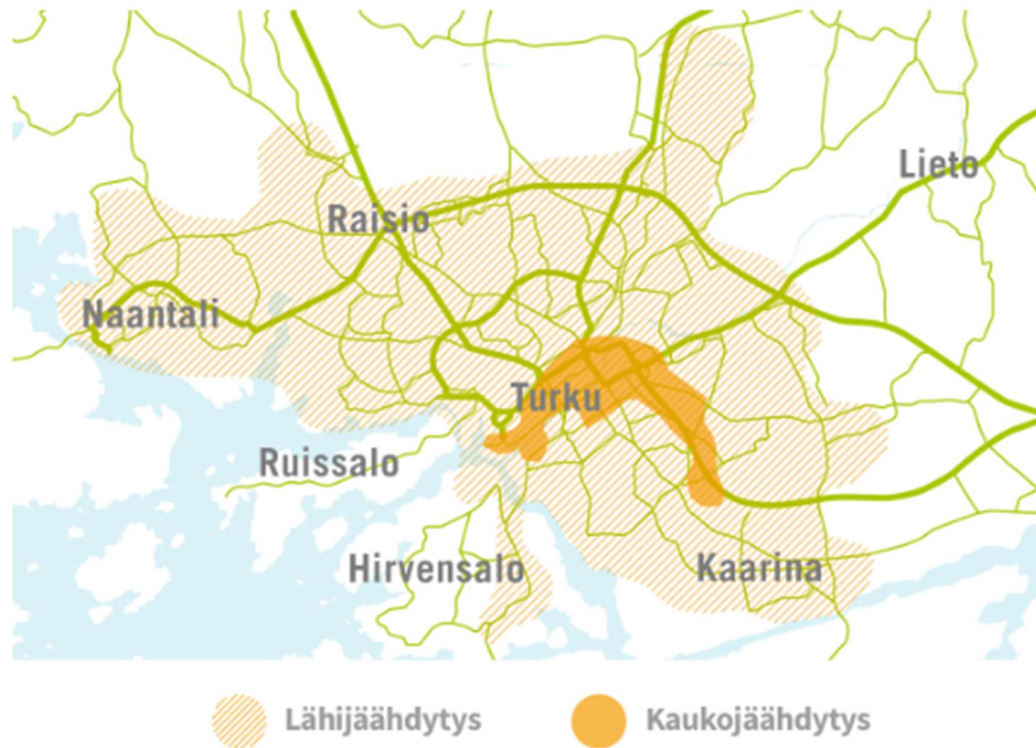


Kuva 12. Tampereen sähkölaitoksen kaukojäähdytysverkon alue. (Tampereen sähkölaitos 2022)

3.1.4 Turku energia

Turku energia tuotti kaukojäähdytystä vuonna 2021 yhteensä 42 775MWh. Tuotetusta määrästä 34 944MWh tuotettiin Lämpöpumpuilla ja vapaajäähdytyksellä ja loput 7831MWh kompressorijäähdytyksellä. Turku energia tarjoaa kaukojäähdytystä Turun keskustan alueella ja sen piiriin kuuluu 128 rakennusta. (Energiateollisuus, 2022). Kuvassa 13. on esitetty Turku energian kaukojäähdytys ja lähijäähdytysverkon alue.

Noin 80 % Turku energian kaukojäähdytyksestä tuotetaan Kakolan lämpöpumppulaitoksella. Kakolan lämpöpumppulaitos toimii hyvin samalla periaatteella kuin Helenin Katri Valan lämpöpumppulaitos. Kakolan lämpöpumppulaitos käyttää Turun kaupungin puhdistettua jätevettä kaukolämmön ja kaukojäähdytyksen tuotantoon. Jäteveden ylijäämlämpö syötetään kaukolämpöverkkoon ja jäähdytetyllä jätevedellä viilennetään kaukojäähdytysverkossa kiertävää vettä. Kakolan lämpöpumppulaitoksella on myös 15 000 kuution kylmävesi akku, mihin kaukojäähdytykseen käytettävää kylmää vettä varastoidaan tasaisen syötön aikaansaamiseksi. (Valor, 2016)



Kuva 13. Turku energian kaukojäähdytys- ja lähijäähdytysverkon alue. Kaukojäähdytysverkko on merkitty kuvaan yhtenäisellä oranssilla ja lähijäähdytys oranssilla viivoituksella. (Turku energia, 2022)

3.1.5 Muut kaukojäähdytystä tuottaneet yritykset

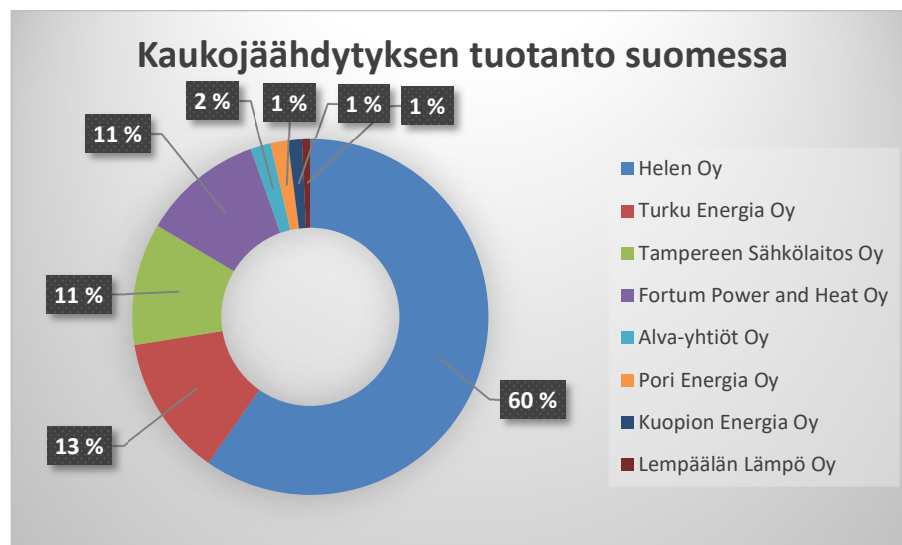
Alva- yhtiöt tuotti kaukojäähdytystä vuonna 2021 yhteensä 6138MWh. Tästä määrästä kaikki tuotettiin kompressoreilla. Pori Energia tuotti kaukojäähdytystä vuonna 2021 yhteensä 5299MWh. Suurin osa tästä määrästä tuotettiin Tiilimäen kaukojäähdytyslaitoksen kompressoreilla. Loput tuotettiin vapaajäähdytyksellä, sekä yhden lämpöpumpun avulla. Pori Energialla oli käytössään myös yksi siirrettävä kaukojäähdytyskontti. Kuopion Energia tuotti vuonna 2021 kaukojäähdytystä yhteensä 4237 MWh, mistä 3891MWh tuotettiin Savilahden kaukojäähdytyslaitoksella. Suurin osa tuotetusta kaukojäähdytyksestä tuotettiin vapaajäähdytyksellä. Lempäälän lämpö tuotti vuonna 2021 kaukojäähdytystä 2522MWh, mistä suurin osa tuotettiin kompressoreilla. (Energiateollisuus, 2022)

Kaukojäähdytystä tuottivat myös Etelä-Savon Energia, Lahti Energia, sekä Vierumäen Infra. Näiden yritysten kaukojäähdytyksen tuotanto oli kuitenkin alle 1 % Suomessa

tuotetusta kaukojäähdytyksestä tai tietoja tuotannosta ei ollut saatavissa vuodelta 2021. (Energiateollisuus, 2022)

3.2 Yleisesti

Suomessa neljänä suurimpana kaukojäähdytyksen tuottajina toimivat vuonna 2021 Helen Oy, Turku Energia Oy, Tampereen Sähkölaitos Oy, sekä Fortum Power and Heat Oy. Helen tuotti 60 % Suomen kaukojäähdytyksestä, Turku Energia tuotti 13 %, Tampereen sähkölaitos tuotti 11 % ja Fortum tuotti 11 %. Kuvasta 14. ja taulukosta 5. nähdään tuotannon prosentuaalinen jakauma yritystä kohden ja taulukosta 7. nähdään tuotannon määrä megawattitunteina. (Energiateollisuus, 2022)

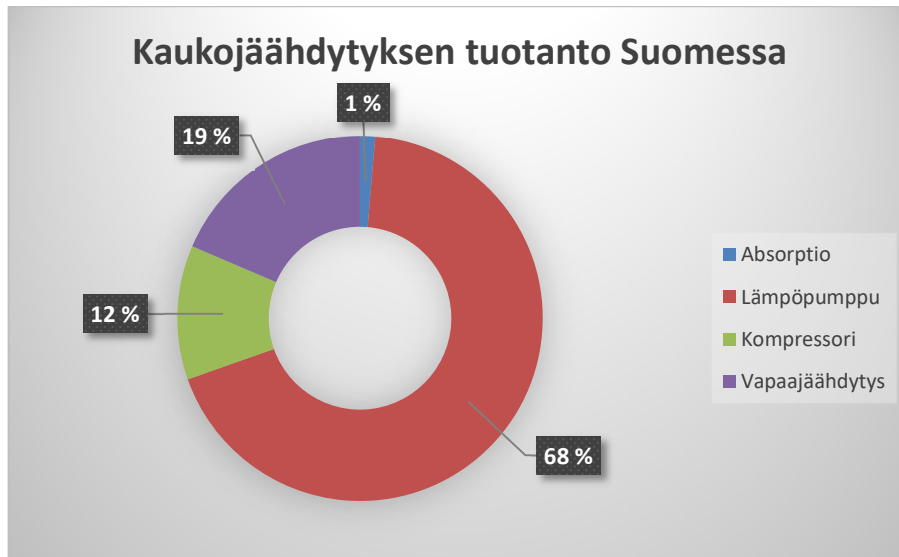


Kuva 14. Kaukojäähdytyksen tuotanto Suomessa. (Energiateollisuus, 2022)

Taulukko 5. Kaukojäähdytyksen tuotanto Suomessa megawattitunteina vuonna 2021. (Energiateollisuus, 2022)

Tuottaja	Tuotettu määrä MWh
Helen Oy	200 010
Turku Energia Oy	42 775
Tampereen Sähkölaitos Oy	37 231
Fortum Power and Heat Oy	36 899
Alva-yhtiöt Oy	6 138
Pori Energia Oy	5 299
Kuopion Energia Oy	4 237
Lempäälän Lämpö Oy	2 522
Etelä-Savon Energia Oy	1090
Lahti Energia Oy	156
Vierumäen Infra Oy	Ei tietoja saatavilla vuodelta 2021

Suomessa yleisin kaukokylmän tuottotapa oli vuonna 2021 lämpöpumput. Lämpöpumpuilla tuotettiin 68 % kaikesta Suomessa tuotetusta kaukojäähdytyksestä. Suomen suurimmat kaukojäähdytystä tuottavat laitokset, kuten Katri Valan- ja Kakolan lämpöpumppulaitokset tuottavat kaukojäähdytystä nimenomaan lämpöpumpuilla, mikä näkyy tilastossa selvästi. Toiseksi yleisimpänä menetelmänä oli vapaajäähdytys. Vapaajäähdytystä tuotetusta kaukojäähdytyksestä oli 19 %. Kolmanneksi yleisin menetelmä oli kompressorijäähdytys, mikä kattoi 12 % kaukokylmän tuotannosta. Absorptiojäähdytystä oli vähiten, sillä sitä oli vain 1 % kaukokylmän tuotannosta. Kuvassa 15. on eri tuotantotapojen prosentuaalinen jakauma Suomen kaukojäähdytyksen tuotannossa. (Energiateollisuus, 2022)



Kuva 15. Kaukojäähdytyksen tuotantotavat Suomessa. (Energiateollisuus, 2022)

4 KAUKOJÄÄHDYTYKSEN TULEVAISUUDESSA

Rakennusten jäähdytyksen tarve tulee tulevaisuudessa lisääntymään väestönkasvun myötä. Rakennusten sisälämpötilalle on myös asetettu ylä- ja alarajoja, joilla huolehditaan rakennusten käyttömukavuudesta, sekä huolehditaan niiden kunnan säilymisestä. Lainsäädännöllä pyritään kuitenkin myös hillitsemään jäähdytystarvetta. Suomessa rakennusten energiatehokkuudelle on asetettu vaatimuksia jo vuodesta 1970 lähtien ja vaatimuksia kiristetään jatkuvasti. Energiatehokkuusdirektiivin (Energy performance of buildings directive, EPBD) edellyttämänä vuoden 2020 jälkeen rakennetut kaikki uudet rakennukset tulee olla lähes nollaenergiarakennuksia (Nearly zero- energy buildings, NZEB). Energiatehokkuuden lisäämisellä saadaan vähennettyä rakennusten lämmitys- ja jäähdytysenergian kulutusta. (Airaksinen et al., 2015)

Kaukojäähdytyksen tuotanto saattaa lisääntyä myös, mikäli kaavoitetaan uusia kaukojäähdytysverkostoja kaupunkeihin, missä sitä ei vielä ole. Esimerkiksi Oulun energia on tehnyt kartoituksia kaukojäähdytysjärjestelmän kannattavuudesta Oulussa. Oulun keskustan jäähdytyskuormaksi laskettiin 28MW, mistä suurin osa koostui liiketiloista, toimistorakennuksista, sekä hotelleista. Ouluun suunniteltiin kalliion sisään rakennettavaa vapaajäähdytys/ absorptiojäähdytys laitosta. Investointi kuitenkin jäi toistaiseksi toteuttamatta, sillä kalliion sisäänrakentamisen louhintakustannukset ovat niin kovat, ettei investointi ole kannattava. (Oulun energia 2015, Airaksinen et al., mukaan, 2015)

4.1 Ilmastonmuutoksen vaikutus jäähdytyksen tarpeeseen

VTT on vuoden 2015 asiakasraportissaan määritellyt historiatiedon perusteella ilmastonmuutoksen aiheuttamaa lämpötilannousua vuosien 2012, 2030, sekä 2050 aikana. Simuloinnista voidaan tulkita, että ilmastonlämpeneminen nostaisi keskiulkolämpötilaa noin 1,5 astetta vuoteen 2030 mennessä ja noin 3 astetta vuoteen 2050 mennessä. Ulkolämpötila on lämmityksen- ja jäähdytyksen kannalta hyvin merkittävä muuttuja, jolla on selkeä vaikutus ainakin jäähdytyksen tarpeeseen. Raportissa on arvioitu jäähdytyksen tarpeen lisääntyvän noin 2 % vuodessa. (Airaksinen et al., 2015)

Suomen ilmatieteen laitos on arvioinut vuonna 2011 ilmastonmuutoksesta johtuvan jäähdytyksentarpeen kasvavan vuoteen 2030 mennessä noin 13–19 % (Ilmatieteenlaitos, 2011)

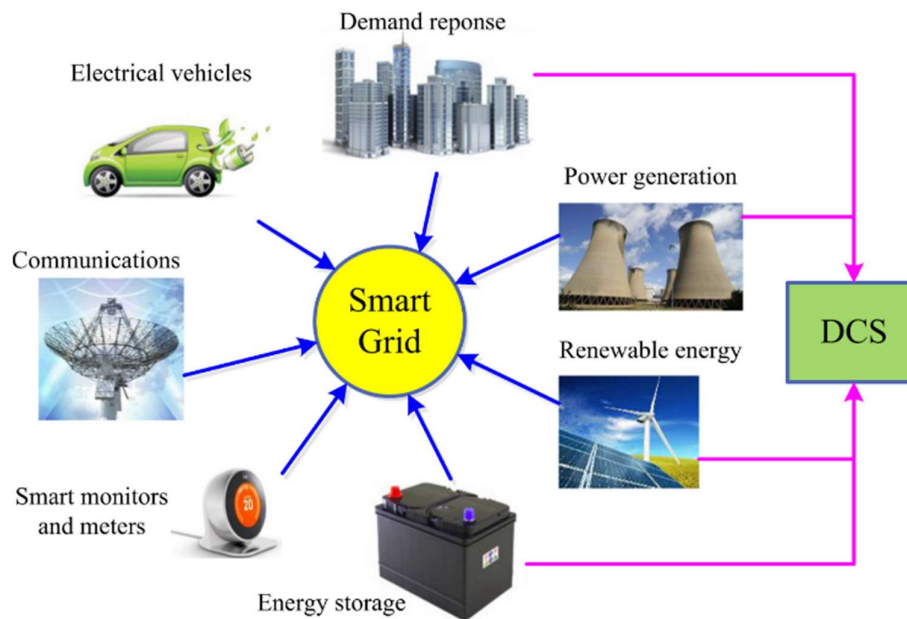
4.2 Rakennuskannan muutos

VTT on käsitellyt vuoden 2015 asiakasraportissaan myös rakennuskannan muutosta vuosien 2015 ja 2030 välillä. Vuonna 2015 rakennuskanta on kattanut yhteensä 590 miljoonaa neliometriä. Tästä määrästä suurimman jäähdytystarpeen vaativat tilat ovat liike- ja toimistotilat, sekä julkiset rakennukset. Näiden määrä on 17 % kokonaiskannasta. Kaupungistumisen myötä asemakaavoitetut alueet eli niin sanotut tiheän taajaman alueet ovat kasvaneet merkittävästi ja kasvavat edelleen. Tämä vaatii uusien liike- ja toimistotilojen rakentamista, mikä lisää jäähdytystarpeen määrää. Väestönkasvun ja maahanmuuton seurauksena VTT on arvioinut, että asuinrakennusten määrä tulee kasvamaan vuoteen 2030 mennessä vuodesta 2011, noin 25 000 asunnolla. Kaukojäähdytyksen tarpeen arviointiin VTT on kehitellyt erilaisia skenaarioita ja arvioinut jäähdytystarpeen kasvua näiden skenaarioiden kautta. Erään skenaarion mukaan osittain aurinkosuojattujen kiinteistöjen jäähdyttämiseen on vuonna 2015 kulunut energiaa noin 1400 gigawattituntia. Mikäli skenaario pitää paikkansa jäähdytyksen tarve tulee samankaltaisille rakennuksille olemaan vuonna 2030 noin 1700 gigawattituntia. (Airaksinen et al., 2015)

4.3 Uusia teknologioita

4.3.1 Älykkäät sähköverkot

Kaukojäähdytys on suuressa osassa tulevaisuudessa, kun niin sanottuja älykkäitä sähköverkkoja (smart grid) aletaan rakentamaan ja ottamaan käyttöön. Älykkäässä sähköverkossa yhdistetään kaikki sähköntuotanto ja kulutus yhteen tietokantaan, mitä voidaan älykkäästi ohjata ja säädellä. Älykkään verkon ideana on sähköntuotannon ja kulutuksen tasaaminen, ettei suuria tuotanto- ja kulutuseroja syntyisi. Kuvassa 16 on esitetty kaukojäähdytysjärjestelmän (district cooling system, DCS) integrointi älykkääseen sähköverkkoon. (Gang, et al., 2016)



Kuva 16. Kaukojäähdytyksen integroiminen älykkääseen sähköverkkoon. (Gang, et al., 2016)

Kaukojäähdytys voidaan integroida uusiutuvien energialähteiden kanssa. Uusiutuvilla energialähteillä tuotettu kaukojäähdytys on täysin päästötöntä ja siitä voi olla hyötyä myös energiapiikkien tasaamisessa. Jatkuvasti Suomessakin lisääntyvä tuulivoiman ja aurinkovoiman käyttö tulee tulevaisuudessa aiheuttamaan ongelmia sähköverkkojen kanssa, sillä molemmat energialähteet tarjoavat erittäin epäsäännöllistä energiantuotantoa ja aiheuttavat energiapiikkejä sähköverkkoon. Koska vielä ei ole olemassa sellaisia akkuja mihin tätä ylijäämäenergiaa voitaisiin varastoida, voisi niin sanottujen lämpövarastojen (Thermal storage) käyttö olla harkittavissa. Uusiutuvien energialähteiden ylijäämäenergia voidaan varastoida kaukojäähdytyksessä käytettäviin kylmävarastoihin. Esimerkiksi Helenillä on käytössä suurikokoisiakin kylmävarastoja Helsingissä maan-alla. Ylijäämäenergia voidaan matalan jäähdytys- tai lämmitystarpeen aikana syöttää Helenin lämpöpumpuille, joilla saadaan tuotettua kaukojäähdytystä tai kaukolämpöä varastoon. Energiaa varastoimalla matalan kulutuksen aikaan saadaan luotua myös kulutusjoustoa sähkömarkkinoille. Kulutusjoustolla sähkönkulutusta ja sähkönkulutuksen hintaeroja saadaan tasattua korkean ja matalan kulutuksen välillä, jossa saadaan luotua taloudellinen ja ympäristöllinen etu. (Gang, et al., 2016)

4.3.2 Yleiset parannukset

Kaukojäähdytyksen tämänhetkinen suurin ongelma on sen jakelu. Kaukojäähdytys vaatii oman jakeluverkkonsa ja niin laajan putkiston tekeminen on kallista ja aikaa vievää. Tästä syystä kaukojäähdytystä ei ole tarjolla kuin suurkaupunkialueille, missä on riittävästi rakennettua pinta-alaa, jotta jäähdytysverkon rakentaminen on kannattavaa.

On kuitenkin tutkittu olisiko mahdollista rakentaa kaukojäähdytystä myös pienemmille asuinalueille. Zhai et al. (2009) tutki aurinkovoimaa hyödyntävän lämpöä, jäähdytystä, sekä energiaa tuottavan hybridilaitoksen soveltuvuutta niin sanotuille verkon ulkopuolisille alueille. Pienen mittakaavan hybridivoimalaitos toimisi aurinkopaneelien ja adsorptiojäähdyttimen avulla. Tutkimuksessa kuitenkin päädyttiin siihen tulokseen, että tämänhetkisellä teknologialla ei saavuteta riittäviä COP arvoja, jotta hanke olisi taloudellisesti kannattava. Tutkimuksessa oli kuitenkin arvioitu, että muuttuvien energian markkinahintojen takia samantyyiliselle järjestelmälle voi olla tulevaisuudessa käyttöä. (Zhai, et al., 2009)

Vaikka kaukojäähdytyksen suurimpana ongelmana onkin jakeluverkot, on kaukojäähdytysprosessissa kuitenkin paljon optimoitavia osa-alueita, joihin tullaan tulevaisuudessa keskittymään. Kaukojäähdytyksen energiatehokkuutta pystytään parantamaan esimerkiksi paremmilla kylmäaineilla, pienentämällä putkistoresistanssia, sekä kasvattamalla jakeluverkon tulo- ja lähtöveden lämpötilaeroa. Näitä osa-alueita tutkitaan koko ajan ja ne tulevat luultavasti kehittymään lähivuosina. (Gang, et al., 2016)

5 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA

Kaukojäähdytys on energiatehokas ja ympäristöystävällinen tapa tuottaa jäähdytystä asiakkailleen. Kaukojäähdytystä pystytään tällä hetkellä tuottamaan neljällä eri tavalla, kompressori-, absorptio-, vapaa-, sekä lämpöpumppujäähdytystekniikoilla. Kompressori- ja absorptiojäähdyttimet soveltuvat paremmin pienemmän mittakaavan jäähdytykseen, kun taas vapaa- ja lämpöpumppujäähdyttimet soveltuvat kaukojäähdytyksen tuotantoon. Vapaa jäähdytyksessä kylmää saadaan vesistöjen syvänteistä lämmönvaihtimien avulla ja tarvittaessa absorptiopumpuilla. Lämpöpumppujäähdytyksessä kylmän lähteenä voidaan hyödyntää esimerkiksi kaupungin jätevesiä tai kaukolämpöverkosta palaavaa vettä.

Neljästä tuotantotavasta tehokkaimmiksi ja ekologisimmiksi ovat osoittautuneet vapaa jäähdytys ja lämpöpumppujäähdytys. Vapaa jäähdytyksen etuna on yksinkertainen ja huoltovapaa toiminta, sekä kylmäaineiden tarpeettomuus. Lämpöpumppujäähdytyksessä huomattavana etuna on sen tehokkuus ja sen integrointimahdollisuudet kaukolämpöjärjestelmiin.

Kaukojäähdytystä pystytään toimittamaan asiakkaille samalla tavoin kuin kaukolämpöäkin. Suurimpana ongelmana kaukojäähdytyksessä on kuitenkin sen toimittaminen. Laajan kaukojäähdytysverkon rakentaminen jo valmiiseen suurkaupunkiin on hidasta ja kallista, sillä putkiston asentaminen maan sisään aiheuttaa pitkäkestoisia katkoksia liikenteessä. Kaukojäähdytysverkon rakentaminen on kallis ja hidas toimenpide, joka vaikuttaa sen soveltuvuuteen niille alueille, jossa rakennuskanta on harva. Kaukojäähdytysverkon asentaminen jo olemassa oleviin rakennuksiin on myös vaikeaa, sillä se vaatii oman putkistonsa myös asiakkaan päässä. Nykyteknologialla kaukojäähdytysverkon asentaminen jo olemassa oleviin rakennuksiin onnistuu ainoastaan laajan putkistosaneerauksen yhteydessä. Uusiin rakennuksiin sen asentaminen kuitenkin sujuu jo rakennusvaiheessa muiden putkistotöiden ohella.

Vuonna 2021 Suomessa tuotettiin kaukojäähdytystä yhteensä 336GWh. Tästä määrästä 229GWh (68,5 %) tuotettiin lämpöpumpuilla, 62GWh (18,5 %) tuotettiin vapaa jäähdytyksellä, 40GWh (11,9 %) tuotettiin kompressorijäähdytyksellä ja loput

4,3GWh (1,3 %) tuotettiin absorptiojäähdytyksellä. Tämä tarkoittaa yli 200 % tuotannon kasvua vuoteen 2010 verrattuna. Vuonna 2010 kaukojäähdytystä tuotettiin vain 110GWh.

Kaukojäähdytystä on Suomessa tällä hetkellä saatavissa melkein kaikissa suurkaupungeissa. Saatavuutta kuitenkin rajoittaa kaukojäähdytyslaitosten suuri koko. Esimerkiksi Ouluun ei olla rakennettu kaukojäähdytyslaitosta, vaikka kysyntää olisi. Ouluun suunniteltiin jäähdytyslaitosta kallion sisään, kuitenkin projektikustannukset olisivat kasvaneet niin suuriksi, että hankkeesta luovuttiin. Suurkaupungeissa, jossa jo on kaukojäähdytyslaitokset, verkostot sijaitsevat vain ydinkeskustan alueella. Verkostoja pyritään laajentamaan kysynnän ja rakennuskannan kasvaessa, mutta laajentuminen on kuitenkin verrattain hidasta.

Suomessa kaukojäähdytystä tuottavat Helen, Turku Energia, Tampereen Sähkölaitos, Fortum, Alva- yhtiöt, Pori Energia, Kuopion Energia, Lempäälän Lämpö, Etelä Savon Energia, Lahti Energia, sekä Vierumäen Infra. Näistä suurimpina tuottajina toimivat Helen, Turku Energia, Tampereen Sähkölaitos, sekä Fortum.

Tulevaisuuden näkymiä ajatellen on enemmän kuin todennäköistä, että kaukokylmää tullaan lisäämään, sillä se on systeeminä kestävä ja sen integroiminen niin kutsuttuihin älykkäisiin energiajärjestelmiin on miltei välttämätöntä. Kaukojäähdytyksen tuotantoon ja jakeluun kehitellään jatkuvasti uusia ja menetelmiä ja optimoidaan vanhoja, joten on mahdollista, että tämänhetkiset ongelmat tulevat vähenemään tulevaisuudessa.

Kaukojäähdytyksen kysynnän kasvuun on monia tekijöitä. Esimerkiksi ilmastonmuutoksen on arvioitu lisäävän jäähdytystarvetta noin 2 % vuodessa. Jäähdytystarve kasvaa keskiulkolämpötilan noustessa. Rakennuskannan muutos vaikuttaa myös jäähdytystarpeen kasvuun. Väestönkasvun takia Suomen rakennuskannan on arvioitu kasvavan noin 25 000 asunnolla 19 vuotta kohden, mikä omalta osaltaan lisää jäähdytystarvetta.

Tulevaisuudessa voidaan harkita myös harvaan asutuille alueille pienempiä hybriditoimisia kaukojäähdytyslaitoksia. Teknologian kehittyessä ja laitteiden COP-arvojen parantuessa voisi olla mahdollista rakentaa pienempiä energialämpöä ja jäähdytystä tuottavia laitoksia niin sanotuille alueverkon ulkopuolisille alueille.

5.1 Pohdinta

Kaukojäähdytys on verrattuna paikallisjäähdytykseen huomattavasti parempi ratkaisu, vaikkakin sen lisääminen nykyiseen infraan nostaa esiin omat ongelmansa. Kaukojäähdytystä lisäämällä saadaan vähennettyä huomattavasti sähkönkulutusta, sekä ympäristölle haitallisten kylmäaineiden käyttöä. Kaukojäähdytys luo myös kulutusjoustoja nykyiseen sähköverkkoon, mikä on erittäin tärkeää tuulivoiman ja aurinkovoiman tuotannon kasvaessa kovaa vauhtia. Nykyisellä tuulivoiman ja aurinkovoiman tuotantomäärällä sähköverkon energiapiikit eivät vielä tuota suuria ongelmia, kuitenkin tämänhetkisen buumin myötä niiden lisääntyminen tulee tulevaisuudessa tuomaan ongelmia. Energiapiikkien tasaaminen esimerkiksi varastoimalla niitä kaukojäähdytysvedeksi voisi olla tehokas ratkaisu näiden ongelmien vähentämiseen. Energiapiikkien varastoiminen on myös kaikille osapuolille edullista, sillä korkean tuotannon aikaan se tarjoaa energialle edullisen varastointipaikan, eikä tuotantoa tarvitse rajoittaa esimerkiksi tuulimyllyjarrujen avulla. Suomessa on jo olemassa tähän käyttötarkoitukseen soveltuvia kylmävarastoja kaukojäähdytykselle. Esimerkiksi Helenillä on valtavat kylmävarastot Helsingin kaupungin alla pelkästään kaukojäähdytystä varten. Mikäli näihin varastoihin saataisiin tuotua lisää energiaa matalan kulutuksen aikana, se vähentäisi lämpöpumppujen käyttötarvetta korkean kulutuksen aikana. Näin saataisiin vähennettyä kaukojäähdytyksen, sekä yleisesti sähkönkäytön hintoja.

Vaikkakin kaukojäähdytys vähentää ympäristölle haitallisten kylmäaineiden käyttöä, se tuo myös omat ongelmansa. Ympäristöystävällisten kylmäaineiden käyttö omalla tavallaan jarruttaa kaukojäähdytyksen tuotantoa, sekä sen soveltamismahdollisuuksia. Ympäristöystävällisten kylmäaineiden ollessa ympäristön kannalta turvallinen ratkaisu ne myös samalla lisäävät kaukojäähdytyksen tuotannon energiankulutusta. Ympäristöystävällisillä kylmäaineilla on huomattavasti huonompi (jopa 50 %) hyötysuhde (COP) verrattuna haitallisiin kylmäaineisiin. Mikäli pystyttäisiin tuottamaan ympäristölle vaaratonta kylmäainetta, minkä COP vastaisi esimerkiksi käyttökiellossa olevaa R-11 kylmäainetta, se voisi ratkaista useita ongelmia kaukojäähdytyksen jakelun puolella. Tehokkaamman kylmäaineen ansiosta samoilla tuotantolaitoksilla pystyttäisiin tuottamaan suuremmille alueille kaukokylmää, mikä vähentäisi prosessin

energiantarvetta, sekä voisi olla mahdollista ottaa käyttöön myös niin sanottuja alueverkon ulkopuolisia kaukojäähdytyslaitteistoja. Esimerkiksi tässä työssä esiteltyjä alueverkon ulkopuolisia hybridilaitteistoja ei tällä hetkellä voida käyttää, koska niiden hyötysuhde ei ole riittävä, jotta niiden rakentaminen ja käyttäminen olisi kannattavaa. Tehokkaammilla kylmäaineilla saataisiin siis mahdollisesti lisättyä kaukokylmää sellaisille alueille, missä se ei tällä hetkellä ole mahdollista. Paremmalla kaukojäähdytyksen hyötysuhteella saataisiin myös tuotantolaitoksia sellaisille tiheään asutuille alueille, missä sitä ei vielä ole saatavilla. Parempi hyötysuhde toisi etuna pienemmän tuotantolaitoskoon, jolloin tuotantolaitosten rakentaminen ja sijoittaminen olisi helpompaa ja edullisempaa. Näin saataisiin kaukojäähdytystä esimerkiksi Ouluun, minne sillä on kysyntää, mutta sitä ei kuitenkaan ole saatavilla rakennustilan puutteen ja korkeiden kustannusten takia.

6 YHTEENVETO

Tämän työn aiheeksi valittiin kaukojäähdytys Suomessa. Työ suoritettiin kirjallisuusselvityksenä.

Kaukojäähdytys tarjoaa vaihtoehdon paikallisjäähdytykselle ja sen toimintatapa tekniikkana muistuttaa hyvin paljon kaukolämpöä. Kaukojäähdytystä voidaan tuottaa kompressori-, absorptio-, vapaa-, tai lämpöpumppujäähdytystekniikoilla. Näistä tekniikoista kaukojäähdytykseen parhaiten soveltuvat ja yleisimmät tekniikat ovat vapaajäähdytys ja lämpöpumppujäähdytys. Kaukojäähdytyksen siirtäminen tapahtuu kaukolämmön tavoin maanalaisia eristettyjä putkia pitkin. Kaukojäähdytyksen ongelmana on nimenomaan kylmän veden siirtäminen, sillä jakeluverkot ovat kalliita rakentaa ja niiden integrointi jo olemassa oleviin tiheisiin asuinalueisiin on vaikeaa. Verkostoja ei myöskään vielä nykyisellä teknologialla ole kannattavaa rakentaa harvaan asutuille asuinalueille.

Kaukojäähdytystä on Suomessa saatavilla Helsingissä, Turussa, Tampereella, Jyväskylässä, Porissa, Kuopiossa, Lempäälässä, Lahdessa, sekä Vierumäellä. Suomessa kaukojäähdytystä tuottavat Helen, Turku Energia, Tampereen Sähkölaitos, Fortum, Alva-yhtiöt, Pori Energia, Kuopion Energia, Lempäälän Lämpö, Etelä Savon Energia, Lahti Energia, sekä Vierumäen Infra. Vuonna 2021 Suomessa tuotettiin kaukojäähdytystä 336GWh, mistä suurin osa tuotettiin vapaa- ja lämpöpumppujäähdytyksellä.

Kaukojäähdytyksen kysynnän on arvioitu lisääntyvän tulevaisuudessa, johtuen ilmastonlämpenemisestä, sekä rakennuskannan kasvusta. Lisääntyvän kysynnän takia kaukojäähdytysteknologiaa kehitetään jatkuvasti ja olemassa olevia verkkoja pyritään laajentamaan ja lisäämään. On esitetty myös jonkinasteisia ratkaisuja haja-asutusalueiden kaukojäähdytykseen, mutta niitä ei kuitenkaan vielä ole pystytty nykyisellä teknologialla toteuttamaan. Kaukojäähdytys tulee olemaan suuressa osassa älykkäissä verkon sisäisissä ja verkon ulkopuolisissa järjestelmissä, sillä kaukojäähdytyksen integrointi niihin on toiminnan kannalta melkein välttämätöntä.

7 LÄHTEET

Airaksinen M., Vainio T., Vesanen T. & Ala-Kotila P., 2015, Rakennusten jäähdytysmarkkinat, VTT, Energiateollisuus, Saatavissa: https://energia.fi/files/399/Rakennusten_jaahdytysmarkkinat_18-12-2015.pdf [Viitattu 17.5.2022]

Assad M. E. H., Nazari M. A., Ehyaei M. A. & Rosen M. A., 2021, Chapter 11 - Heat pumps and absorption chillers, Teoksessa: Assad M. E. H & Rosen M. A. (toim.) Design and Performance Optimization of Renewable Energy Systems, Academic Press, s.163-180, ISBN 9780128216026, Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821602-6.00013-4> [Viitattu 10.3.2022]

Coker A. K., 2015, Chapter 17 - Refrigeration Systems, Teoksessa: Coker A. K. (toim.) Ludwig's Applied Process Design for Chemical and Petrochemical Plants (Fourth Edition), Gulf Professional Publishing, s. 623-727, ISBN 9780750685245, Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-094242-1.00017-6> [Viitattu 10.3.2022]

Darment, 2022, Kylmäaineiden ympäristövaikutusten tunnusluvut: ODP, GWP, TEWI [verkkodokumentti], Darment, Saatavissa: <https://darment.fi/kylmaaineiden-ymparistovaikutusten-tunnusluvut-odp-gwp-tewi/> [Viitattu 21.3.2022]

Energiateollisuus, 2022, Kaukojäähdytystilasto [verkkodokumentti] Saatavissa: <https://energia.fi/uutishuone/materiaalipankki/kaukojaahdytystilasto.html#material-view> [Viitattu 15.4.2022]

Fortum, 2021, Fortumin suomen suurin lämpöpumppu korvaa fossiilista kaukolämmöntuotantoa jäteveden hukkalämmöllä [verkkodokumentti], Saatavissa: <https://www.fortum.fi/media/2021/06/fortumin-suomen-suurin-lampopumppu-korvaa-fossiilista-kaukolammontuotantoa-jateveden-hukkalammolla-0> [Viitattu 19.4.2022]

Fortum, 2022, Fortum kaukokylmä [verkkodokumentti], Saatavissa: <https://www.fortum.fi/yrityksille-ja-yhteisolle/lammitys/kaukokylma> [Viitattu 18.4.2022]

Gang W., Wang S., Xiao F. & Gao D., 2016, District cooling systems: Technology integration, system optimization, challenges and opportunities for applications, *Renewable and Sustainable Energy*, 53(2016) s. 253-264, Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.08.051>. [Viitattu 18.5.2022]

Helen, 2018, Helsingin jäähdytystarve ennätystasolla, apuna maanalaiset järvet [verkkodokumentti], Saatavissa: <https://www.helen.fi/uutiset/2018/helsingin-jaahdytystarve-ennatyskorkealla> [Viitattu 21.4.2022]

Hytönen T., 2021, Kauko- tai lähikylmää- joka rakennuksen tarpeisiin löytyy viileä ratkaisu, Fortum [verkkodokumentti], Saatavissa: <https://www.fortum.fi/tietoa-meista/forthedoers-blogi/kauko-tai-lahikylmaa-joka-rakennuksen-tarpeisiin-loytyy-viilea-ratkaisu> [Viitattu 15.4.2022]

IIFIIR, 2005, Summary of Montreal Protocol [verkkodokumentti]. Linde- gas, Saatavissa: https://www.linde-gas.com/en/products_and_supply/refrigerants/hfc_refrigerants/index.html [Viitattu 21.3.2022]. 5 s.

Ilmatieteenlaitos, 2011, Tutkimus: Rakennusten energiatarpeet muuttuvat ilmastonmuutoksen myötä [verkkodokumentti], Saatavissa: <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/tiedote/435632> [Viitattu 9.9.2022]

Juvonen A., 2020, Hiilineutraalin jäähdytyksen avulla lähemmäs päästövähennystavoitteita, Helen [verkkodokumentti], Saatavissa: <https://www.helen.fi/helen-oy/vastuullisuus/ajankohtaista/blogi/2020/hiilineutraali-jaahdytys> [Viitattu 21.4.2022]

Kukkola M., 2021, Oilon ChillHeat Industrial Heat Pumps and Chillers [verkkodokumentti], Suomen lämpöpumppuyhdistys Sulpu, Saatavissa: <https://www.sulpu.fi/wp-content/uploads/2021/05/12-Martti-Kukkola-Combined-Cooling-and-Heating-Oilon.pdf> [Viitattu 21.3.2022]

Kuopion energia, 2018, Kaukojäähdytys presentaatio [verkkodokumentti], Saatavissa: https://www.kuopionenergia.fi/wp-content/uploads/2018/10/KE_Kaukoja%CC%88a%CC%88hdytys_presentaatio_26102018.pdf [viitattu 22.3.2022]

Laitinen A., Rämä M. & Airaksinen M., 2016, Jäähdytyksen teknologiset ratkaisut [verkkodokumentti], VTT:Espoo, Saatavissa:https://energia.fi/files/1359/Jaahdytysteknologiaselvitys_VTT_221216.pdf [Viitattu 22.2.2022]

Linde-gas, 2022, Refrigerants Environmental Data [verkkodokumentti]. Linde-gas, Saatavissa: https://www.linde-gas.com/en/products_and_supply/refrigerants/hfc_refrigerants/index.html [Viitattu 21.3.2022]. 2 s.

Neave A., 2002, 41 - Heat pumps and their applications, Teoksessa: Snow D. A. (toim.) Plant Engineer's Reference Book (Second Edition), Butterworth-Heinemann, s. 41-1-41-9, ISBN 9780750644525, Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/B978-075064452-5/50096-1> [Viitattu 11.3.2022].

Oilon, 2022, Tampereen kaukojäähdytys, Tampere [verkkodokumentti] Saatavissa: <https://oilon.com/fi/references/tampereen-kaukojaahdytys-tampere/> [Viitattu 21.4.2022]

Peterson J. & Munther S., 2020, Lake and River Cooling Considerations for Critical Facilities Conference: ASHRAE. Saatavissa: https://www.researchgate.net/figure/Pictorial-cross-section-diagram-of-the-Cornell-Lake-Source-Cooling-Project_fig2_342846386 [viitattu 22.3.2022]

Phetteplace G., Abdullah S., Andrepont J., Bahnfleth D., Ghani A. A., Meyer V. & Tredinnick S., 2013, District cooling guide, Atlanta, GA: American society of heating, refrigerating and air- conditioning engineers (ASHRAE) s. 1- 100 ISBN- 978-1-936504-42-8 [Viitattu 21.3.2022]

Sayadi S., Akander J., Hayati A. & Cehlin M., 2021, Review on District Cooling and Its Application in Energy Systems., Teoksessa: Wallhagen P. M. & Cehlin M. (toim.), Urban Transition - Perspectives on Urban Systems and Environments, IntechOpen. Saatavissa: <https://doi.org/10.5772/intechopen.100307> [viitattu 22.3.2022]

Smith G. B. & Parmenter K. E., 2016, Management of heating and cooling, Chapter 8 - Management of Heating and Cooling, Energy Management Principles (Second Edition), Elsevier, Pages 125-187, ISBN 9780128025062, Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802506-2.00008-2> [Viitattu 22.2.2022]

Tampereen sähkölaitos 2022, Liittyminen kaukojäähdytysverkkoon, Tampereen sähkölaitos[verkkodokumentti], Saatavissa: <https://www.sahkolaitos.fi/yrityksille-jat-aloyhtiaille/jaahdytysratkaisut/liittyminen/>

Tredinnick S. & Phetteplace G., 2016, District cooling current status and future trends. 8 - District cooling, current status and future trends, Teoksessa: Wiltshire R. (toim.) In Woodhead Publishing Series in Energy, Advanced District Heating and Cooling (DHC) Systems, Woodhead Publishing, s.167-188, ISBN 9781782423744, Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-374-4.00008-2> [Viitattu 22.2.2022]

Tuomenoja M., 2020, Hukkalämmöstä jäähdytystä mitä on kaukokylmä, Afry [verkkodokumentti], Saatavissa: <https://afry.com/fi-fi/artikkeli/hukkalammosta-jaahdytysta-mita-kaukokylma> [Viitattu 27.4.2022]

Turku energia, 2022, 20- vuotias kaukojäähdytys, Turku energia [verkkodokumentti], Saatavissa: <https://www.turkuenergia.fi/naekauas/26-20-vuotias-kaukojaahdytys/> [Viitattu 28.9.2022]

Turtiainen, P., 2020, Kaukojäähdytyksen tehokkaat tuotantomenetelmät Kuopiossa, Theseus, (YAMK), Saatavissa: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/337648/turtiainen_petri.pdf?sequence=2 [Viitattu: 29.7.2022]

US Department of Energy, 2021, Combined Heat and Power Technology Fact Sheet: District Energy [verkkodokumentti], Saatavissa: https://www.energy.gov/sites/default/files/2021/03/f83/District_Energy_Fact_Sheet.pdf [Viitattu 9.9.2022]

Valor, 2016, Suuret lämpöpumput kaukolämpöjärjestelmässä, Energiateollisuus [verkkodokumentti], Saatavissa: https://energia.fi/files/993/Suuret_lampopumput_kaukolampojarjestelmassa_Loppuraportti_290816_paivitetty.pdf [Viitattu 22.4.2022]

Zhai H., Dai Y.J., Wu J.Y. & Wang R.Z., 2009, Energy and exergy analyses on a novel hybrid solar heating, cooling and power generation system for remote areas, Applied Energy, 86(9), s. 1395-1404, Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.11.020>. [Viitattu 18.5.2022]