

Karoliina Hakala

Selvitys kaukojäähdytyksen paluulämpötilan rajoittamisen kannattavuudesta Helsingin kaukojäähdytysverkossa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Energia- ja ympäristötekniikka

Insinöörityö

15.12.2017

Tekijä Otsikko Sivumäärä Aika	Karoliina Hakala Selvitys kaukojäähdytyksen paluulämpötilan rajoittamisen kannattavuudesta Helsingin kaukojäähdytysverkossa 43 sivua + 4 liitettä 15.12.2017
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Energia- ja ympäristötekniikka
Pääaine	Energiantuotantomenetelmät
Ohjaaja(t)	Projektipäällikkö Tero Korhonen Ryhmäpäällikkö Antti Saikkonen Tutkintovastaava Tomi Hämäläinen
<p>Insinööritöiden tavoitteena oli selvittää, onko kaukojäähdytyksen paluulämpötilan rajoittaminen Helen Oy:n kaukojäähdytysverkossa tarpeellista ja kannattavaa. Kaukojäähdytyksen paluulämpötilat ovat niin matalia, että lämpötilaero meno- ja paluupuolen välillä on paljon pienempi kuin jäähdytysjärjestelmän toiminnan kannalta olisi optimaalista. Tavoitteena oli myös löytää sellaiset asiakkaat, joiden jäähdytysjärjestelmässä on eniten parantamisen varaa.</p> <p>Aineistona työssä käytetään mittausdataa kolmen viime vuoden ajalta, josta nähdään eri jäähdytyslaitosten ja kaikkien asiakkaiden toteutuneet meno- ja paluulämpötilat sekä virtauksen suuruus kunakin tuntina. Aineistosta etsittiin asiakkaat, joiden jäähdytysteho ja käyttöaste olivat suuria, mutta kaukojäähdytyksen paluulämpötila matala. Rajatuista asiakkaista kolme valikoitiin mahdollisiksi referenssiobjekteiksi, joiden jäähdytysjärjestelmän toimivuutta tarkastellaan erikseen. Lisäksi yleisellä tasolla tutkittiin lämpötilaeron suuruuden vaikutusta kaukojäähdytyksen tehonsiirtoon ja pumppauskustannuksiin.</p> <p>Kaukojäähdytyksen paluulämpötilaa nostamalla verkon tehonsiirtokyky paranee huomattavasti ja pumppauskustannukset laskevat. Kaukojäähdytysverkon tehonsiirron paranemisen myötä voidaan välttyä myös suurilta laitosinvestoinneilta tulevaisuudessa. Näin vältetään myös uusien, suurempien jäähdytysjohtojen rakentamiselta vanhojen rinnalle. Nostamalla paluulämpötilaa niin, että lämpötilaero meno- ja paluupuolen välillä kasvaa edes muutama asteen, jäähdytysenergiaa saadaan siirrettyä moninkertainen määrä. Pumppausenergian määrä ja pumppauskustannukset vähenevät jopa puolella. Työn lopussa kaukojäähdytyksen paluulämpötilan rajoittamisesta esitetään vaihtoehtoja, joita Helen voi halutessaan hyödyntää tulevaisuudessa.</p>	
Avainsanat	Kaukojäähdytys, kaukojäähdytysverkko, jäähdytysjärjestelmät

Author Title	Karoliina Hakala Feasibility syrvey of limiting the temperature of district cooling return water in Helsinki` s district cooling grid
Number of Pages Date	43 pages + 4 appendices 15 December 2017
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Energy and environmental engineering
Specialisation option	Energy production technology
Instructor(s)	Tero Korhonen, Project Manager Antti Saikkonen, Team Manager Tomi Hämäläinen, Head of Degree Programme
<p>The aim of this Bachelor`s thesis was to examine if it is feasible to limit the temperature of the return water of district cooling in Helen Oy`s cooling grid. The temperatures of return water are so low that heat difference between the supply water and the return water is much smaller than would be optimal for the function of the cooling system. In addition, the aim was also to find the customers whose district cooling system need to work better.</p> <p>The material used in this thesis are the measurements of the supply and return water and water flows at each hour between the customers and cooling plants in a three-year period. The measurements were to find the customers who had a large using rate and a large cooling power of district heating but a low temperature of return water. From these customers three were selected as possible reference targets, and their district cooling system`s functioning was to be examined in more detail. Additionally, the effect of the size of temperature difference for the power transfer and pumping costs were examined in a general level.</p> <p>By raising the temperature of district cooling return water, the power transfer ability improves significantly, and the pumping costs decrease. As a result of the improvement in the transfer ability of district cooling grid, large cooling plant investments can be avoided. This way also the construction of new, larger district cooling pipes on the side of the old ones can be avoided. Raising the temperature of district cooling return water so that the temperature difference between the supply water and the return water increases even few degrees, a considerable amount of energy can be transferred. The amount of the pumping energy and its costs decrease by as much as half compared to current situation. At the end of the thesis are performed options about limiting the return temperature of district cooling that Helen Oy can benefit in the future.</p>	
Keywords	District cooling, district cooling grid, cooling systems

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Kaukojäähdytys	2
2.1	Kaukojäähdytysenergian tuotanto Helsingissä	2
2.1.1	Lämpöpumput	5
2.1.2	Absorptiojäähdytys	7
2.1.3	Vapaajäähdytys	9
2.1.4	Kompressorijäähdytys	11
2.2	Kaukojäähdytysenergian siirto	12
2.2.1	Lämpöhäviöt	14
2.2.2	Laatukriteerit	16
2.2.3	Kaukojäähdytysvesi	16
2.2.4	Jakelulämpötilat	17
2.2.5	Johtojen mitoitus	17
2.2.6	Ympäristövaikutukset	18
3	Rakennusten jäähdytysjärjestelmät	19
3.1	Ilmajärjestelmät	20
3.2	Vesijärjestelmät	22
3.2.1	Jäähdytyspalkit	22
3.2.2	Jäähdytyspatterit	23
3.2.3	Puhallinkonvektorit	24
3.3	Ilma-vesijärjestelmät	25
3.4	Hajautetut järjestelmät	25
4	Kiinteistökohtaiset laitteet	26
4.1	Ensiö- ja toisiopuoli	26
4.2	Jäähdytystarpeen mitoitus	27
4.3	Kiinteistökohtaisten laitteiden mitoitus	29
5	Kaukojäähdytyksen paluulämpötilan nostaminen	32
5.1	Mahdolliset referenssikohteet	33

5.2	Vaikutukset jäähdytysenergian siirtoon	37
5.3	Toimenpide-ehdotukset	39
6	Yhteenveto	42
	Lähteet	44
	Liitteet	
	Liite 1. Esimerkki toimisto- ja liikerakennusten kytkennästä (300 kW ->)	
	Liite 2. Mitoitustaulukko 1 & 2, toimisto- ja liikerakennukset	
	Liite 3/1. Esimerkki serveritilojen kytkennästä (50–10 000 kW)	
	Liite 3/2. Mitoitustaulukko 1 & 2, serveritilat	

Käsitteet

Absorptio	Imeytyminen nesteeseen, kaasuun tai kiinteään aineeseen
Astetunti	Rakennuksen hetkellisen huonelämpötilan ja jäähdytysrajan välinen erotus kerrottuna ylityksen kestolla
CAV	Constant Air Volume eli lyhenne vakioilmavirtasäädöllä toimivasta ilmajärjestelmästä
HFC-kylmäaine	vetyä, fluoria ja hiiltä sisältävä halogeenihiilivety
Kastepiste	Lämpötila, missä ilmassa oleva kosteus alkaa tiivistyä nesteeksi
KL	Kaukolämpö
KJ	Kaukojäähdytys
Kondensoituminen	Nestehöyryn tiivistyminen nesteeksi, jolloin ilmasta siirtyy lämpöä
Konvektio	Lämmön siirtyminen virtauksen mukana
KV	Katri Valan lämpöpumppulaitos
SaX	Salmisaaren jäähdytyslaitos
ShX	Salmisaaren hiililuola
Spiroputki	teräksinen virtausputki, jossa eristeenä polyuretaani, joka on suojattu kierrepellillä
VAV	Variable Air Volume, lyhenne vaihtuvalla ilmavirtasäädöllä toimivasta järjestelmästä

VRV

Variable Refrigerant Volume, lyhenne vaihtuvalla jäähdytys-
sädöllä toimivasta järjestelmästä

1 Johdanto

Jäähdytysjärjestelmien suosio on ollut jatkuvassa kasvussa jo vuosien ajan. Asuinrakennusten asumisviihtyvyyteen halutaan panostaa yhä enemmän, ja toimisto- ja liikerakennuksissa sisäilman laadulla on huomattu olevan suuri merkitys työntekijöiden tehokkuuteen. Kaukojäähdytys sopii tiheästi rakennetuille alueille, joissa jäähdytysenergian kulutus on suurta. Helen Oy:n kaukojäähdytysverkko kattaa koko Helsingin kantakaupungin ja suuren osan Etelä-Helsingistä ja laajenee jatkuvasti. Kaukojäähdytysenergian myynti kasvoi Helsingissä vuodesta 2015 vuoteen 2016 yhteensä 13 %, ja VTT:n raportin mukaan jäähdytystarpeen vuosittainen kasvu Suomessa on noin 2 % vuoteen 2030 mennessä. Kaukojäähdytyksen suosiota selittää osaltaan, että se on energiatehokkain jäähdytysmuoto ja vähentää kiinteistön sähkön kulutusta sekä päästöjen määrää merkittävästi. Kapasiteettia laajenemiselle Helsingissä on edelleen, minkä vuoksi on tärkeää turvata kaukojäähdytysjärjestelmän toimivuus pitkälle tulevaisuuteen. (Koskelainen ym. 2006: 529; Liiketoimintavuosi 2016; Airaksinen & Vainio 2015: 1.)

Tämä insinöörityö tehdään Helenin Esiselvitykset ja suunnittelu-ryhmän toimeksiantona ja työssä on tarkoitus tutkia, kuinka kaukojäähdytyksen paluulämpötilan rajoittaminen vaikuttaisi kaukojäähdytysjärjestelmän toimintaan ja kannattavuuteen. Työssä selvitetään sopivin raja-arvo paluulämpötilalle verkon optimaalisimman toiminnan kannalta ja se, kuinka paljon sen asetuksella olisi vaikutusta tehon siirtoon ja pumppauksiin. Sopivan arvon löytämiseksi insinöörityössä analysoidaan kaukojäähdytyksen meno- ja paluulämpötiloista kerättyjä tilastoja sekä pumppaustilastoja. Lisäksi työssä selvitetään, kuinka raja-arvon asettamista voitaisiin soveltaa uusien asiakkaiden lisäksi vanhoille kuluttajille, joiden kaukojäähdytysveden paluulämpötila on liian matala ja tilavuusvirta on erityisen suuri suhteessa siirrettyyn tehoon.

2 Kaukojäähdytys

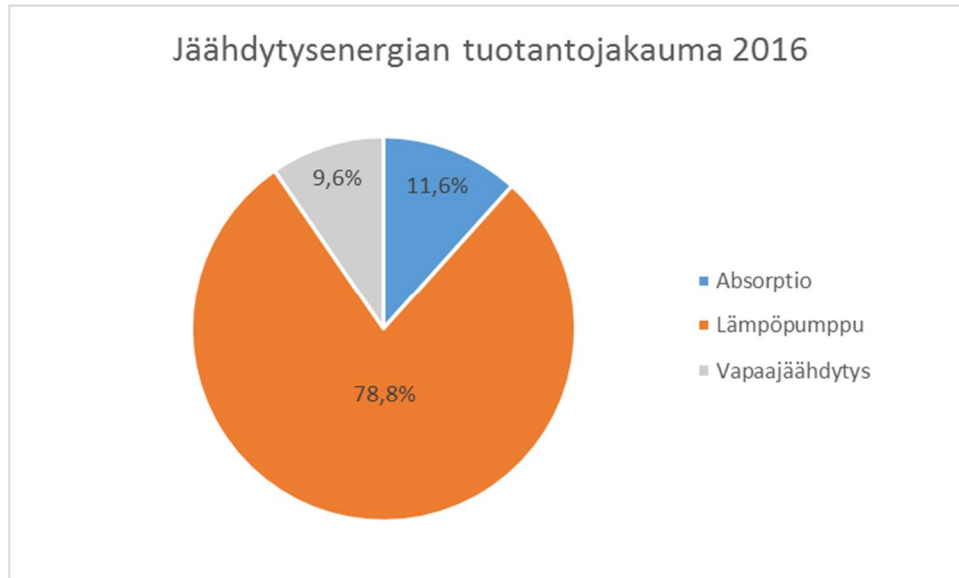
Kaukojäähdytyksellä tarkoitetaan keskitetysti tuotettua jäähdytysenergiaa, jota siirretään jakeluverkoston välityksellä liiketiloille, asuinkiinteistöille, konesaleille ja erilaisiin teollisuuden prosesseihin. Jäähdytysenergia jaetaan kylmänä vetenä, joka johdetaan rakennuksien jäähdytyslaitteisiin, joissa se jäähdyttää asiakaspuolen ilmastointijärjestelmissä kiertävää vesipiiriä. Jäähdytystä tarvitaan varsinkin kesäaikana, mutta esimerkiksi prosessijäähdytykselle on tarvetta ympäri vuoden. Prosessijäähdytyksen tarkoitus on jäähdyttää helposti ylikuumenevia koneita ja laitteita, esimerkiksi suurten atk-tilojen laitteistoja. Lisäksi muun muassa kauppojen kylmäaltaat ja sairaaloiden hoitolaitteet tarvitsevat jatkuvaa jäähdytystä. Kaukojäähdytystä käytetään myös elintarviketeollisuuden valmistus- ja säilytystilojen jäähdyttämiseen. (Kaukojäähdytys 2004: 1.)

Energiansäästön ja ympäristöystävällisyyden lisäksi kaukojäähdytys on meluton ja melko näkymätön jäähdytysratkaisu. Kiinteistökohtaisiin jäähdytysjärjestelmiin verrattuna se säästää tilaa talon sisä- ja ulkopuolelta eikä se tarvitse samanlaista huoltoa ja kunnossapitoa. Investointina se on kuitenkin kalliimpi kuin kiinteistökohtaiset jäähdytyslaitteet.

2.1 Kaukojäähdytysenergian tuotanto Helsingissä

Helen Oy on tuottanut kaukojäähdytystä vuodesta 2000 lähtien, ja se on Suomen suurin kaukojäähdytyksen tuottaja ja myyjä. Vuoden 2016 lopussa kaukojäähdytyksen piirissä oli 438 rakennusta ja energiaa myytiin lähes 141 GWh, mikä on lähes 70 prosenttia koko Suomen jäähdytysenergian myynnistä. Kaukojäähdytysjohtojen pituus on 72 km, ja uusia asiakkaita liitetään verkkoon jatkuvasti. Jäähdytystä tuotetaan joko keskitetysti tai hajautetusti. Keskitetyssä järjestelmässä jäähdytysenergia tuotetaan keskitetyissä laitoksissa lämpöpumpuilla, absorptiotekniikalla, kompressorijäähdytyskoneilla sekä vaapajäähdytyksellä. Tuotettu energia jaetaan suurelle käyttöalueelle. Hajautetussa järjestelmässä jäähdytysenergia tuotetaan paikallisesti yksittäiselle rakennukselle tai raken-

nuskompleksille, jolloin puhutaan kiinteistökohtaisesta jäähdytyksestä. Kiinteistökohtainen jäähdytys tuotetaan kiinteistöön sijoitetulla lämpöpumpulla. Eri tuotantomuotojen jakauma vuodelta 2016 on esitettyä kuvassa 1. (Kaukojäähdytystilasto 2016.)



Kuva 1. Helen Oy:n jäähdytysenergian tuotantojakauma vuonna 2016 (Kaukojäähdytystilasto 2016).

Helenin kaukojäähdytyksen tuotantokapasiteetti on yhteensä 97 MW, josta ylivoimaisesti suurin osa on tuotettu lämpöpumpuilla (kuva 1). Jäähdytystä tuotetaan 60 MW:n teholla Katri Valan lämpöpumppulaitoksessa, jossa hyödynnetään puhdistetun jäteveden hukkalämpöä sekä merivettä. Katri Valan lämpöpumppulaitos on maailman suurin samassa prosessissa kaukolämpöä ja -jäähdytystä tuottava laitos. Kesällä jäähdytystä tuotetaan lämpöpumpuilla ja talvisin jäähdytysenergia saadaan vapaajäähdytyksellä merivesilämmönsiirtimien avulla suoraan merestä. (Katri Valan lämpöpumppulaitos.)

Absorptiotekniikalla kaukojäähdytystä tuotetaan Salmisaaren kahdessa jäähdytyskeskuksessa, joiden yhteenlaskettu teho on 35 MW. Vapaajäähdytystä Helen hyödyntää mahdollisuuksien mukaan kaikessa kaukojäähdytystuotannossa, ja siitä saatava jäähdytysteho on vuodenajasta riippuen jopa 70 MW. Vuonna 2017 otettiin käyttöön Salmisaaren jäähdytyskeskuksen uudet merivesilauhdutteiset kompressorijäähdyttimet, joiden teho on yhteensä 10 MW (kuva 2). Salmisaaren lisäksi kaukojäähdytystä tuotetaan kompressoriteknikalla siirrettävissä jäähdytyskonteissa. Uusien investointien ansiosta kaukojäähdytyksen tuotantokapasiteetti tulee nousemaan 112 MW:iin vuonna 2018. (Kaukojäähdytystilasto 2016; Huusko 2017.)



Kuva 2. Toinen Salmisaaren uusista 5 MW:n kompressoreista.

Kaukojäähdytyksen vuorokautisen kulutusvaihtelun tasaamiseksi ja toimitusvarmuuden kannalta tärkeä osa on myös jäähdytysakuilla, joihin jäähdytysenergiaa saadaan varastoitua suuria määriä. Varastointi parantaa myös toiminnan kannattavuutta, sillä varastoon saa ajettua ylimääräistä tuotantoa silloin, kun jäähdytyksen tuottaminen on kaikkein kannattavinta mutta kulutusta ei ole. Tällainen tilanne on tyypillisesti yöaikaan. Akku puretaan jäähdytystarpeen ollessa suurta, jolloin jäähdytyslaitosten ei tarvitse ajaa huipputeholla. Kylmäakut ladataan noin 4–6-asteiseksi, ja kylmin vesi on pohjassa, mistä jäähdytysputketkin lähtevät. Helenin jäähdytysakut sijaitsevat Pasilassa ja Esplanadin puiston alla, ja niiden varastointiteho on yhteensä 63 MW. Pasilan ja Esplanadin jäähdytysakut ovat kallioluoliin louhittuja syviä maanalaisia järviä, joihin kylmää vettä saadaan varastoitua useita kymmeniä miljoonia litroja. (Mäki 2012: 34; Huusko 2017.)

2.1.1 Lämpöpumput

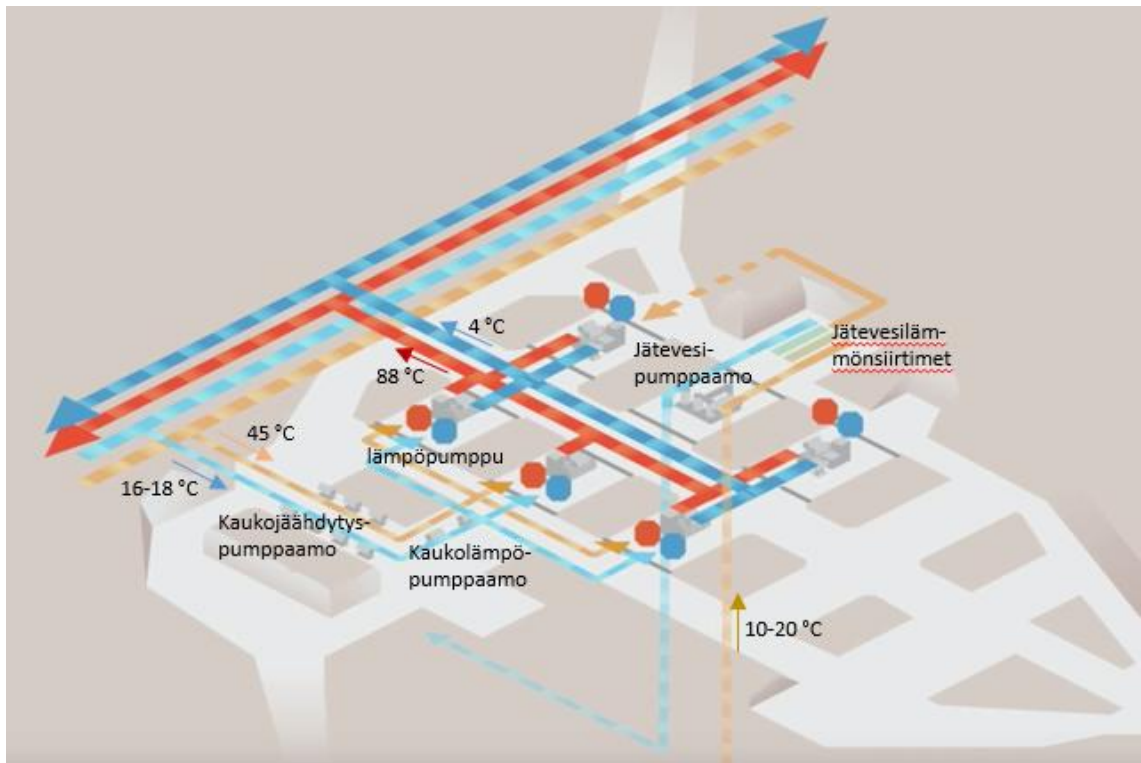
Lämpöpumppulaitoksessa tuotetaan samassa prosessissa kaukolämpöä ja -jäähdytystä. Kaukojäähdytyksen menolämpötilaa alennetaan lämpöpumpun avulla ja poistettu lämpöenergia siirretään kaukolämpöveden paluulämpötilan nostamiseen. Katri Valan lämpöpumppulaitoksessa kaukolämpöä tuotetaan myös puhdistetun jäteveden lämmöstä, joka muuten ajettaisiin mereen. Talvisin jäähdytysprosessissa käytetään lisäksi merivettä, josta saadaan jäähdytysenergiaa lämmönsiirtimien avulla. Meriveden lämpötilan tulee olla alle 6 °C, jotta vapaajäähdytystä voidaan hyödyntää. (Koskelainen ym. 2006: 539; Huusko 2017.)

Lämpöpumpun pääkomponentit ovat höyrystin, lauhdutin ja kompressori. Ennen höyrystintä tai lauhduttimen jälkeen voi olla myös nestevaraaja, johon kylmäainetta saadaan varastoitua. Nestevaraaja myös tasaa energian tarpeen vaihteluita. Lämpöpumpun kiertoprosessi perustuu olomuotoaan muuttavaan kylmäaineeseen, joka siirtää energiaa vuorotellen kaukolämmön (lauhdutin) ja kaukojäähdytyksen (höyrystin) menoveteen. Lauhduttimessa kylmäaine on korkeassa paineessa ja aluksi kaasumaisessa olomuodossa. Lauhtuessaan se luovuttaa lämpöenergiaa matalammassa lämpötilassa olevaan kaukolämmön paluuveteen lämmittäen sitä. Lämmennyt kaukolämpövesi lähtee lauhduttimesta kaukolämpöverkkoon menovetenä. Kylmäaine lauhtuu nesteeksi ja jatkaa paisuntaventtiilin kautta höyrystimeen. Paisuntaventtiili laskee kylmäaineen paineen ja samalla myös lämpötila laskee, jolloin olomuoto muuttuu höyrystimessä nesteestä kaasuksi. Höyrystimessä kylmäaine on matalammassa lämpötilassa kuin lämmönsiirtimen toisella puolella oleva kaukojäähdytyksen paluuvesi. Kylmäaine sitoo veden lämpöenergiaa itseensä jäähdyttäen kaukojäähdytyksen paluueden kaukojäähdytyksen menoveiksi. Kompressori nostaa höyrystyneen kylmäaineen painetta, ja lämpötila nousee taas korkeaksi. Kaasumainen kylmäaine palaa taas lauhduttimeen, ja näin kiertoprosessi pysyy jatkuvasti käynnissä. (Koskelainen ym. 2006: 539–540; Kaappola ym. 2011: 12–18.)



Kuva 3. Yksi Katri Valan viidestä 12 MW:n lämpöpumpusta (Katri Valan lämpöpumppulaitos).

Katri Valassa on viisi lämpöpumppua, jätevesipumppaamo ja jätevesilämmönsiirtimet sekä kaukolämpö- ja kaukojäähdytyspumppaamo (kuvat 3 ja 4). Yhden lämpöpumpun kaukojäähdytysteho on 12 MW ja kaukolämpöteho 18 MW. Jätevesi tulee Viikin jätevedenpuhdistamolta Katri Valan jätevesipumppaamoon vuodenajasta riippuen 10–20-asteisina. Jätevesipumppaamolta se pumpataan suodattimien kautta jätevesilämmönsiirtimiin, joissa jäteveden sisältämä lämpöenergia otetaan talteen. Viilentynyt jätevesi ohjataan avomerelle ja lämmennyt vesi lämpöpumpuille, missä se hyödynnetään kaukolämmön tuotannossa. Kaukojäähdytyksen paluuvesi tulee kaukojäähdytyspumppaamoon noin 16-asteisena. KJ-pumppaamosta se pumpataan lämpöpumpuille uudelleen jäähdyttäväksi, mistä se lähtee takaisin kaukojäähdytysverkkoon noin 4-asteisena. Kaukolämmön paluuvesi on 38–48 °C ja se pumpataan KL-pumppaamosta lämpöpumpuille uudelleen lämmitettäväksi, mistä se lähtee taas uuteen kiertoon asiakkaille noin 80–88-asteisena. (Hukkalämpö talteen Katri Valan lämpöpumppulaitoksessa 2015.)



Kuva 4. Katri Valan lämpöpumppulaitoksen toiminta (Hukkalämpö talteen Katri Valan lämpöpumppulaitoksessa 2015).

Esplanadin puiston alle on rakenteilla Helenin toinen lämpöpumppulaitos, joka otetaan käyttöön vuonna 2018. Lämpöpumppulaitoksen käyttöönotto lisää Helenin kaukojäähdytysverkon kokonaistehoa lähes 24 MW, josta 15 MW tuotetaan lämpöpumpuilla ja loput saadaan kylmävesivaraston jäähdytystehona. Jäähdytyksen sivutuotteena syntyy 22 MW:n teholla kaukolämpöä. (Huusko 2017.)

2.1.2 Absorptiojäähdytys

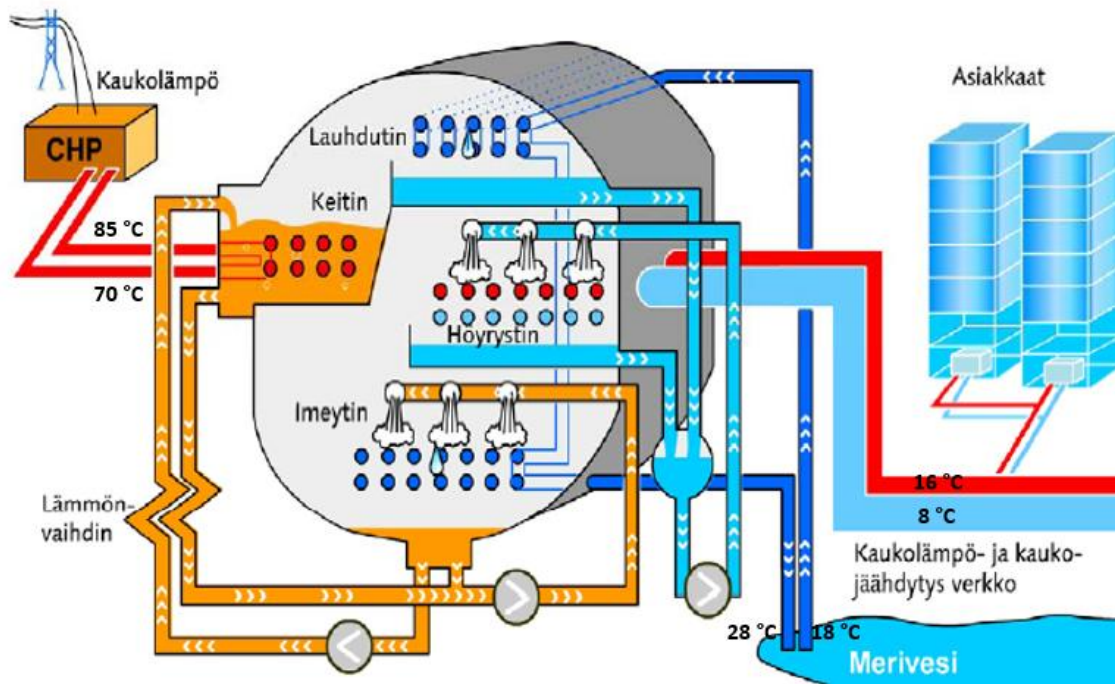
Absorptiotekniikalla hyödynnetään muuten mereen menevää ylijäämälämpöä, kuten teollisuuden hukkalämpöä ja vähäisen kulutuksen aikaista CHP-laitoksen tuottamaa ylimääräistä kaukolämpöä. Jäähdytysenergiaa tuotetaan siis lämpöenergian avulla. Absorptio tarkoittaa kaasun liukenemista nesteeseen, johon koko prosessi perustuu. Ainepareista toinen on kylmäaine ja toinen liuotin. Höyrynä olevan kaasun ja nesteeseen liuenneen kaasun välillä vallitsee tasapaino tietyssä lämpötilassa ja paineessa. Kun tätä tasapainoa muutetaan, kaasua vapautuu tai sitoutuu. Esimerkiksi lämmittämällä liuosta vakioaineessa tai painetta pienennettäessä höyryä poistuu. Helenin käyttämä työainepari on vesi ja litiumbromidi ($\text{H}_2\text{O-LiBr}$), jossa vesi toimii kylmäaineena. Kuvassa 5

näky Salmisaaren hiilluolan kahdeksan absorptiojäähdytyskonetta. (Kaukojäähdytys 2004: 1–4; Aittomäki 2008: 89–90.)



Kuva 5. Salmisaaren hiilluolan absorptiojäähdytyskoneet.

Vesihöyry absorboidaan liuottimeen imeytimestä, jossa väkevä LiBr-liuos ruiskutetaan jäähdytysputkistolle. Laimentunut liuos poistuu imeytimestä ja syntynyt absorptiolämpö poistuu jäähdytysveteen, jolla myös jäähdytetään imeytintä lauhtumis- ja liukenemislämmön kompensoimiseksi. Imeyttimessä liuos jäähtyy. Imeytinpinnalta laimea liuos pumpataan keittimeen lämmönvaihtimen läpi. Keittimessä liuosta lämmitetään ja siitä höyrystyy vettä, joka lauhtuu lauhduttimessa. Lauhtunut kylmäaine kulkeutuu höyrystimeen, jossa jäähdytettävä vesi kiertää. Osa kylmäaineesta höyrystyy jo paisuntaventtiilissä, koska paine pienenee. Väkevöity liuos palautetaan lämmönsiirtimen ja paisuntaventtiin kautta takaisin imeyttimeen, ja kiertokulku alkaa uudelleen. Prosessin primäärienergia eli käyttöenergia saadaan keittimelle tuodusta lämmöstä ja höyrystymislämpö saadaan jäähdytettävästä vedestä. Absorptiolämpöpumpun komponentit ja prosessin kulku näkyvät kuvassa 6. (Aittomäki 2008: 95; Koskelainen ym. 2006: 534.)



Kuva 6. Absorptiojäähdytyksen toimintaperiaate (Kaukojäähdytyksen järjestelmäohje 2008).

Absorptiolämpöpumpun hyötysuhde kasvaa, kun imeyttimestä poistuvaan laimentuneeseen liuokseen siirretään lämpöä kuumasta liuksesta lämmönsiirtimessä. Tuotetun jäähdytysveden lämpötilaan vaikuttaa energianlähteen lämpötila; mitä kuumempi energianlähde, sitä kylmempää jäähdytysvettä saadaan ja myös paremmalla hyötysuhteella. Absorptiojäähdytystä käytetään kesäaikana lämpöpumpputuotannon lisänä. (Kaukojäähdytys 2004: 5.)

2.1.3 Vapaajäähdytys

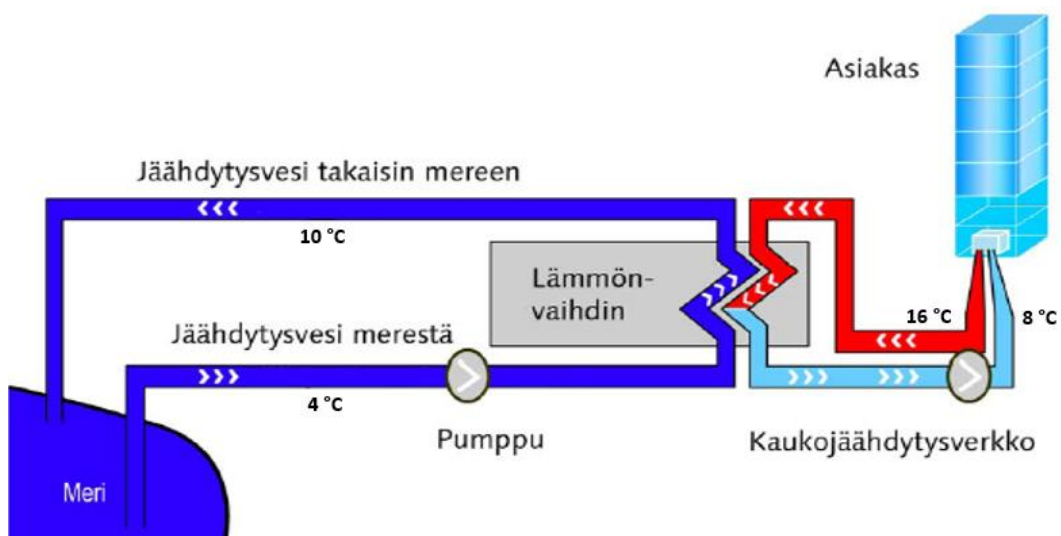
Vapaajäähdytyksellä energia tuotetaan kylmästä merivedestä, jolloin lämmönsiirtiminä toimivat merivettä sietävät titaaniset tai kuparinikkeliä olevat levylämmönvaihtimet. Lämmönvaihtimien ja pumppujen lisäksi ei muita laitteita tarvita. Meriveden käyttö jäähdytyksessä on edullista ja ympäristöystävällistä, mutta se aiheuttaa lisävaatimuksia laitteiden kunnossapidolle. Merivesi esimerkiksi pumpataan laitokselle lasikuituisia putkia pitkin, joiden läpi auringon valo pääsee helposti aiheuttaen putkiston sisälle kasvustoa. Kasvuston voi laskea biologiseksi likakerrokseksi, joka aiheuttaa virtaukseen vastusta. Tämän takia lämmönvaihtimia täytyy puhdistaa yhdestä kahteen kertaan vuodessa, jotta kasvusto ei huononna lämmönsiirtokerrointa ja veden virtaamaa. Lisäksi talvisin uhkana

on meriveden jäätyminen, joka saadaan estettyä ylläpitämällä jatkuva pieni virtaus merivesialtaassa esimerkiksi potkurin avulla. (Huusko 2017; Koskelainen ym. 2006: 531.)



Kuva 7. Levylämmönvaihdin (Frederiksen & Werner 2014).

Salmisaaren merivesipumppaamossa on kaksi pumpua, jotka pumpaavat väljän läpi kaloista, roskista ja muista epäpuhtauksista seulottua merivettä jäähdytyslaitokselle. Merivesi pumpataan vielä suodattimen läpi jäähdytyslaitoksen lämmönvaihtimille. Merivesi ja kaukojäähdytysvesi virtaavat lämmönvaihtimissa omissa kanavissaan toisiaan vasten ja energia siirtyy lämpöpintojen välityksellä (kuva 7). Vapaajäähdytyksessä kaukojäähdytyksen paluuvesi luovuttaa lämpöä matalammassa lämpötilassa olevaan meriveteen ja jäähtyy noin 8-asteiseksi, jonka jälkeen se pumpataan kaukojäähdytysverkon menoputkessa asiakkaalle. Asiakkaan kiinteistön erillisessä vesipiirissä kiertävä vesi sitoo ylimääräisen lämmön itseensä ja lämmittää asiakkaan lämmönvaihtimessa kaukojäähdytysveden, joka palautuu takaisin jäähdytyslaitoksen lämmönvaihtimelle noin 16-asteisena. Lämmönvaihtimessa merivesi lämpenee noin 10-asteiseksi ja jatkaa takaisin mereen. Vapaajäähdytyksen toimintaperiaate nähdään kuvasta 8.

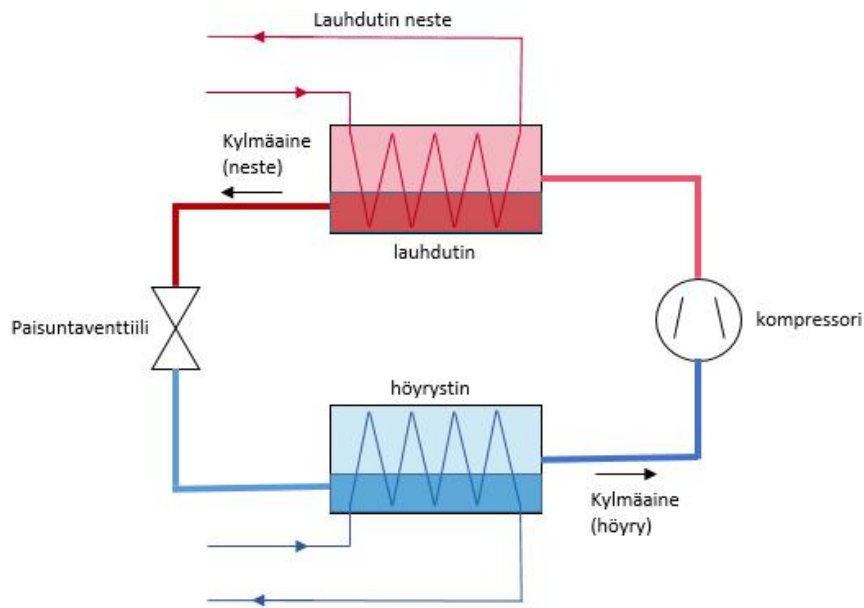


Kuva 8. Vapaaäähdytyksen toimintaperiaate (Kaukoäähdytyksen järjestelmäohje 2008).

Energianlähteinä voitaisiin käyttää myös järviä ja jokia sekä ulkoilmaa, tai jopa lunta ja jäää. Vapaaäähdytys on tuotantomuodoista kaikkein ympäristöystävällisin, mutta veden tai ulkoilman lämpötilan ollessa liian korkea tai liian kylmä ei vapaaäähdytystä voida hyödyntää. Vapaaäähdytyksellä saatavalla teholla on myös paljon vuorokausi- ja kuu-kausikohtaista vaihtelua, minkä takia sitä ei käytetä yksinään jäähdytysenergian tuotantoon vaan muiden tuotantomuotojen tukena.

2.1.4 Kompressorijäähdytys

Kompressorikoneistoon kuuluu kompressori, höyrystin, lauhtutin ja paisuntaventtiili. Lämmönsiirtämiseen käytetään kylmääainetta, joka muuttaa olomuotoaan nestemäisestä kaasumaiseksi sitoessaan lämpöä ympäristöstään ja kaasumaisesta nestemäiseksi luovuttaessaan lämpöä ympäristönsä. Kylmäaine höyrystetään matalapaineisessa höyrystimessä, joka saa lämpönsä jäähdytettävästä kohteesta. Kompressori imee kylmäainehöyryn ja puristaa sen korkeampaan paineeseen tehden työtä. Lauhduttimessa höyry lauhtuu nesteeksi luovuttaen lämpöä lauhduttimen väliaineeseen. Paisuntaventtiili laskee lauhtuneen nesteen painetta, jolloin kylmäaine alkaa höyrystymään. Neste-höyryseos virtaa höyrystimeen, missä se sitoo itseensä lämpöenergiaa ympäristöstä ja höyrystyy kokonaan. Toimintaperiaate on havainnollistettu kuvassa 9. (Koskelainen ym. 2006: 531–532; Kianta 2013: 40–42.)



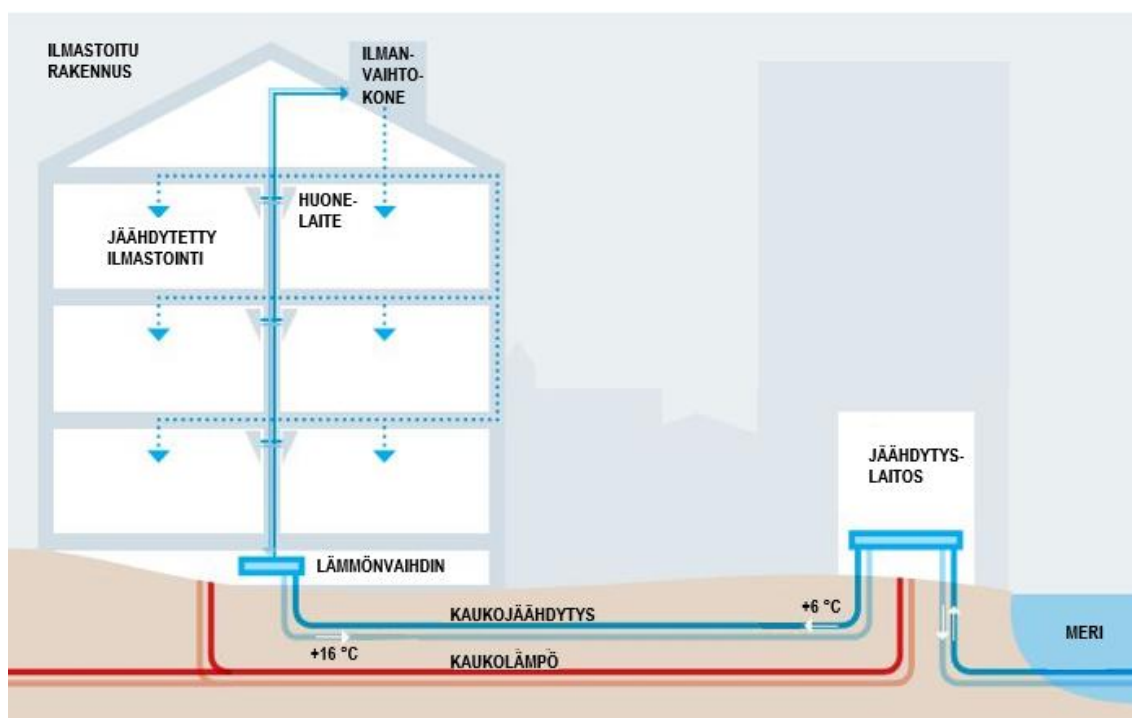
Kuva 9. Kompressorikylmäkoneen toimintaperiaate.

Kompressori toimii sähkömoottorilla, mikä aiheuttaa muita tuotantomuotoja suuremmat käyttökustannukset sähkön hinnan ollessa korkealla. Sähkön hinnan ollessa matala kompressorien käyttö on kannattavaa. Sähkön hinta on pysynyt alhaalla jo pitkään, minkä vuoksi Helen on investoinut uusiin kompressorikoneisiin. Kompressoritekniikalla vesi saadaan jäähdytettyä 3-asteiseksi. Kylmäaineena käytetään ammoniakkaa tai HFC-yhdistettä R134a, joka voidaan merkitä myös HFC 134a. Etukirjain R on kansainvälinen symboli kylmäaineille ja tulee sanasta Refrigerant. HFC-yhdisteet ovat kloorittomia halogeenihiilivetyjä, joissa hiilivetyjen vetyatomeja on korvattu halogeenimolekyyleillä. R134a on tetrafluoretaani, ja sen kemiallinen merkintä on $C_2H_2F_4$. Se on palamaton ja myrkytön, minkä takia se on tällä hetkellä saatavilla olevista kylmäaineista paras vaihtoehto kylmän tuotantoon. Kuitenkin myös HFC-yhdisteillä on ympäristövaikutuksia, joista kerrotaan luvussa 2.2.6. (Huusko 2017; Kaukojäähdytys 2004: 6; Aittomäki 2008: 111–115).

2.2 Kaukojäähdytysenergian siirto

Kaukojäähdytysenergian siirto asiakkaille ja takaisin jäähdytyslaitoksille tapahtuu kaukojäähdytysverkon kautta. Verkko on toiminnaltaan 2-putkijärjestelmä, eli se koostuu meno- ja paluupuolesta samalla periaatteella kuin kaukolämpö (kuva 10). Toimintaperi-

aate on, että jäähdytyslaitokselta tuleva jäähdytysenergia siirretään kaukojäähdytysverkon menoputkessa asiakkaan lämmönsiirtimelle. Lämmönsiirtimessä jäähdytysenergialla jäähdytetään kiinteistön puolella kiertävää vettä. Kylmää vettä käytetään kiinteistön jäähdytyslaitteissa ja ilmastointikoneiden jäähdytyspattereissa sisäilman jäähdyttämiseen. Kylmä vesi sitoo itseensä huonetilojen ylimääräisen lämmön ja palaa lämmönsiirtimelle, jossa se siirtää lämpöenergian jäähdytysveteen. Lämmennyt jäähdytysvesi johdetaan takaisin jäähdytyslaitokselle paluuputkea pitkin. Jäähdytyslaitoksella vesi jäähdytetään uudestaan ja palautetaan kiertoon menoputken kautta. Periaatteena on käyttää tuotantoon resursseja, jotka jäisivät muuten hyödyntämättä.



Kuva 10. Vapaajäähdytyksellä tuotetun kaukojäähdytyksen jakelun periaatekuva (Ilmastointi ja jäähdytys 2016).

Kaukojäähdytysverkko koostuu tunneliverkosta ja pintaverkosta. Pintaverkon maan alaiset johdot ovat yleisesti kiinnivaahdotettuja putkielementtejä (kuva 11), mutta myös PE-putkea käytetään putkimateriaalina. Tunnelleissa käytetään ainoastaan kiinnivaahdotettuja putkielementtejä. Yleisimmin käytetyt putki- ja liitosmateriaalit rakennusten sisällä ovat

- teräs
- ruostumaton ja haponkestävä teräs

- spiro
- kupari
- muovi (PE-X, monikerrospotket).

Teräspotkiston maalaaminen ruosteenestomaalilla ennen eristystä on suositeltavaa. Lämpimissä tiloissa eristeenä käytetään solukumia, sillä se pitää lämpötilan kastepisteen yläpuolella ja estää kosteuden kertymisen putken pinnalle. Villaa ei saa käyttää kostumisvaaran takia. (Rakennusten kaukojäähdytys 2014: 16–19.)



Kuva 11. Kaukojäähdytyksen jakeluun käytettävät kiinnivaahdotetut putkielementit (Aaltonen 2015).

Kaukojäähdytysjohtojen halkaisija on kaukolämpöjohtoihin verrattuna selkeästi suurempi pienemmän lämpötilaeron ja suuremman massavirran vuoksi, minkä takia kaukojäähdytysjohtoille täytyy varata enemmän tilaa maan alaisesta infrastruktuurista. KJ- ja KL-johdot sijoitetaan kadulla samaan korkoon, mutta ne sijoitetaan usein eri puolille katuja muiden maanalaisten putkien ja kaapeleiden takia. Kuvassa 11 on kiinnivaahdotettujen johtoelementtien asennustyö käynnissä Helsingin Töölössä.

2.2.1 Lämpöhäviöt

Jäähdytysenergian siirrossa syntyy lämpöhäviöitä samoin kuin lämpöenergian siirrossa, mutta erona on, että jäähdytysenergian lämpöhäviöt tarkoittavat jäähdytysjohtoihin ympäröivästä maasta kerääntyvää lämpöä. Oikea termi on siis oikeastaan kylmähäviö.

Jäähdytysjohtojen ja niitä ympäröivän maan lämpötilaero ei ole kuitenkaan suuri, joten häviöitä ei synny yhtä paljon eikä johtojen tarvitse olla yhtä hyvin eristettyjä kuin kaukolämpöjohtojen. Kylmähäviöissä on paljon kausikohtaista vaihtelua, ja suurimmat häviöt tapahtuvat elo-syyskuussa. (Frederiksen & Werner 2014: 106.)

Kiinnivaahdotetuissa johtoelementeissä on neljä eristeluokkaa, joista eristeluokka I on eristykseltään huonoin ja IV paras. Kaukojäähdytysjohdot ovat I-eristeluokkaa, kun taas kaukolämpöjohdoissa käytetään aina suurempaa eristeluokkaa. Kiinnivaahdotettujen johtoelementtien eriste ja kuori johtavat lämpöä, mikä vaikuttaa lämpöhäviöiden suuruuteen. Myös maaperän lämmönjohtavuus tulee huomioida lämpöhäviöiden laskennassa sekä maan pinnan lämmönsiirtoeroin. Häviöiden suuruuteen vaikuttaa kuitenkin eniten virtausputken ja suoja kuoren halkaisijan suuruus (taulukko 1). (Kaukolämpöjohtojen eristyspaksuuden optimointityökalu 2Mpuk 2009.)

Taulukko 1. Kiinnivaahdotettujen johtojen lämpöhäviöt I-eristeluokassa.

Johtokoko	Virtausputken ulkohalkaisija	Suoja kuoren ulkohalkaisija	Lämmönsiirtoeroin ympäristöön	Lämpöhäviö yhteensä (meno- ja paluujohto)
DN	dt, mm	Ds, mm	hs	W/m
80	88,9	160	0,0287	2,37
100	114,3	200	0,0302	2,49
125	139,7	225	0,0349	2,91
150	168,3	250	0,0411	3,48
200	219,1	315	0,0449	3,77
300	323,9	400	0,0706	6,25
500	508	600	0,0872	7,82
600	610	700	0,1016	9,30
700	711	800	0,1149	10,69
900	914	1000	0,1416	13,58

Taulukosta 1 nähdään I-eristeluokan kiinnivaahdotettujen elementtien johtojen kokoja ja niiden lämpöhäviöitä. Häviöt ovat sitä suurempia, mitä suurempi johtokoko on kyseessä. Kaukojäähdytysveden matalasta lämpötilasta johtuen lämpöhäviöt ovat kuitenkin erittäin pieniä, esimerkiksi suuremmallakin johtokoolla DN500 vain 7,82 W/m. Vertaisarvona kaukolämmön jakelussa vastaava lämpöhäviö samassa eristeluokassa on 96,93 W/m. Johtokoolla on suuri vaikutus myös rakentamiseen hintaan, sillä suuremmat johdot aiheuttavat suuremmat maarakennustyö- sekä materiaalikustannukset. Esimerkiksi johtokoolla DN80 suuntaa antavat rakentamiskustannukset ovat 500 €/m ja johtokoolla

DN700 1900 €/m. Energiatehokkuutta kokonaisuudessaan voidaan mitata myös yksikössä €/MWh, jolloin lämpöhäviöiden energiamäärä lasketaan jakamalla tuotantokustannukset johtometrien lämpöhäviöiden(W/m) ja laitoksen ajotuntien(h) tulolla. Energiatehokkuutta mittaavia suureita käytetään usein osana investoinnin kannattavuuden arviointia. (Kaukolämpöjohtojen eristyspaksuuden optimointityökalu 2Mpuk 2009.)

2.2.2 Laatuksiteerit

Kaukojäähdytysjohtoina käytetään Energiateollisuuden suosituksen L1/2016 mukaisia EHP-sertifioituja kiinnivaahdotettuja jäykkärakenteisia putkirakenteita ja standardin SFS-EN 15632-4 mukaisia joustavia putkirakenteita. Laatuvaatimukset koskevat myös kaukojäähdytysputkiston asennustyötä eli hitsaus- ja liitostöitä, joihin vaaditaan Energiateollisuuden myöntämät pätevyystodistukset. Hitsausaumojen on vastattava vähintään SFS-EN ISO 5817:n C-hitsiluokkaa, ja liitosten tulee olla tiiviitä ja kestää käytön aikaiset kuormitukset. Ensiöpuolen putkiasennuksissa käytettävät hitsaus- ja laippaliitokset ovat SFS-EN-standardien sekä Helenin suosituksen ja ohjeiden mukaisia. Hitsattavien putkien lujuuskerroin tulee olla 1,0. Lämpömittarien lukematarkkuuden on oltava vähintään 0,5 °C ja ainemittareiden tarkkuusvaatimusten tulee olla standardin SFS-EN 837 mukaiset. Putkien kannakointi tehdään valmistajien ohjeiden mukaisesti niin, että se kestä lämpöliikkeen ja virtauksen aiheuttamat rasitukset sekä kaikkien mahdollisten kuormitusten painon. (Rakennusten kaukojäähdytys 2014: 14–20.)

2.2.3 Kaukojäähdytysvesi

Kaukojäähdytysvesi käsitellään voimalaitoksella samalla tavalla kuin kaukolämpövesi. Veden käsittelyssä vesi pehmennetään ja siitä poistetaan kerrostumia muodostavat yhdisteet sekä happi. Lisäksi kiertoveden pH-arvoa säädetään niin, että korroosion riski rakennemateriaaleille on mahdollisimman vähäinen. Korroosio-ongelmia aiheuttavat myös ruostuneet putket ja asennustyön aikana verkkoon päässeet epäpuhtaudet, esimerkiksi hiekka tai jätteet. Kiertoveden käsittelyllä ja lisä- ja täyttöveden laadulla varmistetaan pitkä käyttöikä sekä verkoille että voimalaitoskomponenteille. (Kaukolämmön kiertoveden käsittely 2007.)

2.2.4 Jakelulämpötilat

Kaukojäähdytyksen jakelulämpötila asiakkaille on 4–8 °C, riippuen tuotantotavasta ja vallitsevista sääolosuhteista. Kesällä helleaikana menolämpötilaa joudutaan laskemaan. Kylmintä jäähdytysvettä saadaan tuotettua vapaajäähdytyksellä, kun merivesi on 0-asteista. Myös kompressorijäähdytyskoneilla päästään alle 4 °C:seen. Kaukojäähdytyksen jakelussa pyritään 7 °C:n menolämpötilaan ja noin 16 °C:n paluulämpötilaan. Kulutuskohteessa veden tulisi lämmitä aina vähintään 7 °C, jotta lämpötilaero on tarpeeksi suuri ja siirtokustannukset pysyisivät kohtuullisina.

Taulukko 2. Vuoden 2017 kesäkuukausien lämpötiloja Helsingissä.

Kuukausi	Keskilämpötila (°C)	Kuukauden ylin lämpötila (°C)
toukokuu	9,5	27
kesäkuu	13,7	26,2
heinäkuu	16	27,6
elokuu	16,2	26

Etelä-Suomessa ulkolämpötila on suurimman osan vuodesta alle 15 °C, ja esimerkiksi vuoden 2016 keskilämpötila Helsingin Kaisaniemen mittausasemalla oli 6,6 °C. Kesän keskilämpötila oli 16,5 °C ja hellepäiviä oli kesäkuukausina yhteensä 35. Taulukosta 2 nähdään vuoden 2017 kesäkuukausien lämpötiloja. Kesäkuukausien keskilämpötila oli vuonna 2017 vain 13,9 °C, ja kylmän kesän takia kaukojäähdytyksen kulutus oli pienempää kuin aiempien vuosien lämpiminä kesinä. Ruotsissa sääolosuhteet ovat melko vastaavat kuin Suomessa, ja esimerkiksi Göteborg Energi mitoittaa jäähdytysveden lämpötilan liukuvasti ulkolämpötilan mukaan. Ulkolämpötilan ollessa yli 10 °C lämpötilaero kasvaa asteittain alkaen 4 °C:sta. Lämpötilaeron on oltava vähintään 9 °C, kun ulkolämpötila on 26 °C tai enemmän. Kyseinen liukuva lämpötilaeron mitoitus parantaa kylmäkoneen kylmäkerrointa ja jäähdytysverkon joustavuutta. (Koskelainen ym. 2006: 541; Kuukausitilastot; Kaukojäähdytys 2004: 7–8.)

2.2.5 Johtojen mitoitus

Johdot mitoitetaan eri tavalla ensiö- ja toisiopuolella. Ensiöpuoli kattaa energiayhtiön omistukseen kuuluvat putket ja laitteet, toisiopuoli asiakkaan putket ja laitteet. Kaukojäähdytysveden virtausnopeus on ensiöpuolella 1–2 m/s. Toisiopuolen putket mitoitetaan

virtausnopeudelle 0,5 m/s, sillä jo 1 m/s virtausnopeus aiheuttaa eroosio- ja korroosiovaaran. Rakennepaine ensiöpuolen putkissa on 1,6 MPa, toisiopuolella 1,0 MPa ja tunneleissa 2,5 MPa. Paine-ero mittauskeskuksen jälkeen on normaalikäyttötilanteessa 100 kPa. Hitsattavat teräs- ja RST-putket ensiöpuolella mitoitetaan painehäviöllä 200 Pa/m, jos matka mittauskeskuksesta lämmönsiirtimille on enintään 25 m. Putken painehäviö maan alaisissa kaukojäähdytysputkissa on sama kuin kaukolämpöputkessa eli 1 bar/km, mutta tehon siirto on noin kuudesosa kaukolämmön tehonsiirrosta johtuen huomattavasti pienemmästä lämpötilaerosta. (Rakennusten kaukojäähdytys 2014: 16 & liite 12; Kaukojäähdytys 2004: 8–9.)

Kaukojäähdytystehon siirtoon voidaan vaikuttaa massavirtaa säätelämällä; mitä suurempi johtokoko, sitä suurempi massavirta ja enemmän tehoa. Esimerkiksi DN100–johtokoolla tehoa saadaan siirrettyä 370 kW, kun DN500–johtokoolla vastaava määrä on 19 500 kW. Kaukojäähdytyksen maan alaiset runkojohdot ovatkin suurilta osin DN600–johtoja ja talojohdotkin ovat kokoluokaltaan DN125–DN200, eli puolet suurempia kuin kaukolämpöjohdot keskimäärin. (Koskelainen ym. 2006: 541; Helen WebMap.)

2.2.6 Ympäristövaikutukset

Kaukojäähdytyksen aiheuttamat ympäristövaikutukset ovat hyvin riippuvaisia tuotantomenetelmästä. Kaikkein ympäristöystävällisin tuotantomenetelmä on vapaajäähdytys. Eniten päästöjä aiheuttaa sähkökäyttöinen kompressorijäähdytys, mutta myös lämpöpumput käyttävät runsaasti sähköä. Kompressorijäähdytyksessä sähkön lisäksi ympäristövaikutuksia aiheuttaa myös kylmäaine, mutta kylmäaineena toimivat otsonikerrokselle täysin haitattomat HFC-kylmäaineet eli kloorittomat hiilivedyt, kuten R134a. HFC-kylmäaineet luokitellaan kuitenkin kasvihuonekaasuiksi, ja EU aikoo heikentää niiden saatavuutta vuoteen 2030 mennessä. Vaatimuksena on, että HFC-yhdiste saisi sisältää pelkästään fluoria, mikä rajaa mahdolliset vaihtoehdot pieneksi. Ympäristövaikutuksia voi aiheuttaa myös kaukojäähdytysputkissa eristeenä toimiva polyuretaani, joka vapauttaa lämmitettäessä myrkyllisiä kaasuja. Eristettä tulee tämän takia poistaa virtausputkesta hitsauskohdan läheltä vähintään 100 mm:n etäisyydeltä ennen hitsaustyötä. (Koskelainen ym. 2006: 531–532; Hakala & Kaappola 2005: 23.)

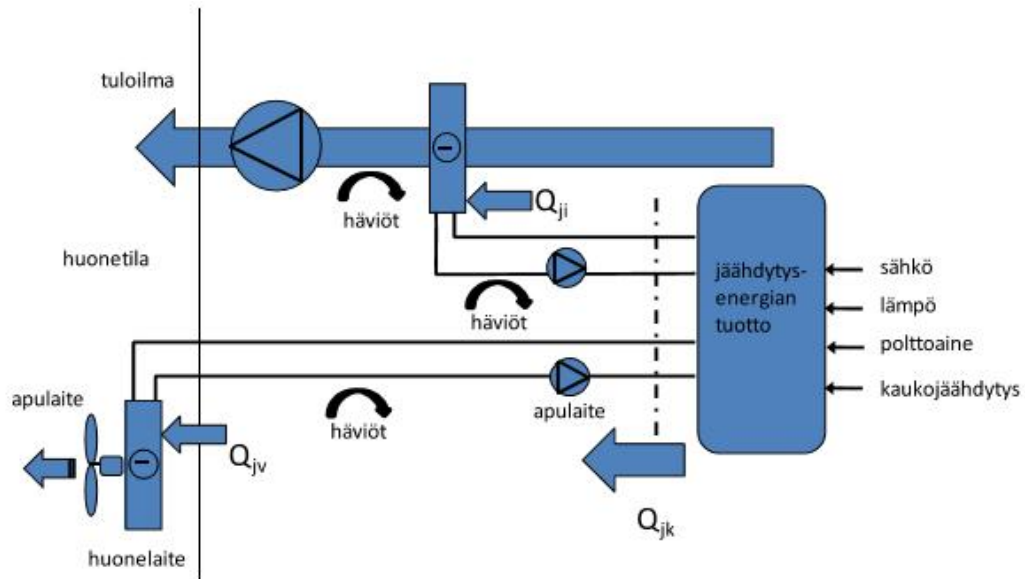
Kaukojäähdytyksessä on kuitenkin monia hyviäkin puolia ympäristön kannalta, ja se on monilta osin parempi vaihtoehto kuin kiinteistökohtaiset jäähdytysjärjestelmät. Kiinteistökohtainen sähkönkulutus pienenee merkittävästi, mikä vähentää kasvihuonekaasujen

sekä rikkidioksidi- ja hiukkaspäästöjen määrää. Esimerkiksi jos kiinteistön jäähdytysteho on 500 kW, hiilidioksidipäästöt laskevat 90 000 t vuositasolla ja primäärienergiaa säästyy 360 MWh. Esplanadin puiston alla olevat uudet lämpöpumput tulevat vähentämään Helsingin omia hiilidioksidipäästöjä jopa 20 000 t. Kaukojäähdytystä käyttämällä vähenee myös otsonikatoa aiheuttavien kylmäaineiden käyttö, joita on aina kiinteistökohtaisissa jäähdytysjärjestelmissä kiertoaineena. Kun yksi iso laitos jäähdyttää suurta määrää rakennuksia, päästöjen kokonaismäärä on pienempi kuin rakennuskohtaisissa, pienissä jäähdytysyksiköissä yhteensä. Lisäksi energiatehokkuus kasvaa, kun hukkalämpö saadaan kierrätettyä ja hyödynnettyä uudelleen. (Päästölaskuri; Frederiksen & Werner: 264–269.)

3 Rakennusten jäähdytysjärjestelmät

Rakennusten jäähdytysjärjestelmät ovat ilmastointijärjestelmiä, jotka koostuvat ilmastointikoneista ja -kanavista sekä huonelaitteista. Jäähdytysjärjestelmät voidaan jakaa keskitettyihin ja hajautettuihin järjestelmiin sekä suoriin ja välillisiin järjestelmiin. Keskitetyssä ilmastoinnissa jäähdytyksessä tuloilmaa jäähdytetään jäähdytyspatterin avulla, kun taas hajautetussa ilmastoinnissa jäähdytyksessä huonetiloja jäähdytetään erillisillä pattereilla, jotka ilmaa kierrättävät. Suorassa järjestelmässä kylmäkoneiston höyrystimen lämmönsiirtopinta jäähdyttää ilmavirtaa. Välillinen järjestelmä taas toimii niin, että höyrystin jäähdyttää väliainetta, joka jäähdyttää ilmavirtaa patterin välityksellä. (Koskelainen ym. 2006: 529–530; Aittomäki 2008: 334.)

Jäähdytysjärjestelmät voidaan luokitella tyypin mukaisesti seuraaviin: ilmajärjestelmät, vesijärjestelmät, ilma-vesijärjestelmät ja hajautetut järjestelmät. Ilmajärjestelmissä jäähdyttämiseen käytettävä jäähdytysenergia tuodaan tiloihin ilmavirran avulla, vesijärjestelmissä vesivirran avulla tai näitä molempia yhdistämällä. Hajautetuissa järjestelmissä jäähdytysenergia tuotetaan huone- tai yksikkökohtaisesti ja ilma vaihtuu erillisellä laitteella. Kuvassa 12 on esitettyä jäähdytysjärjestelmän toimintaperiaate ja se, missä vaiheissa häviöitä syntyy. Kuvassa Q_{jk} kuvaa tuotettua jäähdytysenergiaa, Q_{ji} jäähdytyspatterin käyttämää energiaa ja Q_{jv} huonelaitteiden käyttämää energiaa. (Koskelainen ym. 2006: 552; Jäähdytysjärjestelmän energialaskentaopas 2011: 5.)



Kuva 12. Jäähdytysjärjestelmän periaatekuva (Jäähdytysjärjestelmän energialaskentaopas 2011).

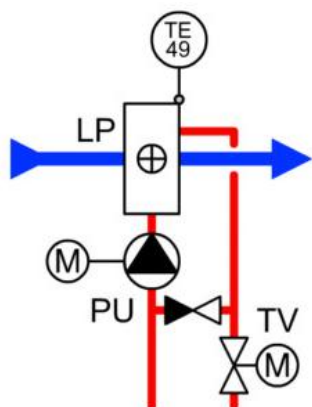
Jäähdytysjärjestelmän energiankulutus lasketaan jäähdytysenergian nettotarpeesta huomioiden jäähdytyksen häviöt ja apulaitteiden sähkönkulutus. Häviöt koostuvat putkistojen kylmähäviöistä ympäröiviin tiloihin ja huonelaiteiden mahdollisista kondenssihäviöistä, ja niitä kuvataan häviökertoimella. Järjestelmän ilma- ja vesipuolelle on omat häviökertoimet, joista vesipuolen häviökerroin ottaa huomioon vain termiset häviöt. Ilmapuolen häviökerroin huomioi termiset-, kondenssi- ja muut häviöt. Kaukojäähdytyksen häviökerroin riippuu menoveden lämpötilasta ja jäähdytyslaitteistosta, ollen 0,1–0,2 luokkaa. Apulaitteiden sähkönkulutus sisältää jäähdytysenergian jakeluun tarvittavan pumpausenergian sekä esimerkiksi puhallinenergian. Sähkönkulutukseen vaikuttaa järjestelmän tyyppin mukainen kulutuskerroin. Jäähdytysjärjestelmän apulaitteiden sähköenergian kulutus on kulutuskertoimen ja järjestelmällä tuotetun vuotuisen jäähdytysenergian tulo. Esimerkiksi vesijärjestelmiin kuuluvan jäähdytyspalkkijärjestelmän sähkön kulutuskerroin on 0,06 ja puhallinkonvektorin kulutuskerroin 0,08. (Koskelainen ym. 2006: 550; Jäähdytysjärjestelmän energialaskentaopas 2011: 7–15.)

3.1 Ilmajärjestelmät

Ilmajärjestelmiä ovat vakioilmavirtainen CAV-järjestelmä (Constant Air Volume System) ja muuttuva ilmavirtainen VAV-järjestelmä (Variable Air Volume System). CAV-järjestelmässä ilmastointikone pitää yllä vakituista ilmavirtaa, jota puhalletaan jäähdytettävään

tilaan tuloilmakoneella. Järjestelmän ilmavirrat mitoitetaan kesän aikaisen jäähdytystarpeen mukaan, ja päätelaitteella tuloilman lämpötila voi olla alimmillaan noin 16–18 °C. Tulo- ja poistoilmalaitteet sijoitetaan jäähdytettävän tilan alakattoon tai seinään. VAV-järjestelmässä ilmavirtaa voidaan säätää huonekohtaisesti, vyöhykekohtaisesti tai konekohtaisesti. Huonelämpötilan säätö saadaan aikaiseksi ilmavirtaa muuttamalla. Jäähdytysveden lämpötila jäähdytyspatterissa on noin 7 °C. Myös VAV-järjestelmässä tuloilman lämpötila voi olla päätelaitteessa alimmillaan noin 16–18 °C. (Sandberg 2014: 129–135.)

Keskeisin komponentti ilmajärjestelmissä on ilmastointikone, joka ohjaa ilman huoneisiin kanavistoa pitkin. Ilmastointikoneet tasoittavat huoneen lämpötilan lisäksi suhteellista kosteutta. Samalla ilmavirralla hoidetaan jäähdytyksen lisäksi myös lämmitys ja ilmanvaihto (kuva 13). (Koskelainen ym. 2006: 552.)



Kuva 13. Ilmastointikoneen kytkentä (Lämpöpatteri).

Vakioilmastointikoneet voivat olla suoria tai välillisiä jäähdytysjärjestelmiä. Suorissa jäähdytysjärjestelmissä kompressoreja on yksi tai kaksi, ja suuritehoisimmat on varustettu usein kahdella kylmäainepiirillä. Jäähdytyspatteri hoitaa jäähdytyksen sekä kuivauksen ja kostutin kostutuksen. Lämmitykseen käytetään ilmastointikoneen omaa lämmityspatteria. Kuivaustarve syntyy kosteuskuormasta, jota ilmanvaihto ei pysty poistamaan tilasta. Ilman jälkilämmitys, jota tarvitaan kuivauksen yhteydessä, tehdään kuumalla vedellä, sähköllä tai koneikon kuumakaasulämmöllä. Kuivaustoiminto voidaan toteuttaa esimerkiksi jäähdytysventtiiliä tai kiertoilmamäärää säätämällä sekä jakamalla jäähdytyspatteri kahteen lohkokoon, jolloin höyrystimen tehollinen lämpöpinta pienenee. Tämä aiheuttaa sen, että höyrystymislämpötila laskee ja vesi erottuu ilmasta patterille tehokkaammin. Välillisissä jäähdytysjärjestelmissä jäähdytysnesteen lämpötilan tulee

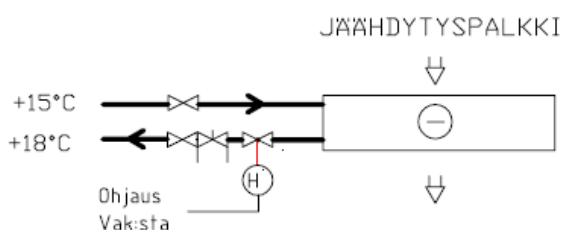
olla tarpeeksi matala, jotta patterin pintalämpötila saadaan alle kastepisteen ja vesi saadaan erottumaan. Kaukojäähdytysverkoston jäähdytysveden korkean lämpötilatason takia kuivausvaikutusta ei saada aikaiseksi normaaleissa huoneolosuhteissa ja laitekoot ovat suurempia kuin suorissa järjestelmissä. (Aittomäki 2008: 344–347.)

3.2 Vesijärjestelmät

Vesijärjestelmiä ovat passiiviset jäähdytyspalkit, kylmävesijäähdytteiset jäähdytyspatterit sekä erillisen tulo- ja poistoilman omaavat puhallinkonvektorit. Vesijärjestelmässä jäähdytysteho tuodaan huoneeseen jäähdytetyn veden avulla, eikä tuloilman lämpötilaa säädetä jäähdytys- tai lämmitystarpeen mukaan. Ilmavirta mitoitetaan ilmanvaihdon tarpeen mukaisesti ja ia ilmanvaihto on oma erillinen järjestelmänsä. Huonelämpötilaa säädetään vesivirtaa säätämällä. Vesikiertoiset järjestelmät ovat nykyään yleisin jäähdytysjärjestelmämuoto. (Koskelainen ym. 2006: 552; Sandberg 2014: 129–130.)

3.2.1 Jäähdytyspalkit

Jäähdytyspalkkijärjestelmät ovat kattoon asennettavia laitteita, joita käytetään tilakohtaiseen jäähdytykseen. Niiden toiminta perustuu luonnolliseen ilmankiertoon tai pakotettuun konvektioon palkin sisällä olevan jäähdytyspatterin läpi (kuva 14). Palkkityyppejä on sekä passiivisia että aktiivisia, ja näistä passiiviset toimivat luonnollisella ilmankierrolla ja aktiiviset pakotetulla konvektiolla, minkä lisäksi ne toimivat jäähdyttämisen lisäksi tuloilman päätelaitteina. Passiivijäähdytyspalkissa huoneilmaa kierrätetään jäähdytyspatterin läpi ilman paine-eron vaikutuksesta, eikä siinä ole erillistä puhallinta. Järjestelmän jäähdytystehoa säädetään 2-tiesäätöventtiilin avulla. Aktiivijäähdytyspalkissa konvektio saadaan aikaan puhallimella ja puhallin säättää ilman virtausta. Palkkijärjestelmissä tehon säätö tehdään huonelämpötila-anturin mittaustulosten perusteella.

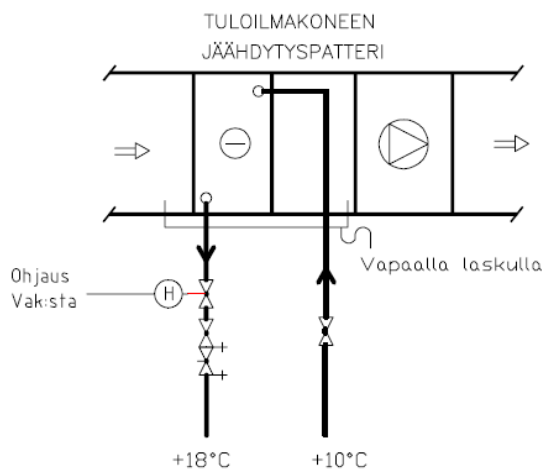


Kuva 14. Jäähdytyspalkin toiminta (Kaukojäähdytyksen järjestelmäohje 2017).

Jäähdytyspalkit mitoitetaan muita jäähdytyslaitteita lämpimämmälle jäähdytysvedelle, 15 °C tulovedelle ja 18 °C lähtevälle vedelle. Tämä johtuu siitä, että jäähdytyspalkit ovat kuivia lämmönsiirtimiä, eli niihin ei saa kondensoitua huoneilman kosteutta eikä niitä varusteta kondenssiveden poistoviemäreillä. Kondensoimisen estämiseksi tuloilman kuivaaminen ja veden riittävän korkea lämpötila on jäähdytyspalkkien käytössä erityisen tärkeää. Palkkien lämpötila tulee aina pitää ilman kastepistelämpötilan yläpuolella. (Kaukojäähdytyksen järjestelmäohje 2017: 37; Kaappola ym. 2011: 95.)

3.2.2 Jäähdytyspatterit

Jäähdytyspatteri on nestekiertoinen lämmönsiirrin, joka jäähdyttää ilmastointikoneen tulo- ja kiertoilmaa. Se voidaan asentaa tuloilmakanavaan tai ilmanvaihtokoneen sisälle, ja kiertoaineena toimii jäähdytysvesi. Patteri yhdistyy jäähdytysvesiverkostoon vesiputkipiiriin päihin liitettävillä kokoojatukeilla. Vesiputket ovat poikittaisessa suunnassa ilmavirtaan nähden (kuva 15). Patteri mitoitetaan tarvittavan jäähdytystehon ja jäähdytysveden lämpötilatasojen mukaan. Veden lämpötilan mitoitusarvot ovat 10 °C/18 °C. Ulkoilman lämpötilana mitoituksessa voidaan käyttää esimerkiksi 27 °C ja suhteellisena kosteutena 50 %. Mitoituksessa tulee huomioida myös ilma- ja vesivirtausten painehäviöt, jotka kasvattavat järjestelmän pumppaus- ja puhallinkustannuksia. Jäähdytystehoa säädetään 2-tiesäätöventtiilillä ja ohjataan huonelämpötila-anturien tai kiinteistön poistoilman lämpötila-anturien mittaustulosten perusteella valvomokeskuksesta. (Kaukojäähdytyksen järjestelmäohje 2017: 36; Sandberg 2014: 148; Jäähdytysjärjestelmän energialaskentaopas 2011: 5.)

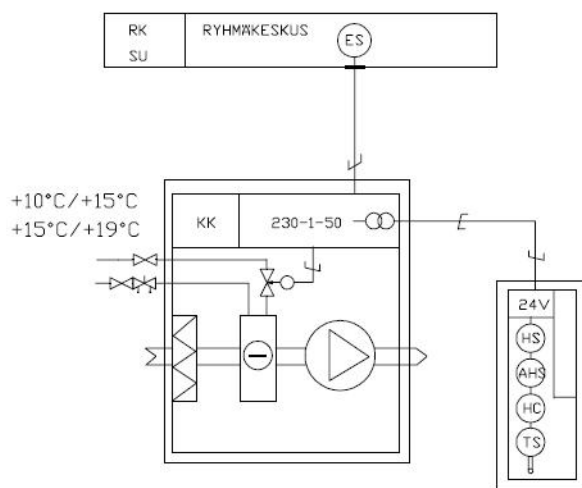


Kuva 15. Tulo- ja kiertoilmakoneen jäähdytyspatteri (Kaukojäähdytyksen järjestelmäohje 2017).

Patteriin kondensoituu kosteutta ilmasta, koska sen lämmönsiirtopinnan lämpötila on patterille tulevan ilman kastepisteen alapuolella. Patteri kuivaa sisätilaan menevää ilmaa sen mukaan, mikä on haluttu tuloilman suhteellinen kosteus. Kondensoituva vesi poistuu kondenssialtaasta viemäriin.

3.2.3 Puhallinkonvektorit

Puhallinkonvektorit ovat huoneistokohtaisia puhaltimella varustettuja pattereita, jotka voidaan asentaa koteloituna kattoon, seinälle tai lattialle. Ne voivat olla myös koteloimattomia, jolloin ne asennetaan ikkunapenkkiin tai alakattoon. Puhallinkonvektorin toimintaperiaate on, että puhallin kierrättää huoneilmaa jäähdytyspatterin läpi ja aiheuttaa patteriin pakotetun konvektion. Ilma jaetaan konvektorin sivuista huonetilaan. Kylmävesijäähdytteen puhallinkonvektorin jäähdytysteho on helposti säädettävissä 2-tiesäätöventtiilillä, jolla säädetään laitteen jäähdytysvesivirran ja kiertoilman määrää. Sääto tehdään muuttamalla puhallinmoottorin kierrosnopeutta kolmessa portaassa. Venttiileitä ohjataan joko automaatiojärjestelmästä tai erillisillä huonesäätimillä. Puhallinkonvektorit mitoiteetaan tyypillisesti 24 °C:n huonelämpötilan mukaan. Virtauksen lämpötilojen mitoitusarvot ovat ensiöpuolella 10 °C/15 °C ja toisiopuolella 15 °C/19 °C (kuva 16).



Kuva 16. Puhallinkonvektorin kytkentä (Kaukojäähdytyksen järjestelmäohje 2017).

Järjestelmä suunnitellaan kondensoituvaksi tai kondensoimattomaksi. Kondensoimaton eli kuiva järjestelmä mitoiteetaan korkeammalle huonelämpötilalle, ja patterille menevän jäähdytysnesteen lämpötilan on oltava korkeampi kuin tulevan ilman kastepisteen. Kon-

densoivassa järjestelmässä patterille tulevan jäähdytysveden lämpötila voi olla matalampi kuin huoneilman kastepistelämpötila. Järjestelmään on tällöin lisättävä kondenssivesiallas joko vapaalla laskulla tai pumpulla varustettuna ja konvektorit on varustettava kondenssivesiputkilla. (Aittomäki 2008: 343–344; Kaukojäähdytyksen järjestelmäohje 2017: 36; Kaappola ym. 2011: 94–95.)

3.3 Ilma-vesijärjestelmät

Ilma-vesijärjestelmiä ovat suutinkonvektorijärjestelmät ja lattiaviilennysjärjestelmä. Järjestelmän ilmavirta määräytyy tarvittavan ilmanvaihdon mukaan ja ilman lämpötila vuodenajan mukaan. Jäähdytysteho tuodaan huoneeseen sekä ilman että veden mukana, tuloilmalla ja jäähdytysvesipatterilla. Tuloilma kuivataan, jotta huoneilman kosteus ei pääse tiivistymään jäähdytyspatteriin. Ilma-vesijärjestelmissä jäähdytystehoa pystyy säätämään huonekohtaisesti. (Koskelainen ym. 2006: 552; Sandberg 2014: 130.)

Suutinkonvektorijärjestelmä muistuttaa puhallinkonvektorijärjestelmää, mutta puhaltimien tilalla ovat ilman kierrätyksen aikaansaavat tuloilmakanavat ja niiden suuttimet. Kierrätysilma kulkee konvektiopatterin läpi. Huonelaitteet yhdistetään toisiinsa tuloilmakanavan avulla ja huoneen lämpötilaa säädetään vesiputkien säätöventtiileillä. Lattiaviilennysjärjestelmä asennetaan usein lattialämmitysjärjestelmän yhteyteen, jolloin lämmitys- ja jäähdytysvettä kierrätetään samassa lattiaputkistossa. Jäähdytysjärjestelmässä huoneilmasta siirtyy lämpöä putkessa kiertävään veteen ja lattian pintalämpötila laskee. Lattiaviilennysputkistot asennetaan niin, että viilennettäviin tiloihin rakennetaan oma verkosto, johon sisältyy pumpput ja säätimet. Lattiarakenteen lämpötila täytyy pitää kastepisterajan yläpuolella, jotta rakenteisiin ei pääse tiivistymään kosteutta. Tilakohtaiset termostaatit säätävät huoneiden lämpötiloja viilennystarpeen mukaan ohjaamalla tilojen viilennyspiirejä auki tai kiinni. (Sandberg 2014: 140; Kaukojäähdytyksen järjestelmäohje 2017: 38.)

3.4 Hajautetut järjestelmät

Hajautetut järjestelmät ovat paikallisia järjestelmiä, joissa kiertävä ilma jäähdytetään suorahöyrystyksellä sijoitustilassa. Hajautetun järjestelmän laitteita ovat ikkunakoneet, multisplit- ja VRV-laitteet sekä pienet siirrettävät jäähdytyslaitteet ja vesilauhdutteiset

konsolikoneet. VRV-järjestelmä koostuu kompressorista, taajuusmuuttajasta ja elektronisesta paisuntaventtiilistä sekä kylmäaineputkistosta. Järjestelmään voidaan liittää myös tuloilmakoneessa oleva suorahöyrysteinen jäähdytyspatteri. Laite voi olla lattialla, seinällä tai katossa. Multisplit-laite on ilmansuodatuslaite, joka koostuu yhdestä ulkoyksiköstä ja viidestä sisäyksiköstä. Hajautettuja järjestelmiä käytetään pienten yksittäisten tilojen sekä huoneistojen jäähdyttämiseen. Vesilauhdutteiset konsolikoneet sopivat lähinnä serveri- ja laitetilojen varajäähdytyskoneeksi. (Aittomäki 2008: 336–337; Daikin VRV filosofia.)

Uutena hajautettuna järjestelmänä markkinoille on tullut kiinteistöjäähdytys. Kiinteistöjäähdytys on paikallinen kiinteistökohtainen kaukojäähdytysjärjestelmä, jossa rakennusta jäähdytetään lämpöpumpuilla. Lämpöpumppujen avulla kiinteistöstä kerätty ylimääräinen lämpö kierrätetään kaukolämpöverkkoon tai kiinteistön omaan kaukolämpöliittymään. (Helen intranet.)

4 Kiinteistökohtaiset laitteet

Kiinteistöt liitetään kaukojäähdytysverkkoon yleensä epäsuoralla kytkennällä, jolloin rakennuksen jäähdytysjärjestelmä muodostaa oman erillisen kiertopiirinsä. Kaukojäähdytysputkiston ja rakennuksen kiertopiirin yhdistää laitetilassa sijaitseva lämmönsiirrin. Kytkehtävällä pyritään maksimoimaan jäähdytysveden lämpeneminen ja täten pienempi vesivirran tarve esimerkiksi lämmönsiirtimien rinnan kytkennällä. Pienissä, muutaman asiakkaan jäähdytysjärjestelmissä voidaan harkiten käyttää myös suoraa kytkentää, jolloin rakennuksen jäähdytysjärjestelmässä kiertää kaukojäähdytysvesi. (Koskelainen ym. 2006: 546; Kaukojäähdytys 2004: 12.)

4.1 Ensiö- ja toisiopuoli

Kaukojäähdytysputkisto ja -laitteet on jaettu ensiö- ja toisiopuoleen. Ensiöpuolella on muun muassa mittauskeskus, energian kulutusta valvova energiamittari ja venttiilit, jotka ovat kaikki energiayhtiön laitteita. Ensiö- ja toisiopuolen raja kulkee mittauskeskuksen jälkeisissä sulkuventtiileissä, joiden jälkeen kaikki on toisiopuolen laitteita. Toisiopuolen laitteet ovat asiakkaan omistuksessa. Asiakaslaitteista merkittävin on jäähdytyskeskus,

joka sisältää lämmönsiirtimet, säätö- ja pumppauslaitteet, venttiilit, putkiston ja muut varusteet. Jäähdytyskeskus on liitettyä käyttövesi- ja jäähdytysverkostoon, paisuntalaitteisiin sekä mittauskeskukseen. Lisäksi asiakkaalla tulee olla useita lämpötila-antureita, esimerkiksi menovettä ja ulkolämpötilaa mittaavia antureita sekä säätökeskukseen liitetyjä antureita.

4.2 Jäähdytystarpeen mitoitus

Rakennusten jäähdytystehontarve vaihtelee suuresti rakennustyyppin, energiankulutuksen ja huipun käyttöajan mukaan. Suurin tehontarve ja huipun käyttöaika on atk-tiloilla ja kauppakeskuksilla, kun taas asuinrakennusten tehontarve on melko pieni ja ajoittuu kesäaikaan. Väliin sijoittuvat toimistorakennukset, joiden standardikäytön mukainen käyttöaste on rakentamismääräyskokoelman D3 mukaan 0,65 ja vuotuinen käyttöaika 2500 tuntia. Uudenaikaisen 2000-luvun puolella rakennetun toimiston jäähdytystarve on jopa 20 % suurempi kuin 1980-luvulla rakennetun, sillä parempi eristys estää lämmön vuotamisen ja aiheuttaa yllilämmön kerääntymistä. (Airaksinen ym. 2015: 7-11).

Jäähdytystarpeen oleellisin mitoituskriteeri on halutun huonelämpötilan tavoitearvossa pysyminen. Huonelämpötilan tavoitearvoon vaikuttaa rakennustyyppin mukaiset rakentamismääräyskokoelmissa asetetut määräykset, ohjeet ja asetetut jäähdytysrajat. Jäähdytysraja sisäilman lämpötilalle on asuinrakennuksissa 27 °C ja muissa rakennuksissa 25 °C, joista sallitaan kesäkuukausina enintään 150 astetunnin poikkeama. Yksi astetunti tarkoittaa, että lämpötila on tunnin ajan yhden asteen sallittua korkeampi, esimerkiksi liikerakennuksissa 26 °C. Rakennusten jäähdytystarpeen laskennassa täytyy ottaa huomioon sisäiset ja ulkoiset lämpökuormat, jotka luovuttavat lämpöä sisätiloihin. Sisäistä lämpökuormaa aiheuttavat mm. sähkölaitteet, valaistus ja ihmiset (taulukko 2). Ulkoista lämpökuormaa aiheuttavat eniten auringon säteet, joiden lisäksi myös rakenteista, tuloilmasta ja vuotoilmasta konvektoiduu lämpöä. Auringon säteiden aiheuttaman ulkoisen lämpökuorman laskennallinen vaikutus on sitä suurempi, mitä enemmän rakennuksessa on ikkunapinta-alaa. (Koskelainen ym. 2006: 550; Sandberg 2014: 419–439.)

Taulukko 3. Sisäisten lämpökuormien arvoja eri rakennuksissa (Sisäilmastoluokitus 2009).

Rakennus/tila	Kellonaika	Käyttöaika		Henkilötiheys m ² /hlö	Käyttöaste	Valaistus W/m ²	Laitteet W/m ²	Ihmiset ^{1), 4)} W/m ²
		h/vrk	vrk/vko					
Asuintilat (pientalo)	00:00–24:00	24	7	37	0,6	8 ²⁾	2,4 ³⁾	2
Asuintilat (kerrostalo)	00:00–24:00	24	7	25	0,6	8 ²⁾	3 ³⁾	3
Toimistotilat	07:00–18:00	11	5	12	0,55	12	15	6
Neuvottelutilat	08:00–17:00	9	5	3	0,6	12	18..60	25
Luokkahuoneet	08:00–16:00	8	5	2	0,5	18	12	35
ATK-luokat	08:00–16:00	8	5	2	0,6	18	75	35
Päiväkotitilat	07:00–18:00	12	5	2	0,4	18	12	35
Liiketilat	07:00–21:00	14	7	17	0,55	15..70	8	5
Majoitustilat (hotelli)	00:00–24:00	24	7	19	0,5	14	7	4
Ravintolatilat	10:00–22:00	10	7	3	0,4	20	20	26
Urheiluhallit	07:00–23:00	14	7	21	0,6	20	24	5
Terveystilat	00:00–24:00	24	7	8	0,8	9	3	10

¹⁾ Ei sisällä latenttia lämpöä, kokonaislämmönluovutus saadaan jakamalla kertoimella 0,6.

²⁾ Asuinrakennusten valaistuksen käyttöaste on 0,1.

³⁾ Asuinrakennusten laitteiden sähkönkäyttö lasketaan jakamalla lämmönluovutus kertoimella 0,7.

⁴⁾ Simulointiohjelmissa käytetään henkilön lämmönluovutuksena 125 W (1,2 met, kehon pinta-ala 1,8 m²). Kouluissa ja päiväkodeissa käytetään lasten lämmönluovutuksena 110 W (1,0 met, kehon pinta-ala 1,8 m²).

Jäähdytysjärjestelmän energianlaskentamenetelmät jaetaan yksinkertaiseen, vuositasoon suuntaa antavaan menetelmään ja yksityiskohtaiseen, rakennuksen energiasimulointiin perustuvaan laskentamenetelmään. Yksinkertaisella laskentamenetelmällä tukeudutaan taulukoituihin ohjearvoihin järjestelmän mitoituksessa ja yksityiskohtaisella menetelmällä määritetään jäähdytysenergian tarve tuntitasolla. Kaukojäähdytystä käytävälle järjestelmälle lasketaan vuotuinen energiantarve kaavalla

$$Q_{\text{jäähdytys}} = \frac{Q_{jk}}{\varepsilon_Q}, \quad (1)$$

missä Q_{jk} tarkoittaa jäähdytysjärjestelmällä tuotettua vuotuista jäähdytysenergiaa ja ε_Q jäähdytysenergian tuotto prosessin vuotuista kylmäkerrointa. Kylmäkerroin määritetään prosessilla tuotetun jäähdytysenergian suhteesta prosessiin käytetyn energian määrään. Kaukojäähdytyksen kylmäkerroin on 1. (Ympäristöministeriö 2011: 4–7.)

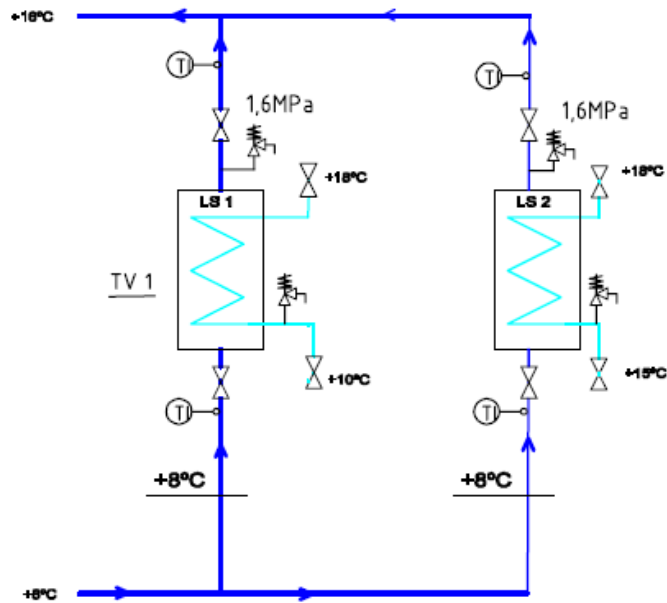
Kullekin asiakkaalle määritetään sopimusteho eli suurin tarvittava jäähdytysteho, jonka arvo on kohteesta riippuen 100–5000 kW väliltä. Jäähdytysjärjestelmän jäähdytystehontarve saadaan laskettua kaavalla

$$\theta = \dot{m} \times c \times \Delta T, \quad (2)$$

missä θ on jäädytysteho, \dot{m} on massavirta, c on veden ominaislämpökapasiteetti (4,2 kJ/kg*K) ja ΔT on lämpötilaero. Jäädytystehoon vaikuttaa siis oleellisesti lämpötilaero ja virtauksen suuruus. Asiakkaan sopimuksessa onkin määritettynä myös suurin kaukojäädytysveden tilavuusvirtaus, sopimusvesivirta (m^3/h), joka on riippuvainen tarvittavasta jäädytystehosta. Usein asiakas käyttää kuitenkin huomattavasti vähemmän mitoitetusta tehosta, sillä huipputehontarve rajoittuu usein vain noin kymmeneen päivään vuositasona. Ensiöpuolen putket mitoitetaan lasketun vesivirran mukaan niin, että mitä suurempi virtaus, sitä suurempi nimelliskoko. Sallittu kokonaispainehäviö ei saa myöskään ylittyä. Asiakaskohteen jäädytystekninen mitoitus esitetään kaukojäädytys suunnitelmassa, johon on selvitetty teho- ja energiatarpeet ja joka on osa rakennuksen LVI-suunnitelmaa. (Hakala & Kaappola: 205–206; Rakennusten kaukojäädytys 2014: 29–30.)

4.3 Kiinteistökohtaisten laitteiden mitoitus

Kaukojäädytyksen liitäntäteho mitoitetaan noin 8 °C meno- ja paluupuolen lämpötilaeron mukaan ja lämmönsiirtimet hetkellisen jäädytystehon tarpeen mukaan. Lämmönsiirtimiä on tehon tarpeesta riippuen yksi tai useampi. Lämmönsiirtimien virtausarvot määrittävät jäädytyspumpun mitoituksen. Meno- ja paluuv veden pienen lämpötilaeron vuoksi lämmönsiirtimien lämmönsiirtokyky on oltava erityisen hyvä. Siirtimen suositeltava asteisuus eli rakennuksen jäädytysverkoston paluulämpötilan ero suhteessa kaukojäädytyksen paluulämpötilaan on 1–2 °C. Lämmönsiirtimet varustetaan DN 15 -varoventtiileillä sekä ensiö- että toisiopuolella, ensiöpuolen avautumispaine on 1,6 MPa ja toisiopuolen 1,0 MPa. Mittauskeskuksen jälkeen käytettävissä oleva paine-ero on 100 kPa. Suurimmat sallitut painehäviöt ovat lämmönsiirtimissä ensiöpuolella 30 kPa ja toisiopuolella 50 kPa, putkistoissa 10 kPa ja 20 kPa. Kiinteistön lämmönsiirtimet mitoitetaan niin, että ensiöpuolella tulolämpötila on 8 °C ja paluulämpötila 16 °C (kuva 17). Toisiopuolella menolämpötila on 10 °C ja paluulämpötila 18 °C. Hakala & Kaappola 2005: 208–209; Koskelainen ym. 2006: 546–547; Energiategollisuus 2014: 7–24.)



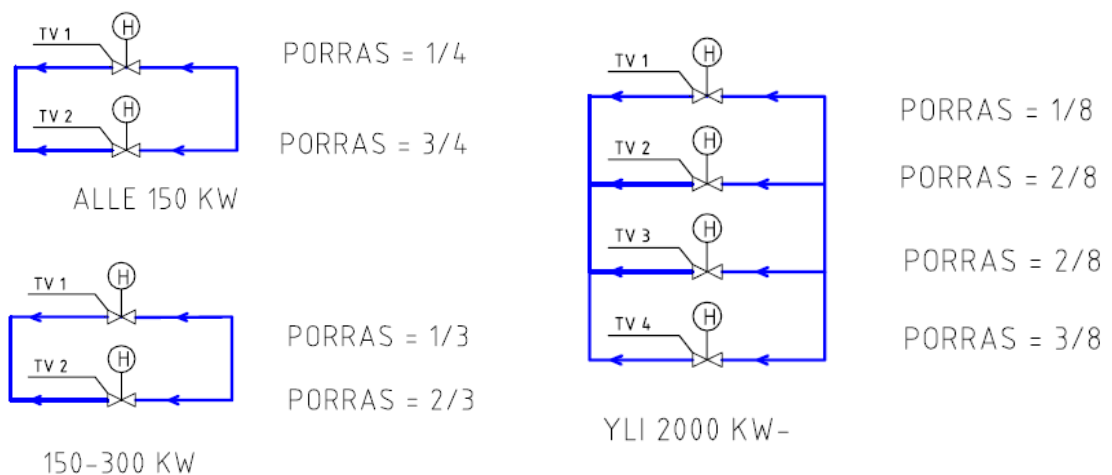
Kuva 17. Kahden lämmönsiirtimen mitoitus yli 500 kW:n kohteissa (Kaukojäähdytyksen järjestelmäohje 2017).

Säätöjärjestelmillä varmistetaan hyvä sisäilmasto rakennuksen kaikissa tiloissa ja käyttötilanteissa sekä mahdollisimman pieni energiankulutus. Säätöventtiilien mitoituksessa on tärkeää huomioida sopimuksenmukainen paine-ero ja lämmönsiirtimien painehäviö. Myös säätöventtiilille on varmistettava riittävä painehäviö, mikä on oltava vähintään puolet jäähdytyskeskuksen kokonaispainehäviöstä kyseissä säätöpiirissä. Ensiöpuolen venttiilit mitoitetaan jäähdytystehon tarpeen mukaisesti ja niitä lisätään tarvittaessa myöhemmin. Asuinrakennuksissa ja noin 100 kW:n sopimustehon kohteissa pärjätään yhdellä säätöventtiilillä, muuten käytetään useampaa rinnakkaista säätöventtiiliä (taulukko 3). Asiakas pystyy itse säätämään tarvitsemaansa kaukojäähdytystehoa määritetyn sopimustehon ja sopimusvesivirran rajoissa niin, että sallittu jatkuva huojunta on enintään 0,5 °C. Suurin hetkellinen poikkeama asetusravosta saa olla enintään 2 °C ja suurin pysyvä poikkeama 1 °C. (Rakennusten kaukojäähdytys 2014: 10–11.)

Taulukko 4. Virtaamien jakaminen useammalle säätöventtiilille tehon mukaan. (Rakennusten kaukojäähdytys 2014).

Teho kW	Säätöventtiilien lkm	Suhteelliset virtaamat (lasketaan kokonaisvirtaamasta)			
		TV 1	TV 2	TV 3	TV 4
alle 150 kW	2	1/4	3/4		
150...300 kW	2	1/3	2/3		
300...2000 kW	3	1/6	2/6	3/6	
yli 2000 kW	4	1/8	2/8	2/8	3/8

Taulukosta 4 nähdään, kuinka suhteelliset virtaamat jaetaan usealle rinnakkaiselle säätöventtiilille aina niin, että ensimmäisen venttiilin läpi lasketaan pienin ja viimeisen venttiilin läpi suurin osa virtaamasta. Esimerkiksi lämmönsiirtimen ensiöpuolen virtauksen ollessa $100 \text{ m}^3/\text{h}$ ovat säätöventtiilien virtaamat $16,7 \text{ m}^3/\text{h}$, $33,3 \text{ m}^3/\text{h}$ ja $50,0 \text{ m}^3/\text{h}$, kun kokonaisvirtaama jaetaan kolmelle säätöventtiilille. Jos säätöventtiileitä olisi kaksi ja teho 150–300 kW, jakaantuisi $33,3 \text{ m}^3/\text{h}$ virtaamasta ensimmäiselle ja $66,7 \text{ m}^3/\text{h}$ toiselle venttiilille. Kuvassa 18 on esitettyinä säätöportaajat kun venttiileitä on kaksi tai neljä sekä niiden sijoitus.



Kuva 18. Venttiilien säätöportaajat kahden ja neljän säätöventtiilin mitoituksessa (Kaukojäähdytyksen järjestelmäohje 2017).

Kun mittauskeskuksen jälkeen käytettävissä oleva paine-ero on esimerkiksi 100 kPa , venttiilien paine-ero tulee olla noin 50 kPa . Lämmönsiirtimille jää sitten maksimipaine-eroksi 50 kPa .

5 Kaukojäähdytyksen paluulämpötilan nostaminen

Kaukojäähdytyksen meno- ja paluupuolen riittäväällä lämpötilaerolla on suuri vaikutus jäähdytysenergian siirtoon ja järjestelmien toimivuuteen. Jos lämpötilaero on liian pieni, joudutaan virtaamaa kasvattamaan, mikä hankaloittaa tehon siirtoa ja lisää pumppauskustannuksia. Jo yhden asteen lämpötilaeron kasvulla on suuri vaikutus tehon siirtoon, sillä lämpötilaeron kasvaessa tarvittava tilavuusvirta pienenee. Kaukojäähdytysverkosto ei myöskään toimi optimaalisimmalla tavalla, jos monilta kuluttajilta palautuu liian kylmää vettä. Kaukojäähdytyksen paluulämpötilaa nostamalla parannettaisiin toimitusvarmuutta asiakkaille sekä varmistettaisiin ehjä elinkaari kaukojäähdytystoiminnalle myös tulevaisuudessa.

Tarvetta kaukojäähdytyksen paluulämpötilan nostamiselle Helsingin verkossa olisi, sillä paluulämpötilat Helenin jäähdytyslaitoksille ovat keskiarvoltaan selkeästi alle 16 °C:n tavoitearvon (taulukko 5). Lämpötilaerotkin ovat selkeästi pienempiä, kuin järjestelmän optimaalisen toiminnan kannalta olisi hyvä. Tietokannasta löytyykin paljon kuluttajia, joiden lämpötilaero meno- ja paluuveden välillä on hälyttävän pieni. Yksi tällainen kuluttaja saattaa viedä jopa 5 % koko kaukojäähdytysverkon hetkellisestä vesivirtauksesta.

Taulukko 5. Helenin jäähdytyslaitosten lämpötila, teho- ja virtausarvoja jäähdytyskausilta 2015–2017.

Jäähdytyslaitos	Jäähdytyskausi	Paluulämpötila (°C)	Lämpötilaero (°C)	Tilavuusvirta (m ³ /h)	Teho (kW)
SaX	2015	10,9	3,0	331,6	1157
	2016	12,7	3,1	455,2	1641
	2017	13,7	1,9	368,4	814
ShX	2015	10,6	3,0	982,2	3427
	2016	12,5	4,2	752,6	3676
	2017	-	-	-	1649
KV	2015	11,6	4,4	3094,3	15834
	2016	11,5	4,4	3765,3	19268
	2017	11,4	5,3	2964,8	18275

Taulukon 5 arvot ovat ajalta 1.5.–30.9. vuosilta 2015–2017. Tehoarvot ovat tarkkoja arvoja, muut ovat mittausten keskiarvoja kyseiseltä ajanjaksolta. ShX:n vuoden 2017 mitausarvot eivät olleet luotettavia, joten niitä ei voitu käyttää. Taulukosta nähdään, että

kaikissa jäähdytyslaitoksissa olisi varaa parantaa kaukojäähdytyksen paluulämpötilaa. Missään ei kuitenkaan paluulämpötilan keskiarvo alita 10 °C, mikä on positiivista. Kuitenkin esimerkiksi vuonna 2015 SaX- ja ShX -jäähdytyslaitoksissa oli jäähdytyskaudella 1152 tuntia, jolloin paluulämpötila oli alle 10 °C ja lämpötilaero alle 3 °C. Tämä tarkoittaa, että paluulämpötila oli 34 % jäähdytystä tuotetusta ajasta alle 10 °C.

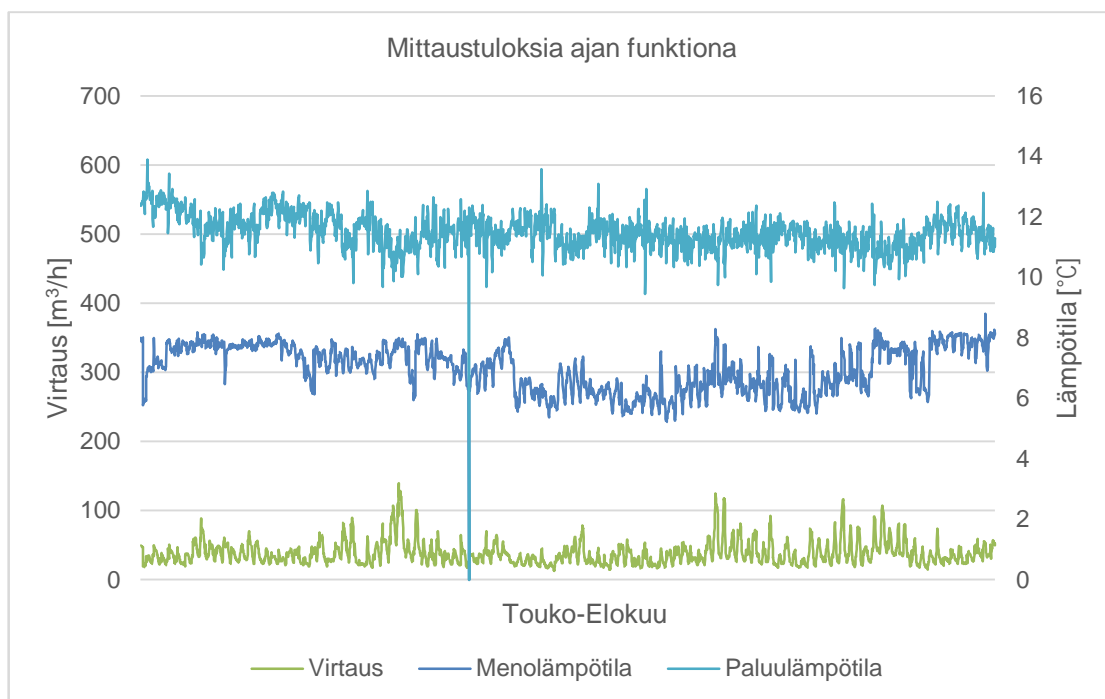
5.1 Mahdolliset referenssikohteet

Mahdollisia referenssikohteita lähdettiin kartoittamaan Generis-ohjelman avulla, josta nähdään valitulta ajanjaksolta kaikkien kuluttajien virtauksen määrät ja paluuveden lämpötilat. Myös käyttöaste oli merkittävä tekijä kartoituksessa, sillä se kertoo prosentuaalisen osuuden kuluttajan käyttämästä sopimus- eli tilaustehosta. Tarkasteltava ajanjakso, josta tuntikohtaiset tiedot ajettiin, oli 1.6.–24.6.2017. Lisäksi toisesta ohjelmasta tarkasteltiin mittauksia koko kesän ajalta sekä vuoden ajalta, aikaväliltä 1.10.2016–30.9.2017.

Ensimmäinen tehtävä oli löytää 10 kuluttajaa, joilla oli suuri käyttöaste ja tilausteho sekä matala paluulämpötila. Generiksestä laskettiin keskiarvot kuluttajien käyttöasteelle ja paluulämpötiloille ja alettiin vertailemaan niitä. Kohteet, joissa oli pieni tilausteho, karsittiin pois, sillä virtausmäärät ovat silloin merkityksettömän pieniä. Valitut 10 kuluttajaa esiteltiin ryhmäpäälliköille ja niistä valittiin 3 potentiaalisinta referenssikohteiksi.

Kohde A

Kohde A on hotelli Helsingin keskustassa, joka käyttää jäähdytystä myös talvikaudella. Sopimusteho kohteessa on 1 000 kW, eli asiakas on merkittävä kaukojäähdytyksen käyttäjä. Tarkasteltavana ajankohtana kohteen käyttöaste oli 0,39 ja kaukojäähdytysveden paluulämpötila 7,4 °C, eli lämpötilaero meno- ja paluupuolen välillä lähes olematon. Vuoden mittajakson ajalta 1.10.2016–30.9.2017 lukemat ovat selkeästi paremmat. Kaukojäähdytyksen paluulämpötila oli keskiarvoltaan 12,79 °C ja lämpötilaero 5,24 °C. Virtauksen määrä tuntikohtaisesti jaettuna oli 20 m³/h ja jäähdytysteho 123 kW. Jos lämpötilaero olisi esimerkiksi 7 °C, vastaava jäähdytysteho samalla virtauksella olisi ollut 164 kW. Mittaustuloksiin laskettiin vain sellaiset tunnit, kun virtausta oli vähintään 1 m³/h. Kuvissa 19 ja 20 näkyvät kohteen A meno- ja paluulämpötilat sekä virtauksen määrät talvi- ja kesäkaudella.



Kuva 19. Kohde A:n meno- ja paluulämpötilat sekä virtaama kesällä 2017.

Kuvasta 19 nähdään, että virtaus on selkeästi suurempi kesällä, kun jäähdytystarvekin on suurempi. Virtauksen keskiarvo kesäkaudella oli 38,2 m³/h. Myös meno- ja paluulämpötilat pysyvät kohtuullisen tasaisina.

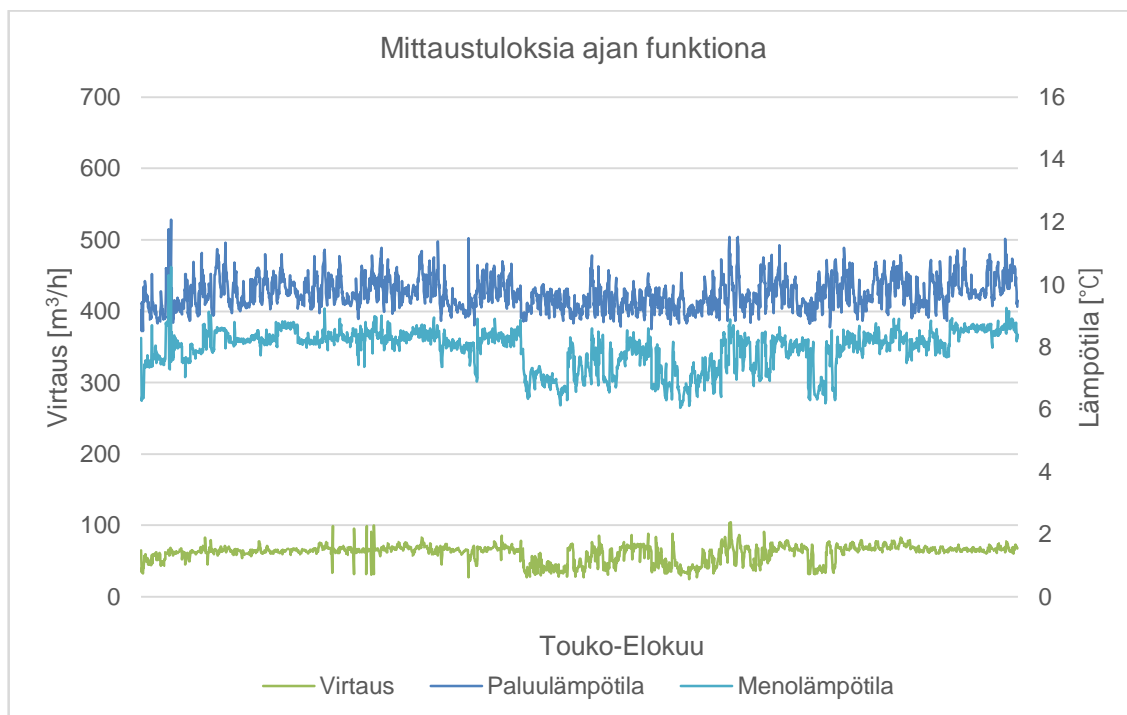


Kuva 20. Kohde A:n meno- ja paluulämpötilat sekä virtaama talvella 2016–2017.

Kuvassa 20 sininen väri kuvaa virtausta, punainen kaukojäähdytyksen menolämpötilaa ja vihreä paluulämpötilaa. Kuviosta puuttuu asteikko, mutta menolämpötila vaihtelee noin 6 °C ja 8,5 °C välillä. Paluulämpötilan vaihtelu on suurempaa, 9 °C ja 18 °C välillä. Kuviosta 2 nähdään, että virtausmäärät ovat talvikaudella pieniä, keskimäärin 17,2 m³/h. Kaukojäähdytyksen menolämpötila pysyy melko tasaisena, kun taas paluulämpötila heittelee suuresti. Tämä saattaa johtua siitä, että tehontarve on pientä eikä kulutusta ole, jolloin lämpöä ei saada kerättyä tarpeeksi. Kuviosta nähdään myös, että virtaus suurenee lämpötilaeron ollessa pieni.

Kohde B

Kohde B on yksityinen hoitolaitos, jolla on suurien jäähdytystä tarvitsevien laitteiden takia kulutusta ympäri vuoden. Kohteen käyttöaste oli 0,62, tilausteho 1 000 kW ja kaukojäähdytysveden paluulämpötilan keskiarvo tarkastelujaksolla 9,8 °C. Vuoden mittausjakson ajalta ero paluulämpötilan keskiarvoon on vain 0,1 °C, sillä koko vuoden keskiarvo on 9,9 °C. Lämpötilaeron keskiarvo koko vuodelta on 1,7 °C, eli jäähdytysjärjestelmä toimii erittäin epädullisesti. Jäähdytystehoa saatiin siirrettyä keskimääräisellä virtauksella 59,3 m³/h vain 116,6 kW, kun vastaava määrä 7 °C lämpötilaerolla olisi ollut 482,7 kW. Kuvasta 21 nähdään kohteen mittaustulokset kesäkaudelta 2017.

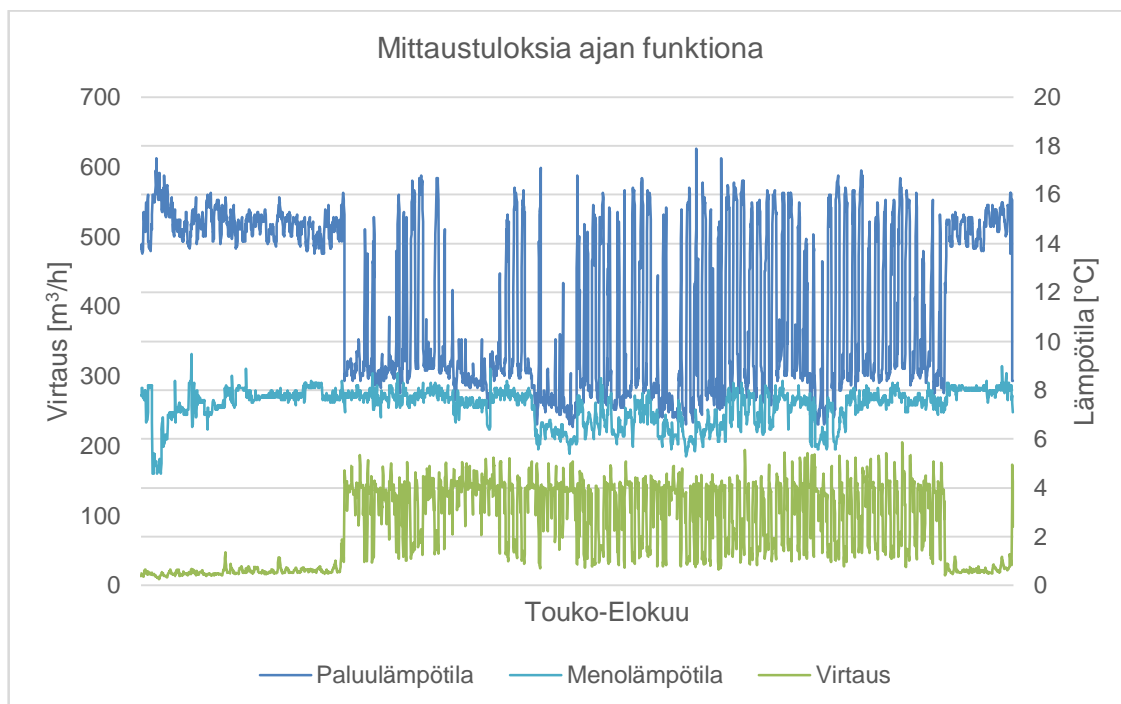


Kuva 21. Kohteen B meno- ja paluulämpötilat sekä virtaama kesällä 2017.

Kohteen B virtauksessa ja meno- ja paluulämpötiloissa on suurta vaihtelevuutta, kuten kuviosta 3 voidaan huomata. Virtauksen vaihteluväli on 25–105 m³/h ja keskiarvo 61,9 m³/h. Virtaus on pienimmillään, kun meno- ja paluulämpötilojen ero on suurimmillaan. Vastaavasti ajankohdat, joissa lämpötilaero on hyvin pieni, virtaus on suuri. Kaukojäähdytyksen paluulämpötila on parhaimmillaankin vain 12,1 °C ja huonoimmillaan 8,5 °C.

Kohde C

Kohde C on keskikokoinen kauppakeskus, jonka sopimusteho on 3 320 kW. Käyttöaste kesäkuun tarkastelujaksolla oli keskiarvoltaan 0,27 ja paluueden lämpötila 10,7 °C. Koko vuoden keskiarvo paluueden lämpötilalle oli 13 °C ja lämpötilaero meno- ja paluupuolen välillä 5,3 °C. Virtaus oli tuntikohtaisesti jaettuna 42,4 m³/h ja teho 261,1 kW. Vertausarvona käytettävällä 7 °C:een lämpötilaerolla tehoa olisi siirretty 344,8 kW. Kaukojäähdytyksen mittausten suuri vaihtelevuus nähdään kuvasta 22.



Kuva 22. Kohde C:n meno- ja paluulämpötilat sekä virtaama kesällä 2017.

Kuvasta 22 nähdään hyvin selkeästi, kuinka paljon lämpötilaero vaikuttaa virtauksen määrään. Kesän alkupuolella lämpötilaeron ollessa noin 7 °C, virtaus on 20 m³/h luokkaa. Lämpötilaero kapenee huomattavasti kesäkuun alkupuolella, jonka jälkeen virtauksen määrä kasvaa jopa 187 m³/h. Tämä tarkoittaa, että saman jäähdytystehon siirtämiseen joudutaan vettä pumppaamaan moninkertainen määrä. Äkillinen muutos virtauksessa voisi selittyä järjestelmän säätöjä muuttamalla rakennuksesta käsin, jos jäähdytystehoa on yritetty kasvattaa. Virtaus palautuu normaaliksi taas elokuun puolessa välissä, kun lämpötilat ovat taas kohdillaan. Keskimääräinen paluulämpötila kesältä oli 11,7 °C ja virtausmäärä 84,8 m³/h.

5.2 Vaikutukset jäähdytysenergian siirtoon

Monilla kuluttajilla kaukojäähdytyksen lämpötilaero on liian pieni, jolloin virtaus kasvaa kohtuuttomasti. Kuluttajien palauttama liian kylmä paluuvesi näkyy myös jäähdytyslaitosten toiminnassa, sillä se vaikuttaa myös laitosten lämpötilaeroon ja vesivirtaan. Tämä

vaikuttaa myös verkon siirtokapasiteettiin heikentävästi. Taulukosta 6 näkee, kuinka lämpötilaeron kasvu parantaa tehon siirtoa eri putkikoissa. Esimerkiksi DN500–johtokoolla tehon siirto paranee noin 244 %, kun lämpötilaero kasvaa 4 °C:sta 10 °C:seen.

Taulukko 6. Lämpötilaeron vaikutus jäähdytysenergian siirtoon eri putkikoilla (Husko 2017).

DN	Vir- taama [m ³ /h]	ΔT [°C]	Teho [Mw]	ΔT [°C]	Teho [Mw]	ΔT [°C]	Teho [Mw]	ΔT [°C]	Teho [Mw]
200	200	4	0,9	6	1,4	8	1,9	10	2,3
300	569	4	2,6	6	4,0	8	5,3	10	6,6
400	1039	4	5	6	7	8	10	10	12
500	1883	4	9	6	13	8	18	10	22
600	3043	4	14	6	21	8	28	10	35
700	4541	4	21	6	32	8	42	10	53
800	6466	4	30	6	45	8	60	10	75

Lämpötilaeron kasvattaminen vaikuttaa tehon siirron lisäksi myös pumppauskustannuksiin. Jäähdytysveden pumppaamiseen kunkin laskentatunnin aikana tarvittava energia lasketaan yhtälöllä

$$W_{pu} = \frac{\Delta p_{pu} V}{\eta_{pu}} t \quad (3)$$

W_{pu} on jäähdytysveden pumppausenergia (kWh)

Δp_{pu} on pumpattavan piirin maksimi painehäviö (kPa)

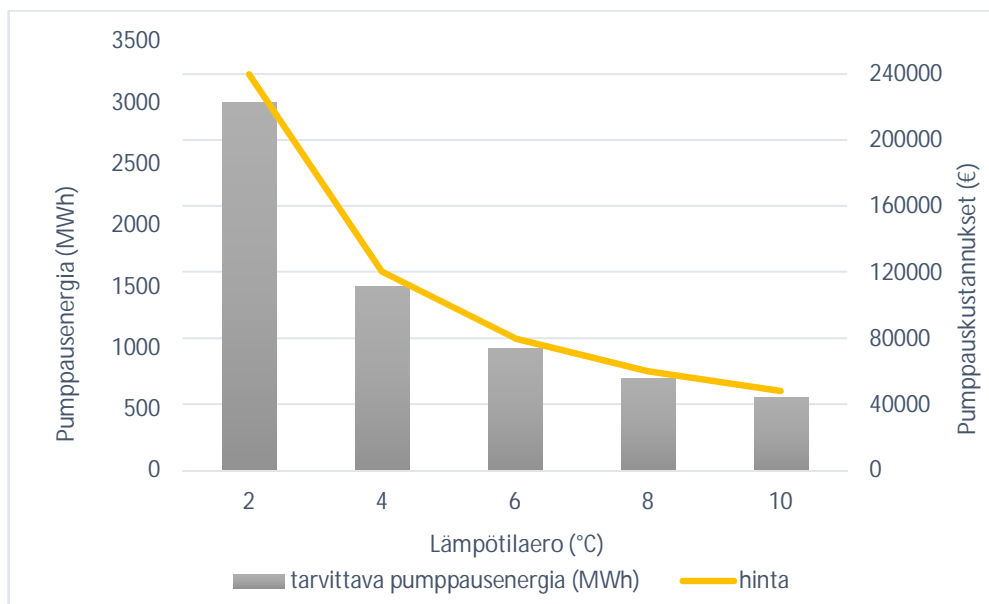
V on pumpun läpi kulkeva tilavuusvirta (m³/s)

η_{pu} on pumpun hyötysuhde

t on laskentatunnin pituinen ajanjakso (h).

Pumpattavan piirin maksimi painehäviössä otetaan huomioon piirin painehäviön pituusyksikköä kohden lisäksi muun muassa säätöventtiilin painehäviö ja lämmönsiirrinten painehäviöt sekä jäähdytysenergian tuotantopäässä että luovutuskohteessa. Helenin tuotantolaitosten pumppauskustannukset jäähdytyskauden 2017 aikana nähdään taulukosta 7. (Jäähdytysjärjestelmän energialaskentaopas 2011.)

Taulukko 7. Tuotantolaitosten pumppauskustannukset jäähdytyskauden aikana.



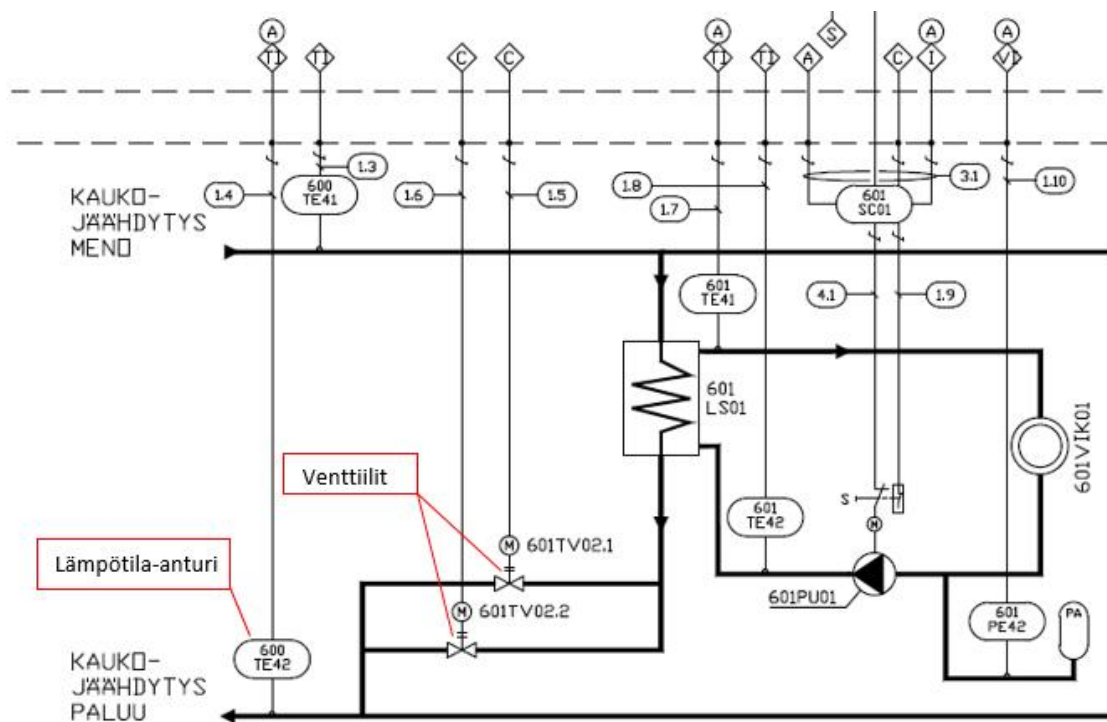
Taulukko 7 osoittaa lämpötilaeron vaikutuksen jäähdytyksen pumppausenergian määrään ja pumppauskustannuksiin. Lähdeaineistona on käytetty Helenin jäähdytyksen tuotantolaitosten tilastojen keskiarvoja jäähdytyskaudelta huhtikuu-syyskuu. Pumppauskustannusten hinta laskettiin kertomalla pumppausenergia sähkön hinnalla. Sähkön hintana käytettiin Fingridin Elspot-aluehintaa Suomessa, ja siihen lisättiin sähkön siirtokustannukset.

5.3 Toimenpide-ehdotukset

Kaukojäähdytyksen liian alhaisen paluulämpötilan aiheuttamiin tehonsiirto-ongelmiin Helenin verkossa löytyy ainakin muutama mahdollinen ratkaisu. Paluulämpötiloihin voi puuttua etukäteen, niitä voi seurata ja kohdekohtaisesti tehdä ratkaisuja tarpeen mukaan tai asiakkaiden sopimukseen lisätä erillinen kohta, jossa huomioidaan käytetyn tehon lisäksi myös virtaama. Tällaisia ratkaisuja voisivat olla

- rajoitussäädin
- paluulämpötilojen seuranta
- tilausvesivirtaperusteinen maksu.

Rajoitussäädin kytkettäisiin kaukojäähdytyksen paluuputkiston lämpötila-anturiin (kuva 19). Paluuveden lämpötilaa rajoitettaisiin niin, että se ei laske esimerkiksi 16 °C:n asetusarvon alle. Lämpötilan alkaessa laskemaan asetusarvon alle säätöventtiilit alkaisivat sulkeutumaan portaittain. Jäähdytystarpeen kasvaessa avattaisiin venttiilejä portaittain. Jäähdytystarpeen ollessa erityisen suuri asetusarvoa voitaisiin säätää liukuvasti aste kerrallaan alaspäin niin, että asetusarvoa laskettaisiin 1 °C/30 min. Näin järjestelmä estäisi kaukojäähdytysverkon paluuveden lämpötilaa laskemasta alle halutun asetusarvon. Jäähdytyksen huonelämpötilan asetusarvona käytetään esimerkiksi 21 °C. Jäähdytysjärjestelmä lähtee päälle, kun jäähdytettävän tilan lämpötila nousee esimerkiksi 2 °C asetusarvoa korkeammaksi, eli huonelämpötila on 23 °C. Järjestelmä kytkeytyy pois päältä, kun lämpötila laskee 2 °C asetusarvoa matalammaksi. (Toimintaselostus 2016.)

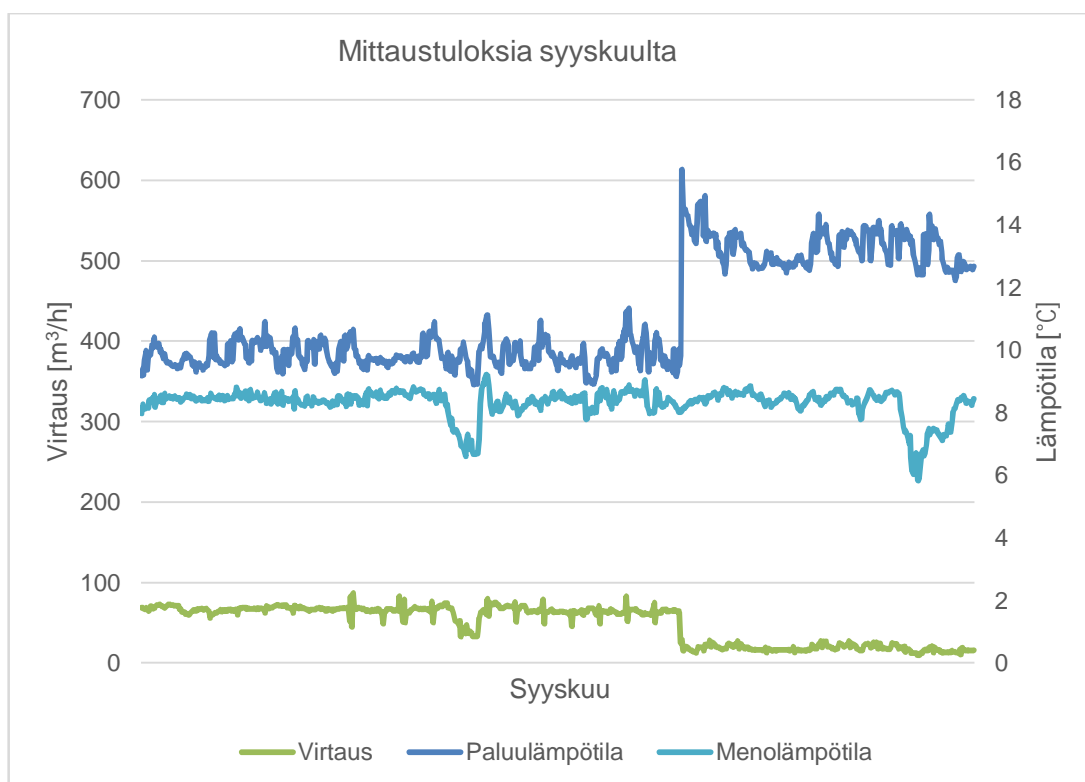


Kuva 23. Kaukojäähdytyksen paluulämpötilan rajoittamiskytkentä.

Jotta rajoitussäädintä voidaan käyttää, tulee jäähdytettävässä kohteessa olla huonekohmainen lämpötilanmittaus. Verkosto ohjataan jäähdytys- tai seisontatilaan huonelämpötilamittausten keskiarvon perusteella. Pumpun tehoa säädetään siten, että lämpötila pysyy asetusarvossaan ja vakioilmastointikoneen ollessa pois päältä pumppu käy korkeintaan minimiteholla. Huonelämpötilan laskiessa alle asetusarvon pumppu pysähtyy ja venttiili sulkeutuu. Lämpötila-antureille voidaan asettaa lämpötilan alarajan poikkeamahälytys, kun paluuveden lämpötila on 2 °C asetusarvoa matalampi. Rajoitussäätimen

avulla lämpötila- ja virtausarvot voitaisiin asettaa asiakaskohtaisesti ja näin varmistettaisiin myös oikea paluulämpötila. Rajoitussäätimen käytön selvityksen on tehnyt Insinööritoimisto Nurmi Oy.

Paluulämpötilojen seuranta perustuisi mittaustulosten päivittäiseen/viikoittaiseen seuraamiseen. Ohjelmaan voisi tehdä esimerkiksi asetuksen, joka osoittaisi kuluttajat, joilla virtaus on erityisen suuri ja paluulämpötila alhainen. Paluulämpötilan raja-arvo voisi olla esimerkiksi 12 °C, ja sitä alhaisemmat lämpötilat merkittäisiin. Mittausarvojen tilannetta voisi seurata muutaman mittausjakson ajan. Mikäli mittausarvot pysyisivät samana, tulisi asiakkaan kanssa sopia käynnistä paikan päällä. Asiakkaan säädöt tulisi tarkistaa ja korjata. Kuvasta 24 nähdään selvä parannus paluulämpötilan arvoissa syyskuun puolen välin jälkeen. Myös virtaus pienenee huomattavasti samaan aikaan. Tämä parannus on asiakaskäynnin ansiota, missä asiakkaan jäähdytysjärjestelmään tehtiin pieniä säätöjä.



Kuva 24. Kohteen B mittaustulokset syyskuun 2017 ajalta.

Kohteen B jäähdytysjärjestelmä ei ollut toiminut kunnolla, sillä asiakas oli yrittänyt lisätä jäähdytystehoa ja säätänyt lämpötila-arvoja. Myös yksi venttiili oli kokonaan auki, vaikka kulutusta ei ollut. Tämän takia vettä virtasi turhaan läpi koko ajan. Asiakkaita voitaisiin siis myös ohjeistaa kaukojäähdytyksen sopivista toiminta-arvoista, jotta he tietäisivät,

milloin järjestelmä ei toimi kunnolla. Pieni ohje-lehtiö olisi helppo ja edullinen tapa varmistaa, että asiakas pystyy itsekin tarvittaessa tekemään pieniä korjaavia säätöjä asetusarvoihin.

Tilausvesivirtaperusteinen maksu voisi toimia Helenin kannalta paremmin kuin tehoperusteinen. Se kannustaisi myös asiakkaita kiinnittämään huomiota jäähdytysjärjestelmän toimivuuteen. Jos jäähdytysjärjestelmä ei toimi kunnolla, saman tehomäärän siirtämiseksi joudutaan vesivirtaa kasvattamaan huomattavasti. Tämä näkyy suoraan Helenin pumppauskustannuksissa ja tehon riittävydessä. Vaihtoehtoa olisi kuitenkin hankala soveltaa vanhoihin sopimuksiin, joten se toimisi vain uusien asiakkaiden kohdalla.

6 Yhteenveto

Tässä insinööriyössä oli tarkoituksena perehtyä Helen Oy:n kaukojäähdytysasiakkaiden kaukojäähdytyksen paluulämpötiloihin sekä virtauksiin ja selvittää, onko järjestelmän toiminnan parantaminen kaukojäähdytyksen paluulämpötilaa nostamalla kannattavaa. Työssä hyödynnettiin kaukojäähdytyksen mittausdataa viimeisen kolmen vuoden ajalta. Tarkasteltavia mittauksia olivat kaukojäähdytyksen meno- ja paluupuolen lämpötilat sekä virtaama.

Mittauksista selvisi, että paluulämpötila on todella alhainen monilla asiakkailla ja lämpötilaero on vain muutamia asteita. Tämä vaikeuttaa tehon siirtoa ja lisää pumppauskustannuksia. Useissa tapauksissa oli huomattavissa tehontarpeen vaikutus asiakkaan jäähdytysjärjestelmän toimintaan. Järjestelmä toimi hyvin silloin, kun jäähdytystarvetta oli enemmän, ja huonommin silloin, kun jäähdytystarve oli pieni tai sitä ei ollut. Myös monilla jäähdytyslaitoksilla meno- ja paluupuolen välinen lämpötilaero on liian pieni. Jäähdytysjärjestelmän toiminnan tehokkuuden varmistamiseksi kannattaisi kaukojäähdytyksen paluulämpötilaa nostaa tai rajoittaa ainakin kaikkein alhaisimpia paluulämpötiloja. Asiakkaisiin, joilla jäähdytysjärjestelmä toimii mittausdatan perusteella heikosti, olisi hyvä ottaa yhteyttä ja sopia käynnistä paikan päällä. Varsinkin sellaisten asiakkaiden järjestelmiä tulisi päästä tarkastelemaan, joiden sopimusteho on suuri. Suuri sopimusteho vaikuttaa siten, että jos lämpötilaero on hyvin pieni, joudutaan virtausta kasvattamaan todella paljon. Yksi vastaava asiakas voi viedä silloin jopa 5 % koko jäähdytysverkon hetkellisestä virtauksesta.

Kaukojäähdytyksen paluulämpötilan rajoittamista oli alun perin tarkoitus päästä testaamaan valikoituihin referenssikohteisiin kesän ajaksi, mutta tämä osoittautuikin haastavammaksi kuin luultiin. Referenssikohteita lähestyttiin sähköpostitse, ja parissa kohteessa päästiin käymäänkin. Toisessa kohteessa haasteeksi osoittautui rakennuttajan vastuu, joka on voimassa kaksi vuotta rakentamisen jälkeen. Rakennuttaja oli norjalainen firma, jonka yhteystietoja ei löytynyt mistään eikä jäähdytysjärjestelmään saanut tehdä muutoksia ilman rakennuttajan suostumusta. Toisessa kohteessa taas päästiin tekniseen valvomoon tutkimaan jäähdytysjärjestelmän toimintaa ja arvoja, joita sitten muokattiin hieman, ja järjestelmä alkoikin heti toimimaan huomattavasti paremmin. Paluulämpötila nousi noin 6 °C, jolloin lämpötilaero meno- ja paluupuolen välillä kasvoi ja virtausmäärä pieneni. Rajoitussäädintä ei kuitenkaan päästy kokeilemaan, sillä ei saatu automaatiourakoitsijaa suorittamaan työtä. Valikoituihin referenssikohteisiin voisi esimerkiksi ensi kesänä kokeilla uudestaan jotakin toimenpide-ehdotuksista, jotta saataisiin vielä mittaustuloksia kannattavuuden varmistamiseksi.

Toimenpide-ehdotukset ovat asiakkaan jäähdytyslaitteistoon asennettava rajoitussäädin, paluulämpötilojen seuranta ja tilausvesivirtaperusteinen maksu. Rajoitussäätimen avulla asiakkaille voitaisiin asettaa yksilöidyt ja sopivat arvot ja varmistettaisiin oikeat paluulämpötilat sekä tarpeeksi suuri lämpötilaero. Virtaus ei myöskään pääsisi kasvamaan kohtuuttoman suureksi. Paluulämpötilojen seurannalla saataisiin selville sellaiset asiakkaat, joiden kaukojäähdytysjärjestelmä toimii erityisen huonosti ja sopivat toimenpiteet voitaisiin katsoa tapauskohtaisesti. Tilausvesivirtaperusteisella maksulla asiakas taas maksaisi enemmän kulutuksen mukaisesti, ja suuriin virtausmääriin olisi halua puuttua myös asiakkaan puolelta.

Toimenpiteitä olisi kannattavaa tehdä, sillä kaukojäähdytyksen paluulämpötilaa nostamalla parannetaan energiatehokkuutta ja verkon lämpötilaeroa. Pumppausta ei tarvita yhtä paljon, mikä vähentää pumppauskustannuksia huomattavasti. Suurempi lämpötilaero myös mahdollistaa pienempien jäähdytysjohtojen käytön, mikä helpottaa johtojen sijoittamista kaupunkiympäristöön. Kaukojäähdytysverkon tehonsiirtokyky paransi huomattavasti, ja suurilta laitosinvestoinneilta voitaisiin tulevaisuudessa välttyä. Jos paluulämpötilan arvojen antaa olla liian matalia ja lämpötilaero jää hyvin pieneksi, joudutaan uusien jäähdytyslaitoksien lisäksi rakentamaan uusia suurempia putkia nykyisten rinnalle.

Lähteet

Aaltonen, Juhani. 2015. Kaukojäähdytys laajenee Helsingissä. Verkkodokumentti. Helen Oy. <<https://www.helen.fi/yritys/vastuullisuus/ajankohtaista/blogi/2015/kaukojaahdytys-laajenee-helsingissa/>>. Luettu 11.10.2017.

Airaksinen, Miimu & Vainio, Terttu. ym. Rakennusten jäähdytysmarkkinat. Asiakasraportti. 2015. VTT.

Energiatodistuksen laadintaesimerkki. Uudistoimistotalo. 2014. Verkkodokumentti. Ympäristöministeriö. <<http://www.ymparisto.fi/download/noname/%7BAFE4AD12-2C9D-4AEF-A754-37F10AD57CF3%7D/99829>>. Luettu 19.9.2017.

Frederiksen, Svend & Werner, Sven. 2014. District Heating and Cooling. Lund: Studentlitteratur AB.

Hakala, P. & Kaappola, E. 2005. Kylmälaitoksen suunnittelu. Tampere: Opetushallitus.

Hukkalämpö talteen Katri Valan lämpöpumppulaitoksessa. 2015. Verkkodokumentti. Helen Oy. <<https://www.youtube.com/watch?v=yje4IN498eo>>. Luettu 26.9.2017.

Huusko, R. 2017. Asiantuntija, Helen Oy, Helsinki. Sähköpostikeskustelu 18.05.2017.

Huusko, R. 2017. Asiantuntija, Helen Oy, Helsinki. Keskustelu 4.10.2017.

Ilmastointi ja jäähdytys. Viihtyisä työympäristö. 2016. Verkkodokumentti. Motiva Oy. <https://www.motiva.fi/files/11023/Viihtyisa_tyoymparisto_Ilmastointi_ja_jaahdytys_2016.pdf>. Luettu 22.9.2017.

Jäähdytysjärjestelmän energialaskentaopas. 2011. Verkkodokumentti. Ympäristöministeriö. <<http://www.ymparisto.fi/download/noname/%7BB9D6D2F2-A816-4ECF-BE33-B8D56869253D%7D/30752>>. Luettu 19.9.2017.

Kaappola, E., Hirvelä, A., Jokela, M. & Kianta, J. 2011. Kylmätekniiikan perusteet. Helsinki: Opetushallitus.

Katri Valan lämpöpumppulaitos. Verkkodokumentti. Helen Oy. <<https://www.helen.fi/yri-tys/energia/energiantuotanto/voimalaitokset/katri-vala/>>. Luettu 26.9.2017.

Kaukojäähdytys. 2004. Suomen Kaukolämpö ry. Raportti J1/2004. ISSN 1795-0627.

Kaukojäähdytyksen järjestelmäohje. 2008. Helsingin Energia.

Kaukojäähdytyksen järjestelmäohje. 2017. Helen Oy.

Kaukojäähdytystilasto 2016. Verkkodokumentti. Energiateollisuus ry. <https://energia.fi/files/1589/Kj-tilasto2016.xls_> Päivitetty 4.5.2017. Luettu 15.9.2017.

Kaukolämmön kiertoveden käsittely. 2007. Energiateollisuus ry. Suositus KK3/2007.

Kaukolämmön ja -jäähdytyksen tekninen laatu. 2015. Energiateollisuus ry. Helsinki: Raportti KK5/2015.

Kaukolämpöjohtojen eristyspaksuuden optimointityökalu 2Mpuk. 2009. Adato Energia Oy.

Kianta, J. 2013. Kylmätekniiikan käsikirja. Tampere: Eräsalon kirjapaino Oy.

Koskelainen, Lasse, Saarela, Rauli & Sipilä, Kari. Kaukolämmön käsikirja. 2006. Helsinki: Energiateollisuus ry.

Kuukausitilastot. Verkkodokumentti. Ilmatieteen laitos. <<http://ilmatieteenlaitos.fi/kuukausitilastot>>. Luettu 6.11.2017.

Liiketoimintavuosi. Vuosikertomus 2016. Verkkodokumentti. Helen Oy. <<https://www.helen.fi/vuosikertomus/vuosikertomus-2016/konsernin-vuosi/liiketoimintavuosi/>>. Luettu 15.9.2017.

Lämmityspatteri. Verkkodokumentti. Talotekniikan opetussivusto. <<http://www03.edu.fi/oppimateriaalit/lvi/aihi05/iv-koje/lammituspatteri.htm>>.

Mäki, M. 2012. 100 vuotta energiarakentamista Helsingissä, osa 5. Hyvää energiaa Helsingiläisille - Kaukolämmön ja kaukojäähdytyksen menestystarina jatkuu. Helsinki: Helsingin Energia.

Päästölaskuri. Verkkodokumentti. Helen Oy. <http://www4.helen.fi/hf/kaukojaahdytys/kj_co2_fi.html.> Luettu 26.9.2017.

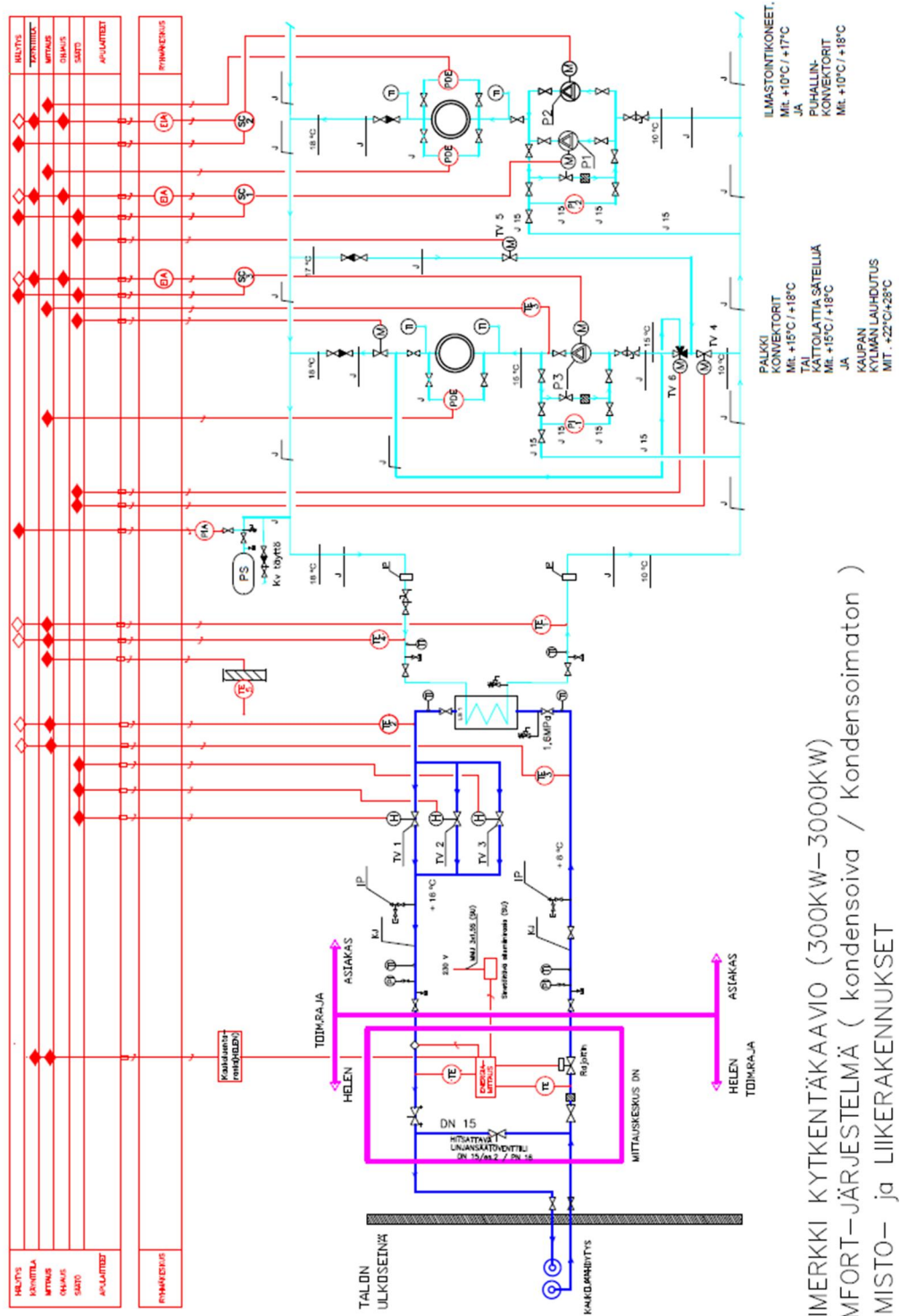
Rakennusten kaukojäähdytys. Yhtenäiset laatuvaatimukset, suositukset ja ohjeet. J1/2014. Verkkodokumentti. Energiateollisuus ry. <https://energia.fi/files/450/RakennustenKaukojaahdytys_JulkaisuJ1_2014.pdf.> Luettu 26.9.2017.

Sandberg, Esa. 2014. Sisäilmasto ja ilmastointijärjestelmät. Ilmastointitekniikka osa 1. Tampere: Talotekniikka-Julkaisut Oy.

Sisäilmastoluokitus. Sisäympäristön tavoitearvot, suunnitteluohjeet ja tuotevaatimukset. 2009. RT 07-10946. Rakennustietosäätiö.

Toimintaselostus. Kaukojäähdytysverkoston paluulämpötilan rajoitus ja hälytystoiminta. 2016. Insinööritoimisto Nurmi Oy.

Esimerkki toimisto- ja liikerakennusten kytkennästä (300 kW -y)



ESIMERKKI KYTKENTÄKAAVIO (300KW–3000KW)
COMFORT–JÄRJESTELMÄ (kondensoiva / kondensoimaton)
TOIMISTO– ja LIIKERAKENNUKSET

Mitoitustaulukko 1 & 2, serveritilat

Serveritilat / JÄÄHDYTYSTEKNISET TIEDOT		
RAKENNUSTILAVUUS NORMIN RT120.12 MUKAAN	m ³	SERVERITILA
RAKENNUKSEN KÄYTTÖTARKOITUS		SERVERITILA
SISÄLÄMPÖTILA		24 °C
MITOITUSTILAN TIEN ULKOLÄMPÖTILA 25 °C JA SUHTELLISET KOSTEUS 60 %		JÄÄHDYTYSTEHOON ERITTELY
KAUKOJÄÄHDYTYKSEN JÄÄHDYTYSTEHOIT LAITERYHMÄ --		LAITERYHMÄ
KOHTEISESTI ENITELTYNÄ		MITOITUS °C -- °C
LAITERIHMÄ		KV
SERVERILAITTEET	KPL	+17/+28 °C
LAITERYHMEN JÄÄHDYTYSTEHOIT YHTEENSÄ		
KAUKOJÄÄHDYTYSENERGIAN KULUTUS / VUOSI		MWh
LISÄTIEDOT		
JÄÄHYTYSTEHOON HUOMIOTILAVUUS LAUSELMA KÄYTTÖTARKOITUKSEN VASTAAN		
URAKOITUSALUE	ENERGIAN MYYJÄN MERKINTÄ	ENERGIAN MYYJÄN MERKINTÄ
PREIVYYS	SOPIMUSTEHO	KW
VASTUHEN- KILÖN ALLE- KIRJOTUS	20	SOPIMUSVESIMÄÄRÄ
		m ³ /h

TOIMISTO JA LIIKERAKENNUKSET / SIIRTIMIEN_KESKUKSEN MITOITUS				
LÄMMÖSIIRTIMET	YKSIKÖ	LS_1	LS_V1	
VALMISTAJA			voima_jäädytys	
MAALI	KW			
TEHO		ENSISÄ TILASID	ENSISÄ TILASID	
VIRTAUS	dm ³ /s			
YHTIEN KOKO	DN			
LÄMPÖTILA	°C-°C	8 / 20	17 / 28	10 / 18
PAINEVAIJO	kPa			
RAKENNEVAIJO	Mpa	1,6	1,6	1,6
SAATOKENTTIJÄT		TV01	TV02	FV01
VALMISTAJA				FV02
MAALI				
VIRTAUS	dm ³ /s			
PAINEVAIJO	kPa			on/off
KOKO/MVS-AIKO	DN/mvs			on/off
KERTOVESIPUMPUT		P01	P02	P01
VALMISTAJA				P02
MAALI				
VIRTAUS	dm ³ /s			
NOSTOKORKEUS	kPa			
JUKSUIPPORAN HAJKASJIA	mm			
MUOTOINTEHO	KW			
VERKOSTO, PAINUNTA- JA VAROLAITTEET		VV1/P1		VV2/VV2
VERKON TILAVUUS/PAINUNTA				/
PAINUNTAJON TILAVUUS/ESIPAINUNTA				/
VAROVIENTTIILIN KOKO/AUTOMAATIO				/
No	kpa			MITOITUS
TI	LÄMPÖVÄIKKEI LVI NUMERO	4531091		L 300 mm, jakoväli 1 °C, sisätilat 1 °C
LISÄTIEDOT				
ENSISÄJÄÄHDYTYKSEN SIIRTIMIEN KOKO				
SIIRTOKENTTIILIN KOKO				
ENERGIAN MYYJÄN TUNNUS				
ENERGIAN MYYJÄN KÄYTTÖTARKOITUS				
				100 kPa