

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO
Teknillinen tiedekunta
LUT Energia
Energiatekniikan koulutusohjelma

Jere Salmi

ADSORPTIOJÄÄHDYTTIMEN KÄYTÖN KANNATTA- VUUS KAUKOLÄMPÖJÄRJESTELMÄSSÄ

Työn tarkastajat: Professori, TkT Esa Vakkilainen
 Tutkijaopettaja, TkT Tero Tynjälä
Työn ohjaaja: DI Lassi Kortelainen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
Teknillinen tiedekunta
LUT Energia
Energiatekniikan koulutusohjelma

Jere Salmi

Adsorptiojäähdyttimen käytön kannattavuus kaukolämpöjärjestelmässä

Diplomityö

2013

86 sivua, 26 kuvaa, 25 taulukkoa ja 2 liitettä

Työn ohjaaja: DI Lassi Kortelainen

Työn tarkastajat: Professori, TkT Esa Vakkilainen
Tutkijaopettaja, TkT, Tero Tynjälä

Hakusanat: adsorptiojäähdytin, kaukojäähdytys, jäähdytys

Vantaan Energialla on herännyt kiinnostus selvittää kaukojäähdytysliiketoiminnan mahdollisuuksia Vantaan alueella. Yksi syy jäähdytysliiketoiminnan käynnistämisen takana on Vantaan Energian rakenteilla oleva jätevoimala, jonka myötä Vantaalla on etenkin kesäaikaan ylitarjontaa kaukolämmöstä. Kaukolämpöjäähdytys voisi olla yksi keino lisätä kaukolämmön kulutusta kesäaikana.

Tässä diplomityössä käsitellään adsorptiojäähdytyksen käytön kannattavuutta. Adsorptiojäähdytin on laite, jonka käyttöenergiana on lämpö. Vantaan Energian tapauksessa sitä käytettäisiin yhteistuotantolaitoksissa tuotetulla kaukolämmöllä.

Työn kirjallisuusosassa esitellään muun muassa kaukojäähdytystä, rakennusten jäähdytystarvetta sekä eri tapoja tuottaa jäähdytysenergiaa. Kannattavuuslaskentaa varten tehtiin työkalu, josta selviää eri projektien takaisinmaksuaika, sisäinen korko sekä nettonykyarvo.

Laskelmien perusteella kaukojäähdytys adsorptiojäähdyttimillä ei kannata. Tämä johtuu ensisijaisesti laitteiden korkeasta hinnasta. Takaisinmaksuajat tulevat pitkiksi vaikka käyttöenergia olisi ilmaista. Lisäksi laitteiden huono saatavuus ja käyttökokemusten puute ovat osittaisena esteenä tekniikan hyödyntämiselle vaikka investointi saataisiinkin kannattavaksi.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
Faculty of Technology
LUT Energy
Degree Program of Energy Technology

Jere Salmi

Profitability of the use of an adsorption refrigerator in a district heating system

Master's thesis

2013

86 pages, 26 figures, 25 tables and 2 appendices

Examiner: M. Sc. (Tech.) Lassi Kortelainen

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

Keywords: adsorption refrigerator, district cooling, cooling

Vantaa Energy has decided to find out the district cooling business opportunities in Vantaa. One reason for starting up the cooling business is Vantaa Energy's waste-to-energy power plant which is under construction. In the future, especially in the summer time there is an oversupply of district heating because of the new power plant. The cooling using the district heat could be one way to increase the consumption of district heat in the summer.

This thesis examines the use of adsorption cooling profitability. Adsorption refrigerator is a machine which uses heat as the driving energy. At Vantaa Energy's case, district heat produced at cogeneration plants would be used.

The literature section of this thesis includes descriptions of district cooling, building cooling demand, as well as different ways to produce cooling energy. A tool for profitability calculations was made. It shows the payback period, internal rate of return and net present value of different projects.

Based on the calculations adsorption refrigeration is not profitable. This is primarily due to the high price of the adsorption refrigerator. Payback periods become long even when the used heat energy is free. In addition, the lack of availability of the refrigerators and operating experience could become a partial barrier to the use of technology even if the investment would become profitable.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Vantaan Energia Oy:lle kesän ja syksyn 2013 aikana. Työn ohjaajana toimi DI Lassi Kortelainen. Työn tarkastajina toimivat professori Esa Vakkinen sekä TkT Tero Tynjälä. Haluan kiittää heitä työn aikana saamistani ohjeista ja neuvoista.

Kiitos kuuluu myös muille kaukolämpöpalveluiden työntekijöille, jotka toimittivat työssä hyödynnettävää materiaalia sekä kyselivät työn edistymisestä.

Lisäksi haluan esittää suurimmat kiitokset vanhemmilleni Jyrkille ja Arjalle sekä siskolleni Riikalle, jotka ovat tukeneet ja kannustaneet minua opiskeluissani. Kiitos myös Sirjelle, joka tuki minua opintojen sekä erityisesti tämän diplomityön teon aikana.

Vantaalla 16.12.2013

Jere Salmi

Sisällysluettelo

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO	3
1 JOHDANTO	5
1.1 Työn tausta.....	5
1.2 Työn tavoite	6
1.3 Työn rajaukset.....	7
2 RAKENNUSTEN JÄÄHDYTYS	8
2.1 Rakennusten jäähdytystarve.....	8
2.2 Rakennusten jäähdytysjärjestelmät	11
2.3 Risteily	11
3 KAUKOJÄÄHDYTYS	12
3.1 Kaukojäähdytyksen taloudellisuus ja edut.....	16
3.2 Käyttö Suomessa.....	17
3.3 Kylmävarastot	25
4 JÄÄHDYTYSENERGIAN TUOTANTO	28
4.1 Kylmäkerroin	28
4.1.1 Kylmäkertoimen teoria	29
4.1.2 Sorptioprosessien kylmäkerroin	30
4.2 Vapaa jäähdytysenergia	34
4.3 Kompressorijäähdytys.....	35
4.3.1 Kylmäaineet	39
4.3.2 Kompressorityypit	41
4.4 Absorptiojäähdytin.....	42
4.5 Adsorptiojäähdytin.....	44
4.5.1 Adsorptioprosessi	44
4.5.2 Rakenne ja toiminta	45
4.5.3 Adsorption aineparit	49
4.5.4 Adsorptiojäähdyttimen käytön etuja ja haittoja	53
4.6 Jäähdytyslaitoksen lauhdutus.....	54
4.7 Kaukojäähdytyksen jakelu	57
5 KANNATTAVUUSVERTAILU	59
5.1 Tarkasteltavat kohteet	59
5.1.1 Vantaan Energian toimitalo	60

5.1.2	Äyritie 8	60
5.1.3	Jumbon lähialue	62
5.2	Hintatietoja.....	65
5.2.1	Laitteisto	65
5.2.2	Kaukojäähdytysputkisto	67
5.2.3	Energian hinnat	67
5.3	Kassavirtalaskelmat	69
5.3.1	Vantaan Energian toimitalo	71
5.3.2	Äyritie 8	73
5.3.3	Jumbon lähialue	76
6	JOHTOPÄÄTÖKSET	78
7	YHTEENVETO	80
	Lähdeluettelo	82

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset aakkoset

c	ominaislämpökapasiteetti	[kJ/kgK]
I	investointi	[€]
i	laskentakorko	[%]
\dot{m}	massavirta	[kg/s]
n	pitoaika	[a]
P	teho	[W]
p	paine	[Pa]
Q	lämpö	[J]
r	risteilykerroin	[-]
S	tuotto	[€]
T	lämpötila	[K]
V	tilavuus	[m ³]
W	työ	[J]

Kreikkalaiset aakkoset

ε	kylmäkerroin	[-]
Φ	teho	[W]
ρ	tiheys	[kg/m ³]

Alaindeksit

a	poistettava lämpö
c	kylmä
h	kuuma
j	jäähdytys
k	kompressori
l	lauhdutus

max	maksimi
s	sisään
u	ulos

Lyhenteet

2MPuk	kiinnivaahdotettu yksiputkinen kaukolämpöjohto
GWP	global warming potential, vaikutus kasvihuoneilmiöön
HFC	fluorihilivety
NNA	nettonykyarvo
ODP	ozone depletion potential, otsonin haitallisuuskerroin
PFC	perfluorattu yhdiste

1 JOHDANTO

Kaukojäähdytys on yleistynyt viime vuosina myös Suomessa. Monet energiayhtiöt ovat alkaneet tarjoamaan perinteisten tuotteiden sähkön ja lämmön lisäksi myös jäähdytystä. Kaukojäähdytystä voidaan verrata kaukolämmitykseen sillä erolla, että lämmön sijaan asiakkaan kiinteistöön tuotetaan ja siirretään jäähdytysenergiaa. Kaukojäähdytyksessä jäähdytysenergia voidaan tuottaa samaan aikaan useilla eri tekniikoilla kiinteistön ulkopuolella. Jäähdytyksen jakelu on myös verrattavissa kaukolämmön jakeluun. Molemmissa tapauksissa energia johdetaan kiinteistöihin putkistoa pitkin. Rakennukset on useimmiten kytketty putkistoon lämmönsiirtimen välityksellä.

Keskitetyllä jäähdytyksen tuotannolla on saavutettavissa useita etuja kiinteistökohtaisiin laitteisiin verrattuna kuten tilansäästö kiinteistössä sekä suurempien jäähdytysyksiköiden tuomat kustannusedut. Lisäksi sillä saadaan parannettua energian käytön tehokkuutta sekä parannettua prosessien hyötysuhteita kiinteistökohtaisiin sähköllä toimiviin jäähdytysjärjestelmiin verrattuna. Jäähdytysentuotantolaitteiden sijaitessa muualla kuin kiinteistössä välttyvät asiakkaat myös suuremmilta huoltotoimenpiteiltä. Kaukojäähdytyksellä on usein myös kiinteistökohtaista jäähdytystä ympäristöystävällisempää. Tämä riippuu siitä, millä tekniikalla kaukojäähdytys tuotetaan.

Jäähdytyksen tarve vaihtelee runsaasti etenkin vuodenaikojen mukaan. Suomessa jäähdytystä tarvitaan lähinnä kesällä ja tästä syystä jäähdytyksen huipunkäyttöajat jäävät melko mataliksi.

1.1 Työn tausta

Vantaan Energian uuden jätevoimalaitoksen myötä kesäkauden aikainen lämmöntuotantokapasiteetti kasvaa. Vaihtoehtoina on tällöin lämmön hyödyntäminen, myyminen vieraisille paikkakunnille tai sen hukkaaminen ilmaan. Lisäksi on mietitty jätteen paalaimista ja sen varastointia myöhempää käyttöä varten.

Vantaan Energia lämmönmyynti talven 2011–2012 marraskuun ja helmikuun välillä oli noin 849 GWh. Kesäkuukausien kesäkuu-elokuu aikana lämpöä myytiin 123 GWh vuonna 2011 ja 145,5 GWh vuonna 2012. Myynti vaihtelee siis merkittävästi vuoden eri

aikoina. Kesäkaudella lämpöä käytetään lähinnä vain käyttöveden lämmittämiseen kun taas talvisin enemmistö lämmöstä käytetään rakennusten lämmittämiseen.

Vantaan Energia on osoittanut kiinnostusta sähkön ja lämmön tuotannon ohella kylmän tuotantoon. Ongelmana kylmän laajamittaisessa tuotannossa on kuitenkin kesäajan matala kaukolämmön lämpötila, mikä ei sovellu hyvin absorptiotekniikan käyttöön sekä suurien vesistöjen puute Vantaan alueella, mikä taas ei mahdollista vapaajäähdytyksen käyttöä. Lisäksi tiiviin kaupunkirakenteen puuttuminen asettaa omat haasteensa keskitetyn jäähdytyksen toteuttamiselle. Kaukojäähdytys edellyttäisi ainakin alkuvaiheessa useita suuria energiankuluttajia pienelle alueelle, jolloin jäähdytysputkista aiheutuvat kustannukset jäisivät mahdollisimman pieniksi.

Kaukolämpöjäähdytyksellä voitaisiin saavuttaa lisää myyntiä kaukolämmölle kesäaikaana, jolloin lämpöä ei muuten käytetä paljon. Kaukolämpöjäähdytyksellä tarkoitetaan jäähdytystä, jossa kylmäkone ottaa käyttöenergiansa kaukolämpövedestä.

Lisääntynyt kaukolämmön kulutus lisäisi yrityksen tuloja kaukolämmön myynnistä. Lisäksi lisääntynyt lämpökuorma mahdollisesti parantaisi kaukolämpöveden jäähdytystä ja sitä kautta lisäisi myös voimalaitokselta saatavaa sähköntuotantoa.

1.2 Työn tavoite

Työn tavoitteena on selvittää onko adsorptiojäähdyttimillä kannattavaa tuottaa jäähdytysenergiaa. Laajamittaisen keskitetyn kaukokylmän tuotannon on osoitettu aikaisemmissa tutkimuksissa olevan kannattamatonta, sillä tiivistä suurta keskustaa ei Vantaalta löydy ja takaisinmaksuajat venyisivät liian pitkiksi. Hajanaisen kaupunkirakenteen takia kylmänjakeluverkon pituus kasvaisi suureksi, mikä taas aiheuttaisi lisää merkittäviä investointikustannuksia ja heikentäisi kannattavuutta. Näitä ongelmia pystyttäisiin kiertämään esimerkiksi aloittamalla jäähdytysliiketoiminta pienillä alueverkoilla joita olisi mahdollista toiminnan mahdollisesti laajentuessa liittää myös toisiinsa.

1.3 Työn rajaukset

Työssä käsitellään ja vertaillaan rakennusten kiinteistökohtaisen ja alueittaisen jäähdytyksen kannattavuutta adsorptiojäähdyttimen ja perinteisen kompressoritoimisen jäähdytyksen kesken. Kaukojäähdytyksen toteuttamista kompressorijäähdyttimillä tai esimerkiksi absorptiojäähdyttimillä ei käsitellä. Lisäksi tarkastelusta on jätetty pois kiinteistökohtaiset sovellukset, joissa voitaisiin hyödyntää adsorptiojäähdyttimen lauhdutin-tehoa lämmityksessä.

Aluejäähdytyksen osalta tarkastellaan muutaman lähekkäin sijaitsevan rakennuksen jäähdytystä keskitetysti. Kaukolämpöveden menolämpötila on Vantaalla kesäaikaan vain noin 65–80 °C, mikä asettaa rajoituksia käytettäville tekniikoille. Adsorptiojäähdytystekniikka on valittu vertailuun, sillä sen avulla on mahdollista hyödyntää myös kaukolämpöveden suhteellisen alhaisia kesäajan lämpötiloja mikä esimerkiksi absorptiotekniikalla ei aina olisi tehokkaasti mahdollista.

Kannattavuustarkastelussa verrataan adsorptiojäähdyttimien käytön kustannuksia kompressorikäyttöisten kylmäkoneiden kustannuksiin. Tällä hetkellä kompressoritoimiset kylmäkoneet ovat käytännössä ainoita olemassa olevia kiinteistökohtaisia jäähdytysratkaisuja ja ne ovat tärkein kilpaileva tekniikka lämmöllä toimivien jäähdyttimien käyttöönotossa.

Työ rajataan myös puhtaasti pelkän kannattavuuden tarkastelemiseen, eikä esimerkiksi minkäänlaisia palvelukonsepteja kehitetä. Myöskään kiinteistössä olevia jäähdytyksen jakomenetelmiä ei käsitellä laajasti. Hinnoittelun osalta määritellään energiamaksu sekä liittymismaksut eri kiinteistöille. Perusmaksun osuus on sisällytetty energiamaksuun. Todellisuudessa pitäisi käyttökustannukset jakaa energia- ja perusmaksuun.

2 RAKENNUSTEN JÄÄHDYTYS

Jäähdytyksellä tarkoitetaan tietyn jäähdytettävän kohteen lämpötilan pitämistä ympäristön lämpötilaa alempana. Rakennusten jäähdytystä tarvitaan sisäilman lämpötilan pitämiseksi miellyttävänä. Jäähdytykseen voidaan käyttää useita eri jäähdytysjärjestelmiä kuten erillisiä ilmastointilaitteita, lämpöpumppuja ja kaukojäähdytystä.

2.1 Rakennusten jäähdytystarve

Jäähdytystarpeen tärkeimmät mitoituskriteerit ovat huonelämpötilan pysyvyys sekä sen enimmäisarvo. Mitoitukseen vaikuttavat myös rakennuksen lämpötekniset ominaisuudet. Niitä ovat esimerkiksi ikkunoiden pinta-ala, rakenne ja aurinkosuojaus sekä rakenteiden lämmönjohtavuus, rakennusmassat ja niiden varauskyky. Mitoitettaessa jäähdytystä tulee ottaa huomioon myös terminen viihtyvyys, työn tuottavuus, työsuojelemääräykset ja tuotantoprosessit. (Suomen Kaukolämpö ry 2004, 16.)

Jäähdytysteho valitaan niin, että päästään haluttuun huonelämpötilan pysyvyyteen. Suomen rakentamismääräyskokoelman rakennusten sisäilmastoa ja ilmanvaihtoa koskevan osan D2 mukaan oleskeluvyöhykkeen huonelämpötilan lämmityskauden suunnitteluarvona käytetään lämpötilaa 21 °C ja kesäkauden arvona lämpötilaa 23 °C. Perustelusta syystä huonelämpötila on mahdollista kuitenkin suunnitella ohjearvosta poikkeavasti. Rakennuksen käyttöaikana oleskeluvyöhykkeiden lämpötila ei saisi yleensä olla 25 °C korkeampi (Suomen Rakentamismääräyskokoelma D2 2012, 6.) Jäähdytystehon mitoituksessa on huomioitava myös sisäisiä ja ulkoisia lämpökuormia kuten valaistus, koneet ja laitteet, ihmiset, auringon säteily sekä seinämien läpi johtuvat lämpökuormat (Suomen Kaukolämpö ry 2004, 16).

Rakennusten jäähdytystarve on korkeimmillaan yleensä heinä-elokuussa, jolloin ilmanlämpötila ja kosteus ovat korkeimmillaan. Kiinteistöt voivat tarvita jäähdytystä myös jatkuvasti vuoden ympäri eri prosesseista sekä sähkölaitteista johtuvien lämpökuormien takia. (Energiateollisuus ry 2006, 550.) Taulukoissa 1 ja 2 on esitetty arvoja, joita voidaan käyttää kylmätehon mitoituksessa ja energian kulutusarvioissa.

Taulukko 1. Jäähdytystehon ja vuotuisen jäähdytysenergiankulutuksen tavallisia arvoja eri rakennuksille (Energiateollisuus ry 2006, 550).

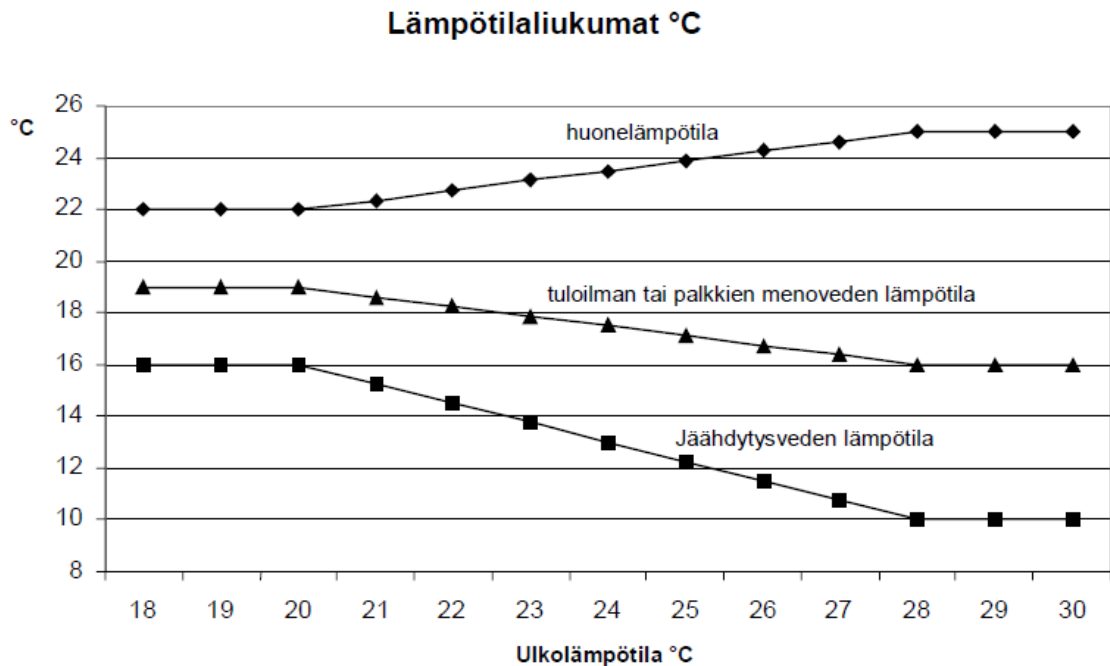
Rakennustyyppi	Tehontarve [W/m ²]	Energiankulutus [kWh/m ²]	Huipun käyttöaika [h]
Asuinrakennus	15–30	10–15	300–600
Toimistorakennus	30–70	15–50	500–1400
Kauppa-keskus	100–200	70–150	700–2000
Atk-tilat	300–		>3000
Hotellit	40–70		800–1200

Taulukko 2. VTT:n ilmoittamia suosituksia rakennusten jäähdytystehontarpeen arviointiin (Sipilä & Ranne 2004, 12).

Rakennustyyppi	Tehontarve [W/m ³]
Toimisto	15–20
Hotelli	15–20
Yleisötilat	18–20
Asuintalot	10–15

Auringosta sekä ulkolämpötilasta johtuva jäähdytystehon huipputarve on usein lyhytaikaista 2–4 tunnin ajan iltapäivällä. Tehohuippua on mahdollista tasoittaa eri menetelmin, jolloin voidaan mitoittaa jäähdytystehon tuotanto pienemmälle teholle. Samalla saadaan pidempi huipun käyttöaika vuodessa. (Energiateollisuus ry 2006, 551.)

Rakennusten jäähdytyksen kulutushuippuja on mahdollista tasata joko pienentämällä jäähdytysenergian tarvetta talteenottojärjestelmällä tai antamalla sisälämpötilan liukua. Sisälämpötilan liukumisella tarkoitetaan sitä, että huonelämpötilan annetaan liukua tavallista korkeammaksi ulkoilman lämpötilan ollessa korkea, mikäli huonelämpötilan voidaan sallia nousevan. Tällöin lämpöä varastoituu rakenteisiin, joilla on yleensä suuri lämmönsitomiskyky. Rakenteet jäähdytetään takaisin normaalilämpötilaan yöllä, jolloin ei ole muuta lämpökuormaa. Vastaavasti rakenteita on mahdollista jäähdyttää öisin viileällä ilmalla ja päivällä kohoava lämpötila käytetään rakenteiden lämmittämiseen. Rakennuksiin on myös kehitetty seiniä, jotka sisältävät faasimuutosmateriaalia. Sen olomuodon muutosenergiaa hyödynnetään lämmön ja jäähdytystarpeen tasaamisessa. (Energiateollisuus ry 2006, 551.) Kuvassa 1 on esimerkki lämpötilan liu'utuksesta.



Kuva 1. Esimerkki lämpötilojen liu'utuksesta (Suomen Kaukolämpö ry 2004, 18).

Kuvasta nähdään kuinka ulkolämpötilan kasvaessa sisälämpötilan sallitaan nousta tiettyyn pisteeseen asti. Huonelämpötila pyritään pitämään vakiona 22 °C:ssa kunnes ulkolämpötila ylittää 20 °C. Ulkolämpötilan noustessa huonelämpötilan annetaan nousta aina 25 °C:een asti, joka on asetettu ylärajaksi sisätilan lämpötilalle.

Rakennusten jäähdytysvesijärjestelmään voidaan liittää myös kylmävarasto. Lyhytaikaiseen varastointiin käytetään eristettyä ruostumattomasta teräksestä valmistettua säiliötä. Sisätiloihin sijoitetut yli 100 m³ säiliöt jätetään yleensä kustannussyistä eristämättä. Kylmävaraston koko määritetään siten, että varasto ehditään ladata edellisen vuorokauden aikana. Kylmävaraston purkaustehon kylmäkoneen tai kaukojäähdytyksen tehon kanssa on oltava riittävä tuottamaan mitoituspäivän kylmätehon tarve ja sitä vastaava kylmäenergia. (Energiateollisuus ry 2006, 551.)

Kylmävarastolla saadaan pienennettyä kylmäkoneen mitoitustehoa sekä pidennettyä kylmäkoneen vuotuista huipun käyttöaika verrattuna tilanteeseen, jossa kylmäkone olisi mitoitettu huipputehon mukaan. Jäähdytysvaraston käytöllä on mahdollista pienentää kylmäkoneen mitoitustehoa ja sen avulla saadaan huipun käyttöaika kasvamaan 30–50 %. (Energiateollisuus ry 2006, 551.)

2.2 Rakennusten jäähdytysjärjestelmät

Rakennuksia voidaan jäähdyttää ilmastoinnilla. Ilmastoinnilla tarkoitetaan huoneilman puhtauden, lämpötilan, kosteuden ja ilmavirran hallitsemista tulo- tai kierrätysilmaa käsittelemällä. Ilmastointijärjestelmä koostuu itse ilmastointikoneesta, kanavista laitteineen sekä huonelaitteista. Ilmastointijärjestelmät voidaan luokitella ilmajärjestelmiin, ilma-vesijärjestelmiin, vesijärjestelmiin sekä hajautettuihin järjestelmiin. (Energiateollisuus ry 2006, 551.)

Ilmajärjestelmän oleellisin osa on ilmastointikone, johon voi kuulua puhaltimien, suodatuksen ja lämmityksen lisäksi kostutus, jäähdytys ja jälkilämmitys. Ilma johdetaan huoneisiin keskuskoneelta. Huonetoissa kylmää jaetaan esimerkiksi puhallinpattereilla.

2.3 Risteily

Risteilyllä tarkoitetaan menetelmää, jolla voidaan yhdistää eri tavoin vaihtelevat kulutukset toisiinsa. Tehontarpeen vaihtelut tasaantuvat jakeluverkossa. Tämä johtuu siitä, että asiakkaiden kulutushuiput eivät ole samanaikaisia. Tarvittava siirtoteho on alueellisessa siirtojohdossa pienempi kuin alueen asiakkaiden tehontarpeen summa. Tätä suhdetta kutsutaan samanaikaisuuskertoimeksi. Se voidaan laskea yhtälöstä (1). (Energiateollisuus ry 2006, 44–45.)

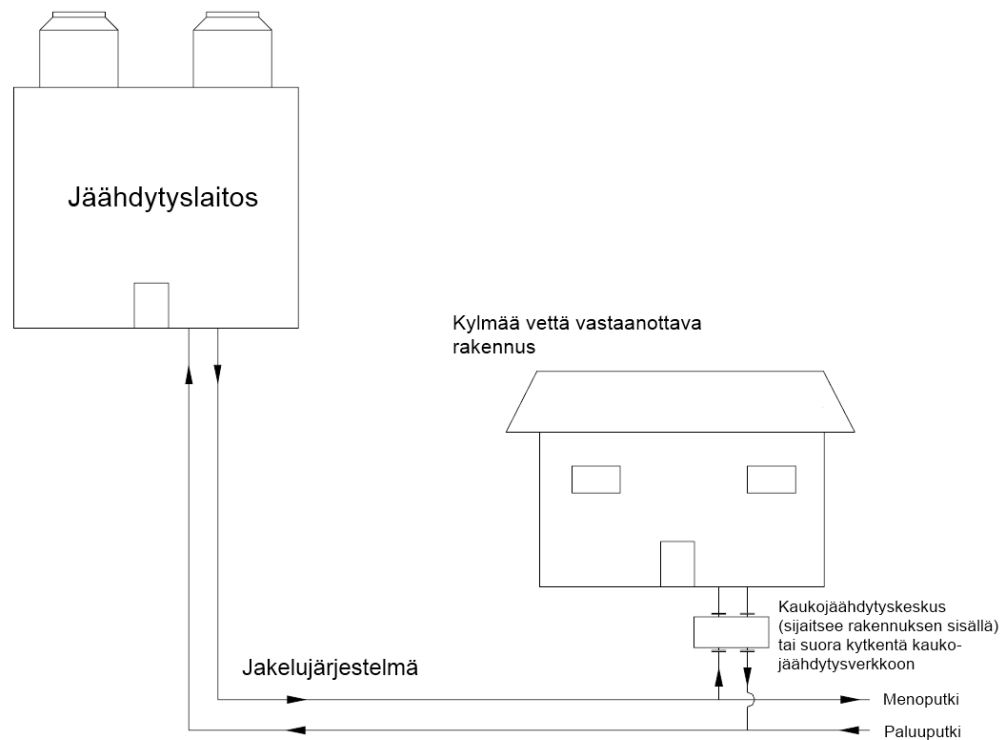
$$r = \frac{\sum \Phi_i(t_{\max})}{\sum \Phi_{N,i}} \quad (1)$$

missä $\sum \Phi_i(t_{\max})$ asiakkaan tai ryhmän i mitattu tehontarve tarkasteltavan huipputehontarpeen hetkellä t_{\max} [W]
 $\sum \Phi_{N,i}$ asiakkaan tai ryhmän i mitoitus-teho [W]

3 KAUKOJÄÄHDYTYKSEN

Kaukojäähdytyksellä tarkoitetaan jäähdytetyn veden keskitettyä tuotantoa ja sen jakelua putkiston kautta rakennuksiin huoneilman ja prosessien jäähdytykseen. Jäähdytysenergia toimitetaan rakennuksiin putkia pitkin kaukolämpöveden tavoin. Pumppujen avulla meno- ja paluuputkien välille saadaan aikaan paine-ero, jonka ansiosta vesi kiertää putkiverkossa.

Kaukojäähdytysjärjestelmä koostuu kolmesta osasta: jäähdytyksen lähteestä, jakeluverkosta ja asiakkaiden laitteista, joita kutsutaan kaukojäähdytyskeskuksiksi. Rakennuksissa lämmennyt vesi johdetaan paluuputkella uudelleen jäähdytettäväksi. (Skagestad & Mildenstein 2002, 13). Kuvassa 2 on esitetty tyypillisen kaukojäähdytysjärjestelmän osat.



Kuva 2. Kaukojäähdytysjärjestelmän osat (mukailtu lähteestä Skagestad & Mildenstein 2002, 13.)

Kaukolämmön tavoin kaukokylmäverkossa kiertävän veden lämpötilaa säädetään usein ulkolämpötilan mukaan. Lämpötilan säädöllä voidaan verkkoon ajaa lämpimämpää vettä silloin, kun rakennusten jäähdystarve ei ole suurimmillaan. Tällä keinolla saadaan jäähdytyslaitoksen hyötysuhteita parannettua eivätkä verkon häviöt ole yhtä suuret kuin kylmemmällä vedellä. (Skagestad & Mildenstein 2002, 14). Toisaalta kaukokylmäverkon lämpöhäviöt eivät ylipäänsä ole kovin suuria, sillä lämpötilaero veden ja putkia ympäröivän maan ympärillä ei ole kovin suuri. Kaukokylmäputkissa ei vähäisten lämpöhäviöiden takia tarvita yhtä paksua lämpöeristystä kuin kaukolämpöputkissa.

Kaukojäähdytysenergiaa voidaan tuottaa esimerkiksi vapaajäähdytyksellä, absorptiojäähdytyskoneilla, kompressoriteknikalla ja lämpöpumpuilla. (Energieollisuus 2013b). Lisäksi adsorptiojäähdytintä on käytetty kaukolämmöllä toimivaan ilmastointijäähdytykseen eli kaukolämpöjäähdytykseen (Aittomäki 2008, 98). Kaukolämpöjäähdytyksellä tarkoitetaan jäähdytystä, jossa kylmäkone ottaa käyttöenergiänsä kaukolämpövedestä.

Keskittämällä jäähdytyksen tuotantoa suurempiin yksiköihin saadaan lisättyä energian käytön tehokkuutta sekä parannetaan prosessien hyötysuhteita kiinteistökohtaisiin sähköllä toimiviin jäähdytysjärjestelmiin verrattuna. Keskitetyssä kaukojäähdytysjärjestelmässä käytetään tilanteesta riippuen aina kulloinkin edullisinta kylmän lähdettä sekä soveltuvinta tekniikkaa. (Energieollisuus ry 2006, 529).

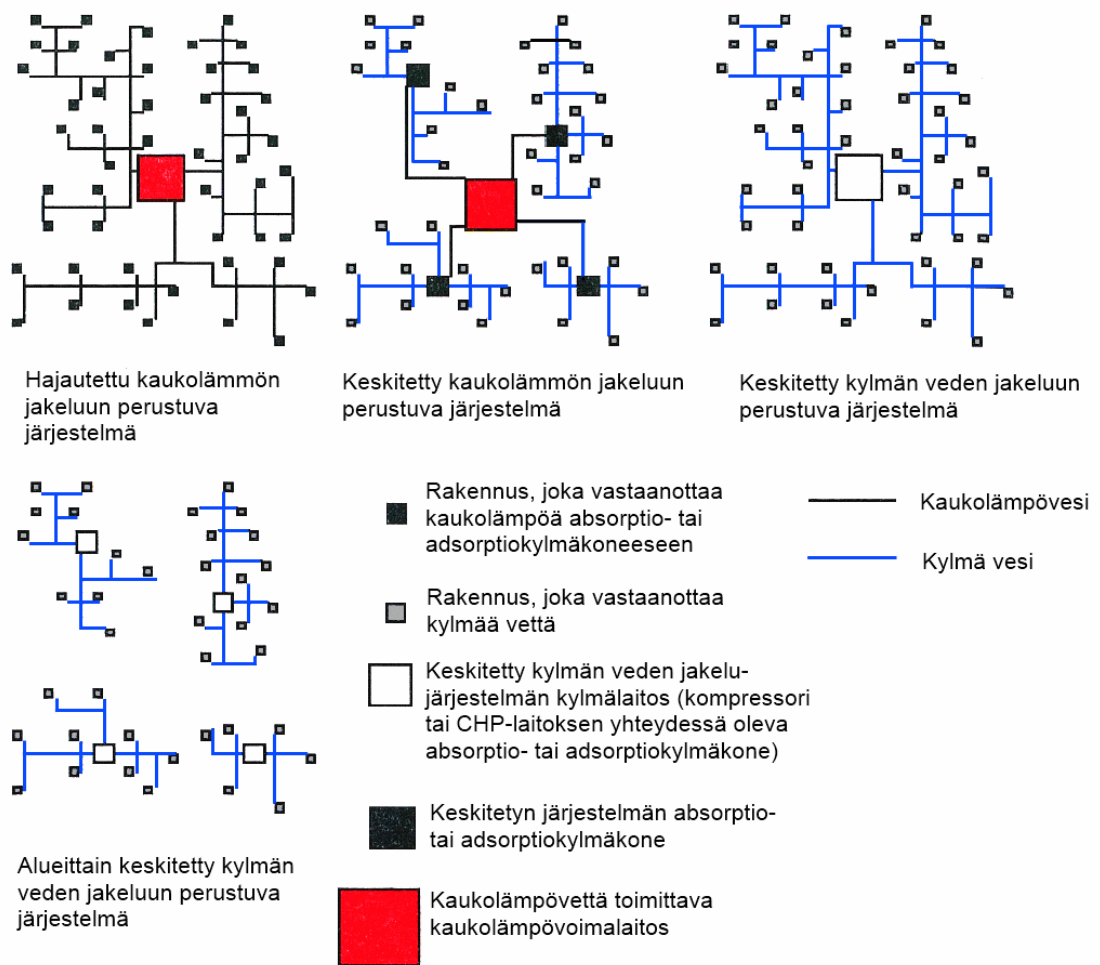
Korvaamalla sähköllä toimivat jäähdytysjärjestelmät kaukojäähdytyksellä, voidaan kiinteistön sähkön kulutusta pienentää huomattavasti. Jäähdytysenergian tuotannossa sähkön kulutus voi pudota jopa 90 %. Kaukojäähdytyksen toimintaperiaatetta voidaan verrata kaukolämmitykseen. (Energieollisuus ry 2006, 529). Kyseisten tekniikoiden erona on, että kaukojäähdytyksessä asiakkaalta siirretään ylimääräistä lämpöä kaukojäähdytysveteen kun taas kaukolämmityksessä asiakkaalle siirretään kaukolämpövedessä olevaa lämpöenergiaa.

Jatkossa jätevoimalan myötä Vantaalla on kesäaikana ylitarjontaa yhteistuotannossa tuotetusta lämmöstä. Tätä muuten hyödyntämättömäksi jäävää kaukolämpöä voitaisiin

tällöin käyttää kaukojäähdytyksessä käytettävän kylmän veden tuottamiseen esimerkiksi adsorptiotekniikalla.

Jäähdytysenergiaa voidaan jaella joko keskitetysti tai hajautetusti. Keskitetyllä järjestelmällä tarkoitetaan sitä, että jäähdytysenergia tuotetaan keskitetysti suurissa yksiköissä ja jäähdytysenergia jaetaan asiakkaille putkia pitkin. Hajautetulla järjestelmällä tarkoitetaan sitä, että jäähdytys tuotetaan paikallisesti esimerkiksi rakennusryhmälle tai jopa yhdelle rakennukselle. (Energiateollisuus ry 2006, 529).

Hajautettuun kaukolämmön jakeluun perustuvassa jäähdytysjärjestelmässä kaukolämpöä toimitetaan kaukolämpövoimalaitoksista kiinteistöihin, joissa on esimerkiksi absorptiokylmäkoneet, joilla saadaan tuotettua kiinteistön jäähdytyksessä tarvittava kylmä vesi. Keskitetyssä kaukolämmön jakeluun perustuvassa jäähdytysjärjestelmässä kaukolämpöä toimitetaan kaukolämpölaitoksilta alueellisiin absorptiokylmäkoneisiin, joissa tuotettu kylmä vesi jaetaan edelleen alueen kiinteistöihin. Keskitetyssä kylmän veden jakeluun perustuvassa järjestelmässä kylmää vettä tuotetaan keskitetysti yhdessä isossa kylmälaitoksessa, josta se jaetaan putkistoa pitkin kiinteistöihin. Alueittain keskitetyssä kylmän veden jakeluun perustuvassa järjestelmässä kylmää vettä tuotetaan erillisissä kylmäkeskuksissa, joista vesi jaetaan tietyn alueen kiinteistöihin. Menetelmä on siis verrattavissa aluelämmitykseen. Kuvassa 3 on esitetty eri keskitettyjen ja hajautettujen järjestelmien periaatteet.



Kuva 3. Hajautetun ja keskitetyn jäähdytysjärjestelmän vaihtoehtoja (mukailtu lähteestä Energiategollisuus 2006, 530).

Keskitetyllä ja hajautetulla jäähdytysenergian tuotannolla on erilaisia etuja (Koljonen & Sipilä 1998, 50).

Keskitetty jäähdytyksen tuotanto:

- suuri yksikkökoko
- vähemmän huollettavia yksiköitä
- ei kiinteistökohtaisia jäähdytystorneja
- kylmäkonetilan säästö kiinteistöissä
- voidaan hyödyntää olemassa olevaa kaukolämpöverkkoa

Hajautettu jäähdytyksen tuotanto:

- ei kylmän jakeluverkostoa
- häiriötilanteet ovat rajattuja
- pumppaustarve on pienempi
- voidaan hyödyntää olemassa olevaa kaukolämpöverkkoa

Jäähdytys ja ilmastointi kuluttavat maailmanlaajuisesti huomattavasti energiaa. IIR (International Institute of Refrigeration) on arvioinut, että jopa 15 % kaikesta maailmassa tuotetusta sähköstä käytetään erilaisiin jäähdytysprosesseihin. (Askalany et al. 2013, 565.) Lisäksi on arvioitu, että kotitalouksien ja liikekiinteistöjen sähkönkulutuksesta maailmanlaajuisesti jopa 45 % käytettäisiin ilmastointilaitteisiin (Choudhury et al. 2013, 554.) Lämpökäyttöisillä kylmäkoneilla voisi olla mahdollista korvata pitkällä tähtäimellä nykyisiä sähkökäyttöisiä jäähdytyslaitteita.

3.1 Kaukojäähdytyksen taloudellisuus ja edut

Kaukojäähdytyksen eduiksi lasketaan yleisesti energiatehokkuus. Lisäksi tilantarve on tavallisia kompressorilaitteita pienempää sillä yleensä kylmän tuotantolaitos sijaitsee muualla kuin kiinteistössä ja kylmän jakelu tapahtuu putkia pitkin. Kaukojäähdytettävässä kiinteistössä sijaitsevan kylmänjakelukeskusten rakenne on huomattavasti yksinkertaisempi kuin kompressorijäähdytystä käytettäessä. Kylmänjakelukeskus koostuu vain lämmönsiirtimestä sekä muutamasta apulaitteesta kompressorin, höyrystimen ja lauhduttimen sijaan. Ääntä tai tärinää ei juuri esiinny kylmänjakelukeskuksen tekniikasta johtuen.

Merkittävä etu kaukojäähdytykseen siirryttäessä on sähkönkulutuksen pieneneminen. Aiemmassa kappaleessa mainittiin, että sähkönkulutus voi pudota jopa 90 %. Sähkön sijaan voidaan käyttää hyväksi muuten hukkaan meneviä resursseja. Vantaan Energian tapauksessa kesäaikana käytettäisiin kaukolämpöä, jota tuotetaan jatkossa jätteitä polttamalla ja jolle ei ole muuta käyttöä. Monissa tapauksissa voidaan käyttää jäähdytykseen meri- tai järvivettä, mitkä ovat ilmaisia kylmäenergian lähteitä.

Kaukojäähdytyksen hinnasta riippuen voi vähentyneestä sähkönkulutuksesta seurata kustannussäästöjä. Ympäristön kannalta vähentynyt sähkönkulutus taas merkitsee pienempiä energiantuotannon päästöjä.

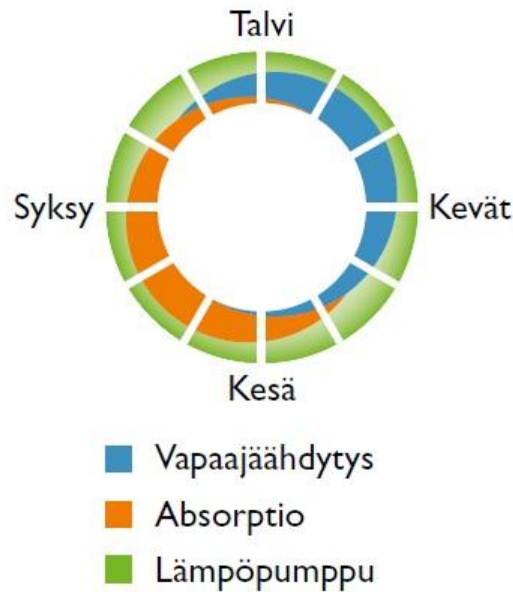
Hajautetussa kylmäntuotannossa myös toiminnan varmuus kasvaa, sillä kun kylmää tuotetaan usealla toisistaan riippumattomalla laitteella, yhden laitteen ollessa pois käytöstä kylmänjakelu ei kuitenkaan keskeydy. Kaukolämmitysverkon tavoin kaukojäähdytysverkko voidaan rakentaa siten, että jokaiseen verkon alueeseen pystytään ajamaan kylmäenergiaa ainakin kahdesta suunnasta.

Osa perinteisen kaukojäähdytyksen eduista kuitenkin menetetään hajautetussa kaukojäähdytyksessä. Hajautetulla kaukojäähdytyksellä tarkoitetaan sitä, että rakennuksissa itsessään on adsorptio- tai absorptiojäähdytyslaitteet ja niiden käyttöön jaellaan kuumaa kaukolämpövettä. Tällöin laite on sijoitettu rakennukseen ja se vie kylmänjakelukeskusta enemmän tilaa. Lisäksi usean eri tuotantolaitoksen takaama varmuus katoaa.

3.2 Käyttö Suomessa

Vuonna 2013 kaukolämpöyritykset tarjoavat kaukojäähdytystä yhteensä kahdeksalla paikkakunnalla: Helsingissä, Turussa, Lahdessa, Heinolassa Vierumäellä, Lempäälässä, Espoossa, Tampereella ja Porissa (Energieollisuus ry 2013a). Adsorptiojäähdytystä ei tiettävästi ole käytössä Suomessa. Suuri osa energialaitosten kaukojäähdytyksestä on toteutettu kaukokylmäverkon avulla, mutta myös erillisiä jäähdytyskontteja on käytössä. Kiinteistökohtaisia lämmöllä toimivia kylmäkoneita ei ole merkittävässä määrin käytössä. Tiheään rakennetuilla alueilla keskitetyt järjestelmät voivat olla kannattavampia, koska silloin saavutetaan suuremman jäähdytynyksikön tuomia suhteellisia säästöjä. Toisaalta tällöin on rakennettava kylmänjakeluverkosto, joka on kallista.

Helsingin Energia tuottaa kaukojäähdytystä Helsingissä. Kaukojäähdytykseen käytetään kolmea eri tuotantotapaa: vapaajäähdytystä, absorptiojäähdytystä ja lämpöpumppua. Tuotanto perustuu 80 %:sti energiaan, jota ei muuten hyödynnettäisi (Helsingin energia 2013b). Kuvassa 4 on esitetty eri tuotantotapojen käytön jakautuminen.



Kuva 4. Helsingin energian kaukojäähdytyksen tuotantotapojen jakautuminen eri vuodenaikojen kesken (Helsingin energia 2013b).

Kuvasta 4 nähdään, että kylmää tuotetaan samaan aikaan jopa kaikilla kolmella eri tavalla. Useampi tapa tuottaa kylmää mahdollistaa kulloinkin taloudellisimman yhdistelmän käytön. Erityisesti Helsingin sijainti meren äärellä on kaukojäähdytyksen toteuttamisen kannalta hyvä asia, sillä kylmästä merivedestä saadaan ehtymättömästi jäähdytysenergiaa. Lisäksi merivettä voidaan käyttää jäähdytyskoneiden lauhduttamiseen. Absorptiojäähdytintä käytetään kesä- ja syyskaudella kun meren lämpötila ei ole tarpeeksi matala vapaajähdytykseen. Lämpöpumppu on käytössä vuoden ympäri.

Helsingin Energian ensimmäinen kaukojäähdytyskeskus sijaitsee Helsingin Pitäjänmäellä. Se otettiin käyttöön vuonna 1998. Kylmää tuotetaan 300 kW ja 600 kW:n kaukolämpötoimisilla absorptiojäähdyttimillä, joissa on ilmalauhduttimet. Lisäksi samassa kohteessa on käytössä kolme jäähdytysvesivarastoa joihin voidaan varastoida 300 kW tehoa. (Suomen Kaukolämpö ry 2004, 20–21.) Kaiken kaikkiaan Helsingin Energialla oli vuonna 2012 käytössä 35 MW edestä absorptiojäähdytyskapasiteettia. Niillä tuotettiin yhteensä 23 721 MWh jäähdytysenergiaa. Kokonaisuudessaan Helsingin Energia tuotti vuonna 2012 93 548 MWh jäähdytysenergiaa. (Energiateollisuus 2013c.)

Turku Energia vastaa kaukojäähdytyksen tuottamisesta Turun alueella. Tällä hetkellä Turun kaukojäähdytysverkosto kattaa läntisen keskustan alueen, Biolaakson, Kupittaaan

ja Yliopistonmäen kiinteistöt. Suurin osa Turun kaukojäähdytyksestä tuotetaan lämpöpumppulaitoksella, jossa käytetään hyväksi jätevedessä olevaa lämpöä. Jäteveden lämpö siirretään kaukolämpöverkkoon ja jäähtynyttä jätevettä käytetään kaukojäähdytysverkon viilentämiseen. Huippukuorman ja vikatilanteiden aikana jäähdytysenergiaa tuotetaan varatuotantolaitoksilla. (Turku Energia 2013.)

Lahdessa on kaukojäähdytystä toistaiseksi käytössä vain Sibeliustalossa. Jäähdytyksen tuottamiseen käytettiin alun perin absorptiojäähdytintä, joka sijaitsi voimalaitoksella noin kilometrin päässä jäähdytettävästä kohteesta. Jäähdytin sai alun perin käyttöön tarvittavan lämmön läheisen panimon prosessin ylijäämänä. Panimo lopetti myöhemmin toimintansa ja absorptioprosessin tarvitsemaa kuumaa vettä alettiin tuottaa Teivaanmäen voimalaitoksella. Vuonna 2010 absorptiojäähdytin vaihdettiin kompressoritoimiseen jäähdytyslaitteistoon. (Seitsonen 2012, 12.) Jäähdytysenergia pumpataan putkistoa pitkin. Käytössä on yksi osin eristetty menoputki sekä kaksi eristämätöntä paluuputkea, jotka pienentävät pumppausenergian tarvetta. Absorptiojäähdytin oli sijoitettu voimalaitoksen muiden järjestelmien yhteyteen siten, että tarvittava lämpöenergia saatiin kuumavesiprosessin paluuedestä, jonka lämpötila oli noin 160 °C. Lauhdutusenergia palautettiin hyödyksi kaukolämmön paluuveteen. (Energiateollisuus ry 2006, 559.) Järjestelmään kuuluu yhä myös kylmäakku, jolla voidaan tasata kulutushuippuja.

Lahti Energia on suunnitellut kaukokylmäverkoston rakentamista Ranta-Kartanon alueelle. Se merkitsisi kylmänjakeluverkoston rakentamista kaukolämpöverkoston rinnalle. Lahti Energia pitää kaukojäähdytyksen yleistymisen ongelmana kaupungin viereisen Vesijärven mataluutta, josta vettä ei riitä kaukojäähdytyksen toimituksiin kunnolla (Yle 2013.)

Tampereen Sähkölaitos on aloittanut kaukojäähdytyksen tarjoamisen hiljattain kaupungin keskustan alueella. Tampereen Sähkölaitos tuottaa tällä hetkellä kaukojäähdytysenergiaa pääasiassa läheisten järvien syvänteiden kylmää vettä käyttäen. Tarpeen mukaan vettä jäähdytetään lisää koneellisesti. (Tampereen Sähkölaitos 2013, 2-3.)

Taulukossa 3 on listattuna eri suomalaisten energiayhtiöiden kaukojäähdytyksen asiakastietoja. Helsingin Energia aloitti ensimmäisenä kaukojäähdytyksen Suomessa. Se on

myös suurin toimija kaukojäähdytysalalla Suomessa kaikilla osa-alueilla mitattuna. Helsingin keskustan tiivis kaupunkirakenne mahdollistaa kaukojäähdytyksen käyttämisen kustannustehokkaasti, koska energiatiheys saadaan suureksi. Putkipituudet jäävät lyhyemmiksi, koska rakennukset sijaitsevat lähellä toisiaan. Esimerkiksi Helsingin Energialla energiatiheys vuoden 2012 tietojen mukaan oli 1610 MWh/km. Rakennusten sopimusteho rakennuskuutiota kohden oli keskimäärin 10,84 W/m³

Turku Energia on toiseksi suurin toimija kaukojäähdytyksen saralla Suomessa. Kuten Helsingissä myös siellä tiheään rakennettu keskusta-alue on mahdollistanut kaukojäähdytyksen leviämisen. Kannattavuus paranee mitä enemmän energiaa pystytään myymään pienelle alueelle. Jäähdytysverkon rakentaminen on kallista etenkin valmiiksi rakennetuille kaduille, joten korkea energiatiheys on edellytys kannattavalle toiminnalle. Turku Energialle energiatiheys vuoden 2013 tietojen perusteella oli 1473 MWh/km. Rakennusten sopimusten rakennuskuutiota kohden keskimäärin oli lähes sama kuin Helsingissä, 10,49 W/m³.

Taulukko 3. Kaukojäähdytyksen asiakastietoja Suomessa vuodelta 2012 (Energiateollisuus ry 2013c).

	Kauko- jäähdytys- toiminnan aloittamis- vuosi	Luku- määrä	Asiakkaiden		Myyty energia	Kauko- jäähdy- tys- johtojen pituus
			Sopi- mus- teho	Raken- nus- tilavuus		
		kpl	MW	1000 m ³	MWh	km
Fortum Power and Heat Oy	2012	3	6,0	260	8 857	1,2
Helsingin Energiä	1998	224	132,3	12 200	93 548	58,1
Lahti Energia Oy	2000	1	0,6	90	97	1,2
Lempäälän Lämpö Oy	2008	1	0,6	46	1 560	0,2
Pori Energia	2012	1	0,3	31	15	0,3
Tampereen Kaukolämpö Oy	2012	2	0,3	40	6	0,2
Turku Energia Oy	2000	61	41,1	3 917	24 750	16,8
Vierumäen Infra Oy	2002	22	1,8	90	2 120	8,1
Yhteensä		315	183,0	16 674	130 953	86,1

Taulukossa 4 on vuonna 2012 tuotettu jäähdytysenergia tuotantotavoittain. Helsingin Energia oli ainut, joka oli ottanut käyttöön absorptiojäähdytystä. Lämpöpumpuilla on tuotettu eniten energiaa johtuen Helsingin Energiasta, joka tuottaa niillä kylmää ympäri vuoden. Vapaajäähdytys on ollut toiseksi suosituin tapa jäähdyttää kiinteistöjä. Sen suosiota selittää sen hyödyntämisen matalat kustannukset. Siihen riittää kalliiden laiteinvestointien sijaan vain lämmönsiirtimet ja pumppuja.

Kompressorijäähdytystä on käytetty lähinnä aloitettaessa kaukojäähdytystoimintaa jäähdytettävien kohteiden lukumäärän ollessa vähäinen. Esimerkiksi erilliset siirrettävät jäähdytyskontit ovat yksinkertaisia toteuttaa jos jäähdytyksen kysyntä on vähäistä ja alueellisesti hajaantunut.

Taulukko 4. Jäähdytysenergian tuotanto Suomessa tuotantotavoittain vuonna 2012 (Energiateollisuus ry 2013c).

	Absorp- tio MWh	Lämpöpump- pu MWh	Kompressori MWh	Vapaajäähdy- tys MWh	Yhteensä MWh
Fortum Power and Heat Oy		8 469	345	43	8 857
Helsingin Energia	23 721	50 572		19 255	93 548
Lahti Ener- gia Oy			97		97
Lempäälän Lämpö Oy			1 560		1 560
Pori Energia			15		15
Tampereen Kaukolämpö Oy			6		6
Turku Ener- gia Oy			1 646	23 104	24 750
Vierumäen Infra Oy		912	1 208		2 120
Yhteensä	23 721	59 953	4 877	42 402	130 953

Taulukko 5 kuvaa kaukojäähdytyksen tuotantokapasiteettia Suomessa vuoden 2012 osalta. Lukumäärällisesti eniten oli kompressorijäähdyttimiä. Niiden suosiota selittää aiemmin mainitut syyt, joita ovat juuri toteuttamisen yksinkertaisuus ja edullisuus yksittäisiä kohteita jäähdytettäessä. Helsingin Energia oli ainut, jolla oli käytössä absorptiojäähdyttimiä.

Taulukko 5. Kaukojäähdytyksen tuotantokapasiteetti Suomessa vuonna 2012 (Energiateollisuus 2013c).

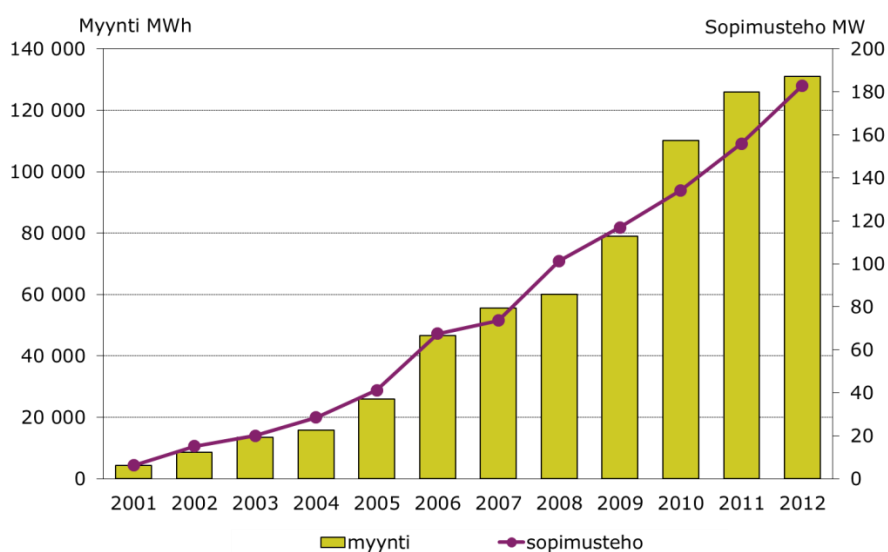
	Käyttöön- ottovuosi	Jäähdy- tys-teho MW	Yksiköi- den lu- kumäärä	Tyyppi
Fortum Power and Heat Oy				
Tapiola	2011	4,0	1	lämpöpumppu
Kivenlahti	2011	4,0	1	lämpöpumppu
Helsingin Energia				
Salmisaari	2001–06	35,0	10	absorptio
Lämpöpump- pu/Katri Vala	2007	60,0	5	lämpöpumppu
Jäähdytyskontit	2000–04	9,2	9	kompressori
Lahti Energia Oy				
Teivaanmäki	2011	0,4	1	kompressori
Lempäälän Lämpö Oy				
Lempäälän Jäähalli	2008	0,6	1	kompressori
Pori Energia				
Jäähdytyskontti: kaupunginsairaala	2012	1,5	1	kompressori
Tampereen Kaukolämpö Oy				
SRW 03/Ratina	2012	0,4	1	kompressori
Turku Energia Oy				
ITH/Itäharju	2004–05	2,0		lämpöpumppu
BLK/Biolaakso	2005–07	2,0		lämpöpumppu
SKK/siirrettävät	2001–06	5,3		kompressori
ITH/Itäharju	2002–06	2,7		kompressori
BLK/Biolaakso	2003–07	3,9		kompressori
Vierumäen Infra Oy				
Lämpöpumppu/ jäähalli	2002	0,5		lämpöpumppu
Hotellin verkko	2010	1,2		kompressori
Yhteensä		132,7		

Taulukko 6 kuvaa vapaajäähdytyksellä saatua kaukojäähdytystehoa Suomessa vuonna 2012. Vapaajäähdytystä on järkevää hyödyntää silloin, kun kaupunki sijaitsee meren rannalla ja meri on tarpeeksi syvä. Myös jäteveettä on mahdollista käyttää vapaajäähdytykseen. Talviaikaan voidaan käyttää myös ulkoilmaa. Vapaajäähdytyksen teho vaihtelee vuoden aikojen mukaan riippuen energialähteen lämpötilasta.

Taulukko 6. Vapaajäähdytyksellä saatu kaukojäähdytysteho Suomessa vuonna 2012 (Energiateollisuus 2013c).

	Käyttöönottovuosi	Jäähdytysteho	Energianlähde
		MW	
Fortum Power and Heat Oy			
Tapiola	2011	2,8	ilma
Kivenlahti	2011	2,8	ilma
Helsingin Energia			
Salmisaari	2000-04	40,0	merivesi
Hanasaari	2007	30,0	merivesi
Jäähdytyskontit	2000-04	4,0	ulkoilma
Turku Energia Oy			
Kakola	2009	35,0	jätevesi
Yhteensä		114,6	

Kuvassa 5 on esitetty kaukojäähdytyksen sopimustehon ja energianmyynnin kehitys Suomessa vuosina 2001–2012. Energiateollisuus ry:n mukaan kaukojäähdytys lisääntyy Suomessa Euroopan nopeinta tahtia. Vuosien 2010 ja 2011 välillä kasvua tapahtui 13 %, suhteessa enemmän kuin missään muualla Euroopassa. Vuoden 2012 aikana kaukojäähdytystä tarjoavien suomalaisyritysten määrä on kaksinkertaistunut. (Energiateollisuus ry 2012.) Kysyntää on lisännyt kiinteistöjen kasvanut jäähdytystarve ja ihmisten mukavuudenhalu. Kaukojäähdytyksellä vältetään myös kalliit laiteinvestoinnit ja laitteiden vaatima suuri tila.



Kuva 5. Kaukojäähdytystehon ja kylmän myynnin kehitys Suomessa vuosina 2001–2012 (Energiateollisuus 2013c).

3.3 Kylmävarastot

Jäähdytysenergian tarpeen vaihtelu on merkittävää vuodenajan, vuorokauden ajan ja sään mukaan. Tavallisesti Suomessa esiintyy kesäisin 4–8 tunnin kulutushuippuja 2–4 päivänä kesässä. Kaukojäähdytyksen tuotantotarvetta on mahdollista tasata varastoimalla jäähdytysenergiaa kylmäakkuihin. Tällä tavalla voidaan pienentää tarvittavaa jäähdytyksen tuotantokapasiteettia ja tuotantolaitoksen vuotuinen huipun käyttöaika kasvaa. Kylmäakun mitoitusperusteena voi pitää suurin piirtein kolmasosaa ja kylmäkoneen mitoitusperusteena kahta kolmasosaa tuotantotehosta. Tällöin kylmäkoneilla saadaan tuotettua suoraan noin 80 % ja varastolla noin 20 % jäähdytysenergian tarpeesta. (Suomen Kaukolämpö ry 2004, 7; Energiategollisuus ry 2006, 553.)

Jäähdytysenergian varastoinnilla on mahdollista saavuttaa useita etuja (Suomen Kaukolämpö ry 2004, 7):

- pienempi energiantuotannon kapasiteettitarve
- pienemmät investointikustannukset
- parempi käyttövarmuus
- välttyminen pienen kuorman aiheuttamalta huonolta hyötysuhteelta
- kulutuksen ajallinen riippuvuus tuotantotarpeesta on pienempi

Kylmäakkuna voi toimia suuri eristetty vesisäiliö. Vesivarastoa käytetään kylmän vuorokausi- ja viikkovarastointiin. Kylmävarastona voidaan käyttää eristettyä terässäiliötä tai maan alle kallioon louhittua allasta. Sen lataus tapahtuu yöaikaan, jolloin jäähdytyksen tarve on pienempi ja sitä hyödynnetään päivisin jäähdytystarpeen kasvaessa. Varaston koko määritellään niin, että se ehditään lataamaan edellisen puolen vuorokauden aikana. Varaston kokoa pystytään pienentämään käyttämällä erilaisia varastointitekniikoita kuten faasimuutoksiin perustuvia kylmän varastointeja. (Suomen Kaukolämpö ry 2004, 7; Energiategollisuus ry 2006, 553.)

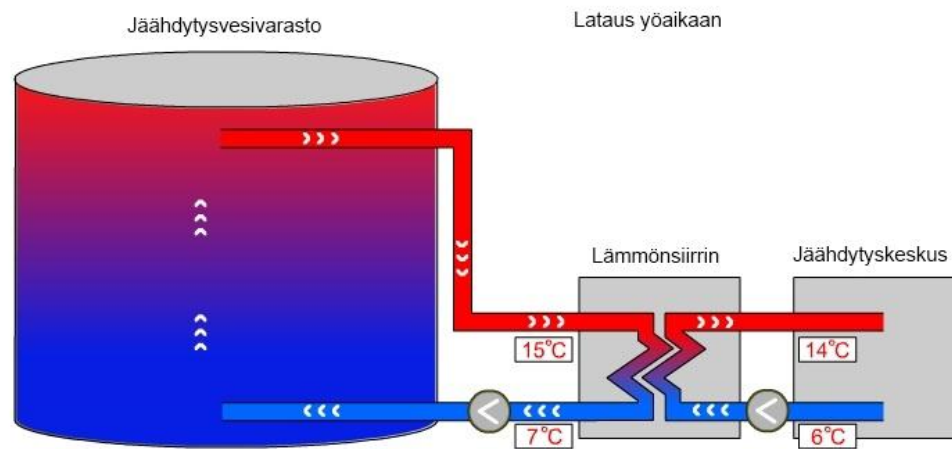
Kylmäakun energianvarastointikyky voidaan laskea yhtälöllä (2). Lämpö Q jaetaan tilavuudella V , jolloin tulos on energianyksikköä tilavuusyksikköä kohden.

$$Q = \rho V c_p \Delta T \quad (2)$$

missä	ρ	tiheys	[kg/m ³]
	V	tilavuus	[m ³]
	c_p	ominaislämpökapasiteetti	[kWh/kgK]
	ΔT	lämpötilaero	[K]

Esimerkiksi veden energian varastointikyky meno- ja paluupuolen lämpötilaerolla 10 K on noin 11,7 kWh/m³, kun käytetään veden tiheytenä 1000 kg/m³ ja ominaislämpökapasiteettina 4,2 kJ/kgK eli 1,166 kWh/kgK.

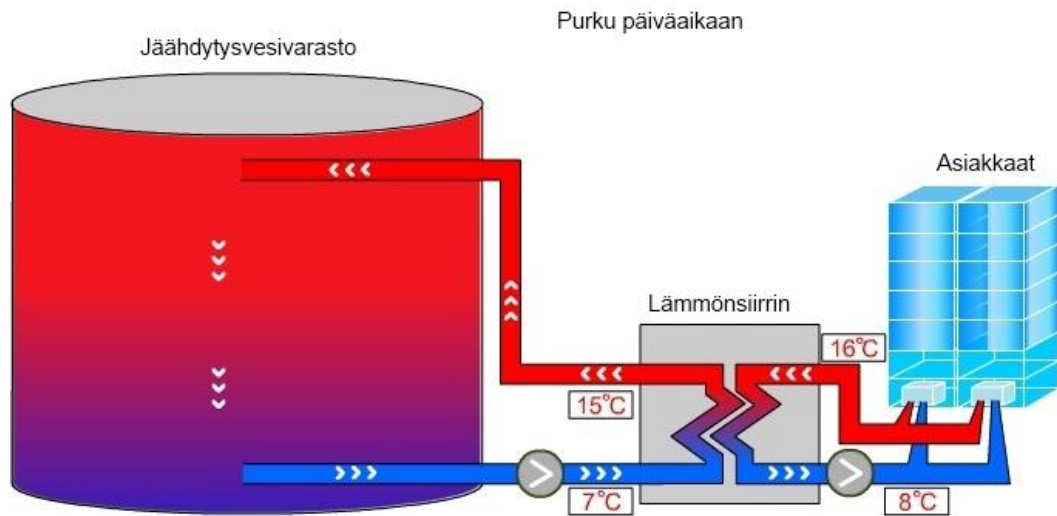
Kuvassa 6 on esitetty kylmäakun latauksen toimintaperiaate.



Kuva 6. Kylmäakun latauksen periaate (mukailtu lähteestä Helsingin Energia 2013a).

Akku ladataan tuottamalla jäähdytyskeskuksessa kylmää vettä, jonka avulla poistetaan vesivaraston huipulta lämmennyt vettä. Jäähdytetty vesi pumpataan säiliön pohjalle. Vesi kerrostuu itsestään siten, että kylmin vesi on pohjalla ja lämpimin säiliön yläosassa. Tämän takia lämmennyt vesi otetaan säiliön yläosasta.

Kuvassa 7 on esitetty kylmäakun purkamisen toimintaperiaate.



Kuva 7. Kylmäakun purkamisen toimintaperiaate (mukailtu lähteestä Helsingin Energia 2013a).

Kylmäakun purkamisessa jäähdytysvesi otetaan vesisäiliön pohjalta, sillä kylmin vesi on kerrostunut sinne. Lämpö poistetaan asiakkaan rakennuksesta jäähdyttämällä sieltä tulevaa vettä lämmönsiirtimen läpi. Jäähdytynyt vesi johdetaan uudestaan asiakkaan tiloihin.

Lumesta saadaan tehokas jäähdytyksen varastointitapa. Muun muassa Ruotsin Sundvalissa lumivarastoa käytetään sairaalan sisätilojen jäähdytykseen. Lumi varastoidaan talvisin asfalttikentälle ja peitetään keväisin lämpöeristeenä toimivalla puuhakkeella. Lumi voidaan tehdä myös lumitykeillä, jos sen tulo talvella on vähäistä. (Energiateollisuus ry 2006, 554.) Lumi ei kuitenkaan sovellu kovin laajamittaiseen jäähdytykseen varsinkaan tiheästi rakennetuilla alueilla sen vaatiman tilan vuoksi.

4 JÄÄHDYTYSENERGIAN TUOTANTO

Tässä kappaleessa esitellään jäähdytysenergian tuotannon yhteydessä esiintyvää käsitettä kylmäkerroin sekä yleisimmin kaukojäähdytykseen käytettyjä tekniikoita kuten vapaata jäähdytystä sekä absorptiojäähdytyskonetta. Adsorptiojäähdytintä sekä kompressorijäähdytintä käsitellään muita kylmäntuotantotapoja laajemmin, sillä ne ovat työn kannalta keskeisessä asemassa.

Adsorptiota ja absorptiota kutsutaan sorptioprosesseiksi. Adsorptiolla tarkoitetaan kaasun sitoutumista huokoiseen aineeseen ja absorptiolla kaasun liukenemista nesteeseen. Desorptioksi kutsutaan käänteisiä prosesseja, eli kaasun vapautumista kiinteästä aineesta tai nesteestä. Adsorptio ja absorptio ovat lämpöä vapauttavia reaktioita ja verrattavissa kaasun lauhtumiseen. Desorptio on lämpöä sitova prosessi ja verrattavissa höyrystymiseen. (Koljonen & Sipilä 1998, 11). Jäähdytyssovelluksissa jäähdytysvaikutus perustuu lopulta höyrystymisen lämpöä sitovaan vaikutukseen.

Kaukojäähdytystä tuotettaessa on otettava huomioon lämmönsiirtimien asteisuus eli se että lämpötila lämmönsiirtimen jälkeen on aina hieman jäähdytysverkon lämpötilaa suurempi. Kaukojäähdytysverkossa olevan veden on oltava siis aina kylmempää, kuin mitä rakennuksen jäähdytys edellyttää.

4.1 Kylmäkerroin

Termodynamiikan 1. pääsäännön perusteella energia voi muuttaa muotoaan, mutta sitä ei voi syntyä eikä kadota. Siitä ei kuitenkaan ilmene millä ehdoilla se voi tapahtua. On voitu osoittaa, että työ on mahdollista muuttaa kokonaisuudessaan lämmöksi, mutta lämpö saadaan muutettua vain osittain työksi lopun lämmön siirtyessä matalammassa lämpötilassa olevaan lämpövarastoon. (Teknillinen termodynamiikka 2013.)

Prosessin aikana vapautuva energia on mahdollista ottaa talteen muuntamalla se työksi tai lämmöksi. Kahden tilan ollessa epätasapainossa keskenään menetetään tasaantumisvaiheen aikana palautumattomasti hyödynnettävissä olevaa energiaa. Tasautumisprosessin aikana on mahdollista hyödyntää vapautuvaa energiaa. (Teknillinen termodynamiikka 2013.)

Termodynamiikan toisen pääsäännön avulla voidaan muun muassa ennustaa prosessin suunta, määrittää tasapainotila sekä määrittää paras mahdollinen saavutettavissa oleva suorituskyky prosessille tai laitteelle. Termodynamiikan toisen pääsäännön mukaisesti prosessissa ei voi siirtyä lämpöä matalammasta lämpötilasta korkeampaan lämpötilaan ilman prosessiin tehtävää ulkopuolista työtä. (Teknillinen termodynamiikka 2013.)

Konetta, jonka tehtävä on tuottaa kylmää siirtämällä lämpöä jäähdytettävästä kohteesta muualle, korkeampaan lämpötilaan, kutsutaan kylmäkoneeksi. Kylmäkoneen hyötysuhdetta kutsutaan kylmäkertoimeksi. Kylmäkerroin (coefficient of performance) eli ε kuvaa jäähdytettävästä kohteesta saatavan poistetun lämmön suhdetta siihen systeemiin tehtyyn työhön nähden. Samalla periaatteella määritetään myös lämpöpumppujen yhteydessä käytettävä lämpökerroin. Tällöin tehtyä työtä verrataan kohteeseen siirrettyyn lämpöön.

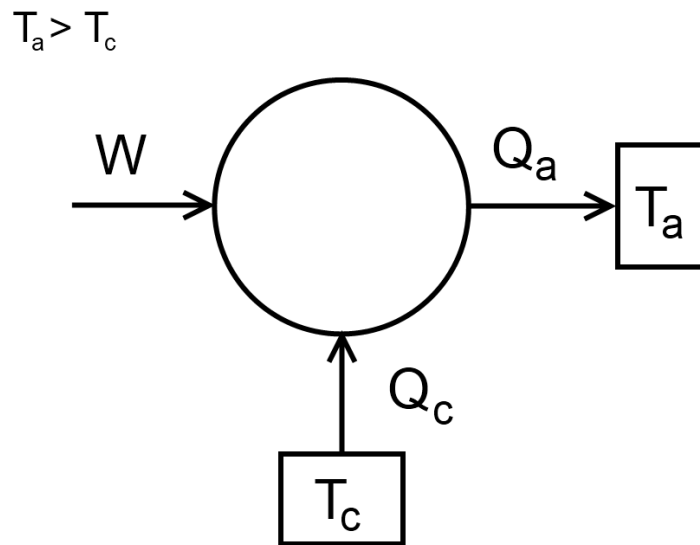
4.1.1 Kylmäkertoimen teoria

Kylmäkoneen kylmäkerroin voidaan laskea yhtälöstä (3).

$$\varepsilon = \frac{Q_c}{W} \quad (3)$$

missä	Q_c	lämpövirta jäähdytettävästä kohteesta	[J]
	W	laitteeseen tehty työ	[J]

Laitteeseen tehty työ on kompressorikylmäkoneen tapauksessa kompressorin ja apulaitteiden käyttämiseen kulutettua sähköenergiaa. Kuvassa 8 on esitetty sähkötoimisen kylmäkoneen energiamääräkaavio.



Kuva 8. Sähköllä toimivan kylmäkoneen energiamääräkaavio.

Termodynamiikan ensimmäisen pääsäännön mukaisesti energiaa ei häviä, eli systeemisistä poistettava lämpö on $Q_a = W + Q_c$. Termodynamiikan toisen pääsäännön mukaisesti lämmön Q_c siirtämiseksi matalammasta lämpötilasta T_c korkeampaan lämpötilaan T_a vaaditaan työ W .

4.1.2 Sorptioprosessien kylmäkerroin

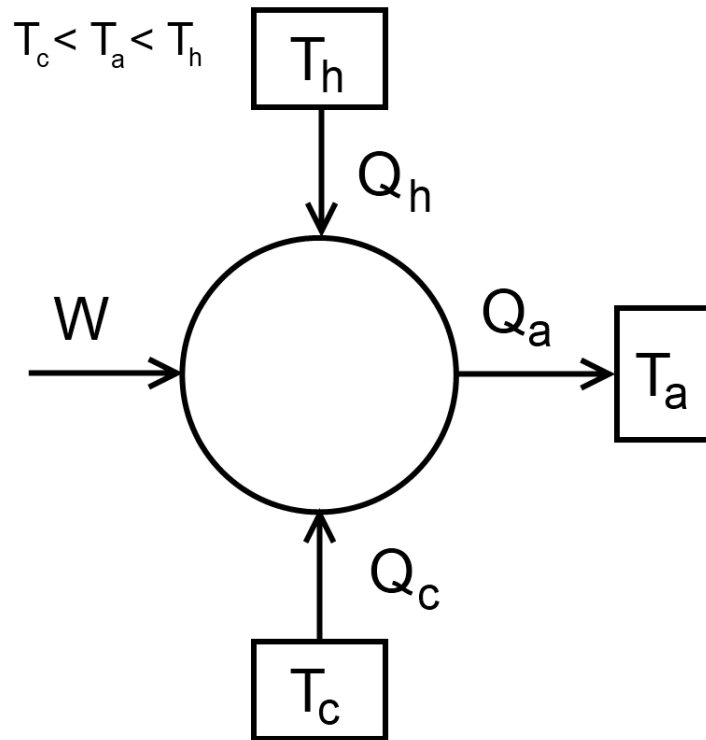
Adsorptio- ja absorptioprosessien tapauksessa laitteeseen tehty työ on kylmäenergian saamiseksi käytettyä lämpöenergiaa, esimerkiksi kaukolämpöä. Niiden kylmäkerroin voidaan määrittää siis kylmäenergian suhteena käyttöenergiaan. Tämä on esitetty yhtälössä (4).

$$\varepsilon = \frac{Q_c}{Q_h} \quad (4)$$

missä	Q_c	lämpövirta jäähdytettävästä kohteesta	[J]
	Q_h	prosessiin käytetty lämpö	[J]

Adsorptio- ja absorptiojäähdyttimet toimivat kolmen eri lämpötilatason, jäähdytettävän lämpötilan T_c , käyttölämpötilan T_h ja välilämpötilan T_a , välillä. Lämpötila T_a on lämpötila, johon ylimääräinen prosessissa hyödyntämättä jäävä lämpö hukataan. Lämpökäyttöi-

sen kylmäkoneen energiamääräkaavio on esitetty kuvassa 9. Työ W on adsorptio- ja absorptiojäähdyttimien tapauksessa kiertoaineen pumppaamiseen tehtyä työtä.



Kuva 9. Lämmöllä toimivan kylmäkoneen energiamääräkaavio.

Lamp et al. (1998, 2) mukaan palautuvan prosessin kylmäkerroin riippuu vain prosessin käyttölämpötiloista. Yhtälössä (5) on esitetty tämä tapa.

$$\varepsilon = \frac{1/T_a - 1/T_h}{1/T_c - 1/T_a} \quad (5)$$

missä	T_a	välilämpötila	[K]
	T_c	jäähdytettävä lämpötila	[K]
	T_h	käyttölämpötila	[K]

Alam et al. (2009, 1690) ovat esittäneet adsorptiosyklin kylmäkertoimen yhtälölle myös tarkemman muodon (5), jossa on esitetty menetelmät laskea kylmällä ja kuumalla puolella siirtyneet lämmöt.

$$\varepsilon = \frac{\dot{m}_c c_p \int_0^{t_{\text{sykli}}} (T_{c,s} - T_{c,u}) dt}{\dot{m}_h c_p \int_0^{t_{\text{sykli}}} (T_{h,s} - T_{h,u}) dt} \quad (5)$$

missä	\dot{m}_c	kylmän puolen veden massavirta	[kg/s]
	\dot{m}_h	kuuman puolen veden massavirta	[kg/s]
	c_p	veden ominaislämpökapasiteetti	[kJ/kgK]
	t_{sykli}	yhden adsorptiosyklin pituus	[s]
	$T_{c,s}$	kylmän veden sisäänmenolämpötila	[°C, K]
	$T_{c,u}$	kylmän veden ulostuloslämpötila	[°C, K]
	$T_{h,s}$	kuuman veden sisäänmenolämpötila	[°C, K]
	$T_{h,u}$	kuuman veden ulostulolämpötila	[°C, K]

Adsorptiojäähdyttimen COP arvoja eri toimintapisteissä on tutkittu melko kattavasti. Demir et al. (2008, 2387) ovat keränneet adsorptiojäähdyttimelle eri lähteissä saavutettuja kylmäkertoimia eri ainepareilla. Osa näistä on esitetty taulukossa 7.

Taulukko 7. Eri tutkimuksissa saatuja kylmäkertoimia adsorptiojäähdyttimille. (Demir et al. 2008, 2388–2392).

Ainepari	Lauhtumis- lämpötila [°C]	Höyrystymisläm- pötila [°C]	Lämmönläh- teen lämpötila [°C]	COP
Silikageeli-vesi	30	14	60	0,3-0,65
Silikageeli-vesi	30	14	55	0,25
Silikageeli-vesi	31	15	86	0,41
Silikageeli-vesi	35	10	80	0,6
Silikageeli-vesi	35–45	10–20	80–95	0,5
Silikageeli- metanoli	30	0	85	0,3
Zeoliitti-vesi	20	2	150	0,3
Aktiivihiili- metanoli	27	-10	100	0,5

Vertailun vuoksi tyypillisiä kylmäkertoimia on esitetty myös absorptiojäähdyttimelle sekä kompressorikylmäkoneelle. Taulukosta 8 ilmenee näiden laitteiden tyypillisiä kylmäkertoimia.

Taulukko 8. Kylmäkertoimia eri järjestelmille (Demir et al. 2008, 2387).

Prosessi ja aineparit		Kylmäkerroin
Adsorptiojäähdytin	Aktiivihiili-metanoli	0,12–1,06
	Zeoliitti-vesi	0,28–1,4
	Silikageeli-vesi	0,25–0,65
Absorptiojäähdytin	Metanoli-vesi	0,7–1,1
Kompressorikylmäkone		3–4

Kuten arvoista nähdään, mekaanisilla kylmäkoneilla on kylmäkertoimen suhteen huomattava etu adsorptio- ja absorptiojäähdyttimiin. Adsorptiojäähdyttimen tapauksessa silikageeli-vesi aineparilla ei saavuteta korkeinta kylmäkerrointa, mutta sen käyttöön soveltuvien lämpötilatasojen puolesta se on paras valinta kaukolämpöä käytettäessä.

Saksalainen valmistaja GBU on ilmoittanut valmistamilleen adsorptiojäähdyttimille COP arvoja, jotka riippuvat kylmän, kuuman ja jäähdytysveden lämpötiloista. Oheisessa taulukossa 9 on esitetty COP arvoja, kun kylmää vettä jäähdytetään 10 °C:sta 5 °C:een, jäähdytysveden lämpötilat ovat 28–32 °C ja kuuman veden lämpötilat 65–100 °C. Taulukossa ilmoitetut arvot muuttuvat hieman kylmän veden lämpötilatasoja muuttaessa. Liitteessä 1 on esitetty saman valmistajan tiedot COP:lle myös muilla kylmän veden lämpötilatasoilla.

Taulukko 9. Erään adsorptiojäähdyttimen COP-arvoja (GBU 1999, 17).

Jäähdytysveden lämpötila	Kuuman veden lämpötila							
	65 °C	70 °C	75 °C	80 °C	85 °C	90 °C	95 °C	100 °C
28 °C	0,43	0,50	0,54	0,58	0,60	0,62	0,63	0,64
29 °C		0,46	0,51	0,55	0,58	0,60	0,62	0,63
30 °C			0,48	0,53	0,56	0,58	0,60	0,62
31 °C			0,45	0,50	0,54	0,57	0,59	0,60
32 °C				0,47	0,51	0,54	0,57	0,59

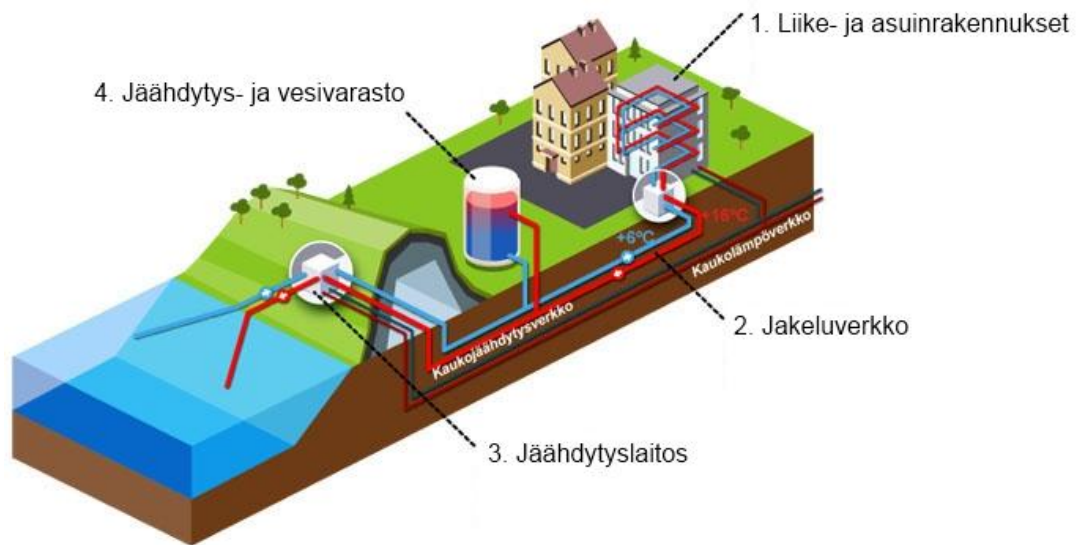
Taulukon tietojen mukaan kylmäkerroin on parhaimmillaan kun jäähdytysveden lämpötila on matalimmillaan ja kuuman veden lämpötila korkeimmillaan.

Japanilainen valmistaja Union Industry on ilmoittanut tuotteidensa englanninkielisellä myyntisivustolla valmistamilleen adsorptiojäähdyttimille kylmäkertoimeksi 0,66 teholuokissa 68–553 kW. Kylmäkerroin on ilmoitettu kuuman veden lämpötilan ollessa 88,0–83,8 °C, jäähdytysveden ollessa 31,0–34,7 °C ja kylmän veden ollessa 14–9 °C. Union Industryn ilmoittama kylmäkerroin on samaa suuruusluokkaa kuin GBU:n tiedot vuodelta 1999. (Union Industry 2013.)

4.2 Vapaa jäähdytysenergia

Jäähdytysenergian tuotanto vapaalla jäähdytyksellä perustuu luonnon omien energiavarojen hyödyntämiseen. Niitä ovat esimerkiksi meri-, järvi- ja jokivesi sekä ulkoilma. Vapaa jäähdytystä hyödyntämällä on mahdollista saada suuri osa tarvittavasta jäähdytysenergiasta ja –tehosta. (Energiateollisuus ry 2006, 531). Vesistön koolla ja syvyydellä on vaikutusta sen käytettävyyteen. Pieniä vesistöjä ei ole välttämättä mahdollista käyttää jäähdytykseen niiden korkean lämpötilan takia.

Kuvassa 10 on esitetty vapaan jäähdytyksen periaate. Rakennukseen virtaa kaukojäähdytyslaitteiston kautta kylmää vettä, joka jäähdyttää huoneistoja. Vesi otetaan jostain luonnon omasta lähteestä, kuten merestä tai järvestä sellaisesta syvyydestä, jonka lämpötila vastaa tyypillistä jäähdytysveden lämpötilaa eli noin 6–8 °C. Riittävä syvyys on erilainen eri vesistöissä. Jäähdytysveteen sitoutuu rakennuksen lämpöä, jolloin se lämpenee. Lämmennyt vesi johdetaan putkea pitkin takaisin jäähdytyslaitokselle uudelleen jäähdytettäväksi. Paluuveden lämpötila on tyypillisesti luokkaa 15 °C (Helsingin energia 2013a; Ocean Thermal Energy 2013.)



Kuva 10. Vapaajäähdytyksen periaate (mukailtu lähteestä Helsingin Energia 2013a).

Jäähdytyslaitoksessa lämmin vesi johdetaan joko hyötykäyttöön kaukolämpöverkkoon tai se jäähdytetään mereen, jos lämmölle ei ole sillä hetkellä käyttöä. Jäähdytys tapahtuu lämmönsiirtimen avulla, jossa merivesi ja jäähdytysvesi virtaavat vastavirtaan. Lämmönsiirtimen käytöllä estetään käsitellyn jäähdytysveden likaantuminen ja kiinteistöjen jäähdytyslaitteiden ongelmaton toiminta. Jäähdytyslaitoksen jälkeen kylmä vesi pumpataan kylmävarastoon ja edelleen sieltä jäähdyttämään rakennuksia. (Helsingin energia 2013; Ocean Thermal Energy 2013.)

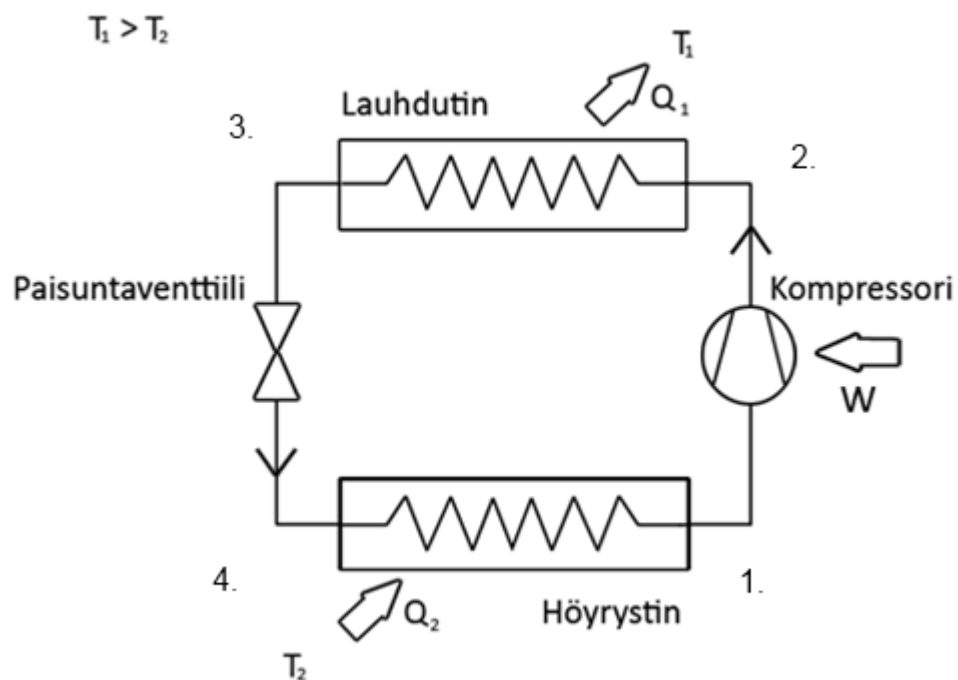
Vapaalla jäähdytyksellä on tyypillisesti mahdollista säästää noin 80–90 % energiaa tavanomaiseen kompressoritoimiseen ilmastointiin verrattuna. Vapaassa jäähdytyksessä energiaa kuluu vain pumppujen käyttöön. Itse jäähdytysenergian tuottamiseen ei kulu lainkaan sähköenergiaa kuten tavanomaisessa jäähdytyksessä. Tästä syystä vapaalla jäähdytyksellä on merkittäviä etuja kustannusten, energian ja ympäristön suhteen. (Ocean Thermal Energy 2013.)

4.3 Kompressorijäähdytys

Kompressorikylmäkoneet ovat yleisimmin käytössä olevia jäähdytyslaitteita. Prosessin käyttövoimana on useimmiten sähkötoiminen kompressori, mutta myös polttomoottoreita käytetään. Kompressorikylmäkone toimii kylmähöyryprosessin avulla.

Kompressorikylmäkoneen toiminta perustuu kylmäaineen höyrystymiseen matalassa paineessa. Jäähdytettävän kohteen lämpö tuodaan höyrystimeen, jolloin kylmäaine höyrystyy ja siihen sitoutuu lämpöä ja jäähdytettävä kohde jäähtyy. Höyrystyneen kylmäaineen painetta nostetaan kompressorilla, jolloin höyry tulistuu. Tulistunut kylmäaine lauhdutetaan lauhduttimessa. Lauhteen lämpöä poistetaan lauhduttimen väliaineella, joka voi olla esimerkiksi vesi tai ilma. Lauhtuneen nesteen paine lasketaan paisunta-venttiilillä ja se johdetaan jälleen höyrystimeen. (Oinonen & Soimakallio 2001, 29).

Lauhdelämpö voidaan pienissä laitteissa poistaa samaan tilaan, missä itse laite sijaitsee. Lämmönpoisto voi tällöin tapahtua säteilemällä ja luonnollisella konvektiolla. Suuremmissa kohteissa on lämpö poistettava esimerkiksi ulkoilmaan ja tällöin on myös käytettävä apuna puhaltimia pakotetun konvektion aikaansaamiseksi. Kuvassa 11 on esitetty kompressorijäähdyttimen toimintaperiaate.



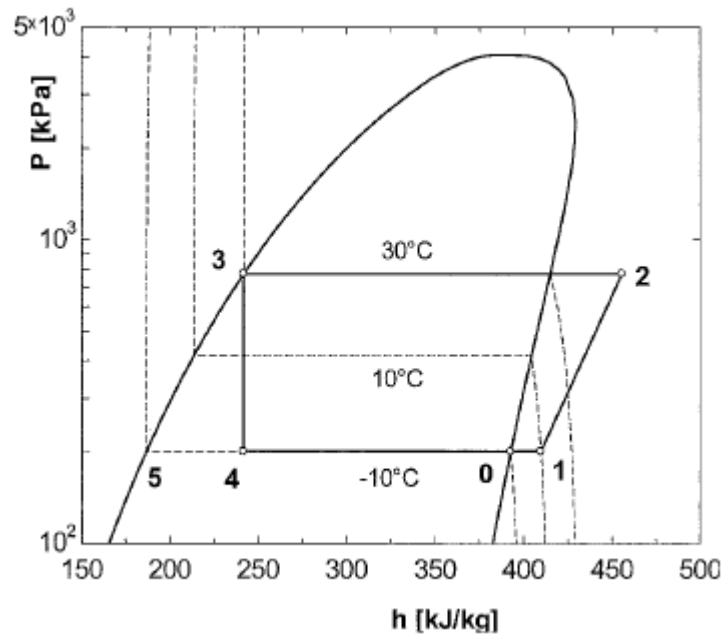
Kuva 11. Kompressorijäähdyttimen toimintaperiaate.

Kompressorijäähdytyksessä jäähdytysvaikutus saadaan aikaan höyrystimellä. Kylmäaine sitoo höyrystyessään jäähdytettävän kohteen lämpöä. Lämpö poistetaan lauhduttimessa esimerkiksi ilmaan, kuten jääkaapin tapauksessa. Lämmönsiirtoa voidaan tehos-

taa esimerkiksi erilaisilla putkistoon asennettavilla rivoilla sekä puhaltimella. Soveltuvissa kohteissa voi olla mahdollista myös hyödyntää jäähdytyksestä syntyvää lauhde-lämpöä. Esimerkki tällaisesta kohteesta voisi olla elintarvikekauppa, jossa tarvitaan jäähdytystä elintarvikkeille ja lämmitystä liiketiloille.

Kylmähöyryprosessi voidaan kytkeä suorasti tai epäsuorasti. Suorassa kytkennässä höyrystin sijaitsee suoraan jäähdytettävässä kohteessa, josta lämpöä siirtyy höyrystyvään kylmäaineeseen. Kuvan 11 prosessi toimii suoralla kytkennällä. Epäsuorassa kytkennässä on kylmäaine- eli primääripiirin lisäksi erillinen jäähdytyksen jakelupiiri. Primääripiirissä kiertävän kylmäaineen tuottama jäähdytysteho siirtyy lämmönsiirtimen kautta toisiopiirin lämmönsiirtoaineeseen. Epäsuorassa kytkennässä kylmäaineen höyrystymislämpötila on matalampi kuin suorassa kytkennässä ja tämä taas huonontaa järjestelmän hyötysuhdetta. (Oinonen & Soimakallio 2001, 29–30.)

Kuvassa 12 on esitetty kompressoritoimisen jäähdytyksen prosessi paine-entalpia -tasossa. Tilapisteet on sijoitettu myös aiempaan kuvaan 11. Kuvassa 12 väli 2–3 vastaa lauhduttimessa tapahtuvaa lämmönpoistoa. Lauhtuminen tapahtuu vakiopaineessa, mutta entalpia pienenee. Väli 3–4 vastaa paisuntaventtiilissä tapahtuvaa kylmäaineen paineen laskua. Toisinaan kylmäaine voi myös alijäähtyä, jolloin piste 3 sijaitsisi käyrän vasemmalla puolella. Väli 4–1 vastaa kylmäaineen lämpenemistä ja höyrystymistä. Kuvasta nähdään, että kylmäaine höyrystyy vakiopaineessa ja sen entalpia kasvaa lämmön sitoutumisen takia. Väli 1–2 vastaa kompressorissa tehtävää työtä. Tällä välillä kylmäaineen paine ja entalpia nousee. Käyrän sisäpuolella oleva alue kuvaa nesteen ja höyryn seosta.



Kuva 12. Jäähdytysprosessi paine-entalpia -tasossa (Aittomäki 2008, 73).

Kompressorikoneiden kylmäkerroin on tyypillisesti 1,5–5. Kylmäkertoimen vaihtelu johtuu käytettävästä kylmäaineesta ja toimintalämpötiloista. Epäsuorasti kytkettyjen kylmäkoneiden kylmäkerroin on höyrystimeen aiheutuvan lämpötilaeron takia matalampi kuin suoralla kytkennällä. Lisäksi toisiopiirin lämmönsiirtonesteen kierto on tarvittava pumppu lisää energiantarvetta ja laskee täten kylmäkerrointa. (Oinonen & Soimakallio 2001, 31.)

Kompressorikylmäkoneet aiheuttavat suoria kasvihuonepäästöjä ympäristöön jos niiden kylmäainetta vapautuu. Kylmäainetta voi vapautua esimerkiksi käytön aikaisista vuotoista, laitteistojen rikkoutumisesta ja käsittelyvirheistä. Päästöjä aiheutuu myös kylmälaitteiden kylmäainetäyttöjen ja -poistojen aikana. Lisäksi päästöjä aiheutuu epäsuorasti niiden käyttöön tuotetun sähkön tuotannosta. On arvioitu, että kylmälaitosten aiheuttamista päästöistä viidesosa on peräisin kylmäaineista ja loput laitosten käyttämiseen tuotetun energian tuotannosta syntyvistä hiilidioksidipäästöistä. (Oinonen & Soimakallio 2001, 32.)

4.3.1 Kylmäaineet

Kylmäkoneessa käytettyä työainetta kutsutaan kylmäaineeksi. Kylmähöyryprosessien tapauksessa ne ovat nesteytettyjä kaasuja. Kylmäkoneissa on aiemmin käytetty laajalti CFC- ja HCFC-yhdisteitä, jotka ovat halogenoituja hiilivetyjä. CFC-yhdisteet aiheuttavat ympäristöön päästessään voimakasta ilmakehän otsonikatoa ja lisäksi ne ovat voimakkaita kasvihuonekaasuja. Niiden valmistus ja maahantuonti on kielletty vuoden 1995 alusta lähtien. HCFC-yhdisteet vaikuttavat otsoniin vähän verrattuna CFC-yhdisteisiin, mutta nekin ovat voimakkaita kasvihuonekaasuja. Niitä sisältävien laitteiden maahantuonti ja myynti on kielletty vuoden 2000 alusta lähtien. (SKLL 2008a.)

Toivottavia ominaisuuksia kylmäaineille ovat (Larjola 2012, 72):

- ilmanpainetta suurempi höyrynpaine, jolloin vältetään ilmapuotoja
- ei palava
- ei räjähtävä
- ei korroosiota aiheuttava
- hajusta helposti tunnistettava, jolloin vuotojen havaitseminen onnistuu yksinkertaisesti
- halpa hinta

Kylmäaineiden ympäristövaikutuksiin liitetään tunnusluvut ODP ja GWP. ODP (ozone depletion potential) ilmoittaa kylmäaineen haitallisuuden kylmäaineeseen R11 nähden, jonka arvo on 1. GWP (global warming potential) ilmoittaa kylmäaineen kasvihuonehaitallisuuden. GWP-lukua verrataan hiilidioksidiin, jolle on annettu arvo 1. Luku ilmoitetaan yleensä 100 vuoden ajanjaksolle laskettuna arvona. Sen asteikko on 0:stä ylöspäin. Uusissa kylmälaitoksissa käytettävien kylmäaineiden ODP-luvun tulee olla 0. (SKLL 2008b.)

Taulukossa 10 on esitetty nykyisin käytössä olevien HFC-kylmäaineiden ominaisuuksia ja käyttökohteita.

Taulukko 10. Käytössä olevien HFC-yhdisteiden ominaisuuksia (SKLL 2008b).

Kylmäaine	R134a	R410A	R404A
Kiehumispiste [°C]	-26,1	-51,6	-46,6
Kriittinen lämpötila [°C]	101,0	74,7	72,1
Kriittinen paine [bar]	40,7	51,7	37,3
ODP	0	0	0
GWP	1300	1720	3260
Edut	<ul style="list-style-type: none"> • alhainen puristus-paine • hyvä kylmäker-roin • pienehkö GWP-luku 	<ul style="list-style-type: none"> • hyvä tilavuustuotto • laaja käyttöalue • melko pieni GWP-luku 	<ul style="list-style-type: none"> • laaja käyttöalue • alhainen tulistu-minen puristuk- sessa
Haitat	<ul style="list-style-type: none"> • pieni tilavuus- tuotto 	<ul style="list-style-type: none"> • korkea puristus-paine 	<ul style="list-style-type: none"> • korkeahko GWP-luku • korkeahko puris- tus-paine
Käyttökohteita	<ul style="list-style-type: none"> • kodin kylmälait- teet • ilmastoinnin jäädytys • lämpöpumput 	<ul style="list-style-type: none"> • vedenjäädytyskoneis- tot • kaappi- ja vakioilmas- tointikoneet 	<ul style="list-style-type: none"> • myymälöiden kylmälaitokset • kylmä- ja pakas- tekoneistot • jääratkoneistot

Edellä mainittujen kylmäaineiden lisäksi on olemassa vielä HFC- ja PFC-yhdisteitä, jotka ovat fluorihilivetyjä kylmäaineita sekä kylmäaineita, jotka eivät sisällä lainkaan halogeenimolekyylejä. Näitä halogeenimolekyylittomia kylmäaineita kutsutaan luonnonmukaisiksi kylmäaineiksi ja niitä ovat esimerkiksi puhtaat hiilivedyt, ammoniakki sekä hiilidioksidi. Ne eivät joko lisää kasvihuoneilmiötä tai lisäävät sitä hyvin vähän. Ne eivät ole haitallisia ilmakehän otsonikerrokselle. HFC- ja PFC-yhdisteet eivät ole otsonille haitallisia, mutta ovat sen sijaan kasvihuonekaasuina merkittävän haitallisia. (SKLL 2008b.) Taulukossa 11 on esitetty ammoniakin ja hiilidioksidin ominaisuuksia ja käyttökohteita.

Taulukko 11. Ammoniakin ja hiilidioksidin ominaisuuksia ja käyttökohteita (SKLL 2008b).

Kylmäaine	R717, ammoniakki	R744, hiilidioksidi
Kiehumispiste [°C]	-33,3	-78,4
Kriittinen lämpötila [°C]	132,4	31,1
Kriittinen paine [bar]	113,5	73,8
ODP	0	0
GWP	0	1
Edu	<ul style="list-style-type: none"> • hyvä tilavuustuotto • hyvät lämmönsiirto-ominaisuudet • hyvä kylmäkerroin • ympäristöystävällinen 	<ul style="list-style-type: none"> • loistava tilavuustuotto • pieni painesuhde • hyvät lämmönsiirto-ominaisuudet
Haitat	<ul style="list-style-type: none"> • erittäin myrkyllinen • palava • suhteellisen kallis laitos 	<ul style="list-style-type: none"> • korkea paine • syrjäyttää hapen vuototilanteissa
Käyttökohteita	<ul style="list-style-type: none"> • suuret vedenjäähdytyskoneistot • kylmä- ja pakastekoneistot • suuret lämpöpumput 	<ul style="list-style-type: none"> • pakastekoneistot • pienet kylmäkaapit • lämpöpumput

4.3.2 Kompressorityypit

Kylmän tuottamiseen käytetään pääasiassa kolmea eri kompressorityyppiä laitoksen kokoluokasta riippuen.

Mäntäkompressorissa on mäntä joka liikkuu edestakaisin ja puristaa kylmäainetta paineessa nesteeksi. Sitä käytetään pienissä alle 1,5 MW:n koneissa. Pieniä mäntäkompressoreja käytetään esimerkiksi kodin kylmäkoneissa. (Sipilä & Ranne 2004, 12.)

Ruuvikompressoreja käytetään aina 10 MW tehoon asti. Tässä kompressorityypissä ruuvi puristaa männän sijaan kylmäaineen korkeaan paineeseen hyvällä hyötysuhteella. Ruuvikompressorit soveltuu ammoniakkin käyttöön korkean työpaineen ansiosta. (Sipilä & Ranne 2004, 12.)

Keskipako- eli turbokompressorin toimii keskipakopumpun tavoin, eli kylmäaine virtaa roottorille aksiaalisesti, mutta roottori kääntää virtauksen radiaaliseksi. Virtaus poistuu roottorin ulkokehältä höyrystimille johtavaan putkistoon. Keskipakokompressorilla on hyvä hyötysuhde myös osakuormilla ja se vie vähän tilaa. Yhden yksikön teho voi olla jopa 25 MW. (Sipilä & Ranne 2004, 12.)

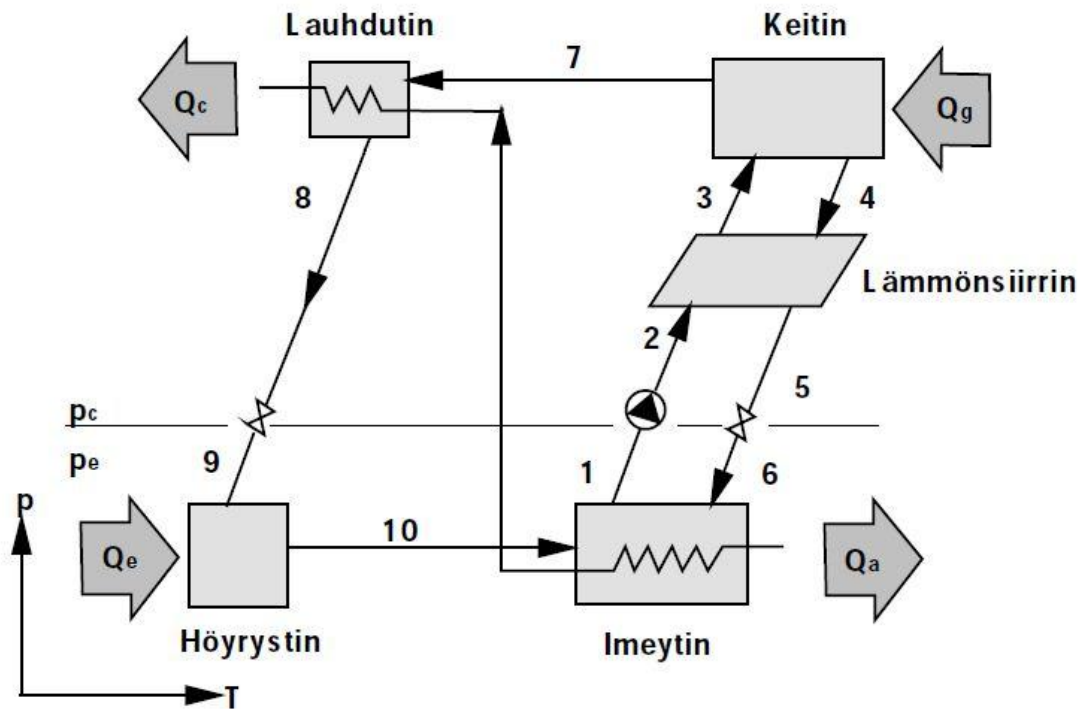
Scroll-kompressoreita käytetään ilmastoinnin jäähdytyksessä. Niitä käytetään myös lämpöpumpussovelluksissa ja ne soveltuvat moniin erilaisiin kylmäsovelluksiin. Scroll-kompressorissa on kaksi kierukkaa, joista toinen on kiinteä ja toinen pyörivä. Nämä kaksi kierukkaa mukautuvat toisiinsa, puristaen kylmäainetta spiraalin ulkokehältä keskustaa kohti. Scroll-kompressorin rakenteesta johtuen meluongelmat ovat vähäisempiä kuin esimerkiksi mäntäkompressorissa. (Danfoss 2013.)

Jos kompressorijäähdyttimen lauhdelämpö käytetään hyödyksi, kutsutaan laitetta lämpöpumpuksi. Kaukojäähdytystä on mahdollista tuottaa myös lämpöpumpuilla, jolloin on mahdollista tuottaa jäähdytyksen ohella kaukolämpöä. Esimerkiksi Helsingin Energia tuottaa osan kaukojäähdytyksestään ja -lämmityksestään lämpöpumpulaitoksella.

4.4 Absorptiojäähdytin

Absorptiojäähdytysprosessi perustuu käytetyn aineparin ominaisuuksiin ja erityisesti niiden käyttäytymiseen yhdessä liuoksena. Tietyissä paineissa ja lämpötilassa on tasapaino kaasun ja nesteeseen absorboituneen kaasun välillä. Kun lämpötilaa tai painetta muutetaan, muuttuu aineparin tasapaino, jolloin kaasua vapautuu tai sitoutuu. (Energiateollisuus ry 2006, 534). Absorptiojäähdytyskoneen käyttöenergiana voidaan käyttää teollisuuden hukkalämpöä tai yhteistuotantolaitoksesta saatavaa lämpöä, jolle ei kesäaikana ole vähäisen kulutuksen takia paljoa käyttöä. (Energiateollisuus ry 2013b).

Kuvassa 13 on esitetty absorptiojäähdyttimen toimintaperiaate.



Kuva 13. Absorptiolämpöpumpun toimintaperiaate (Koljonen & Sipilä 1998, 13).

Absorptiojäädyttimessä kylmäaine virtaa lauhduttimelta paisuntaventtiilin läpi höyrystimelle. Kylmäaine höyrystyy osittain jo venttiilissä ja loput höyrystimessä. Höyry absorboituu imeyttimessä olevaan liuottimeen eli absorbenttiin ja liuoksen paine nostetaan pumpulla takaisin tasolle p_c , joka nähtävissä yllä olevassa kuvassa. Imeytintä on jäähdytettävä, jotta saadaan kompensoitua lauhtumis- ja liukenemislämpö. Kylmäaine vapautetaan keittimessä ja kaasulla väkevöitetty liuos palautetaan imeyttimeen lämmönsiirtimen ja paisuntaventtiilin kautta. (Energiateollisuus ry 2006, 534).

Kylmäaineen höyrystymiseen tarvittava lämpö Q_e saadaan jäähdytettävästä nestevirrasta. Prosessin tarvitsema energia saadaan keittimelle tuodusta lämmöstä Q_g . Imeytintä ja lauhdutinta jäähdytetään yleensä vedellä, jonka lämpö poistetaan jäähdytystornissa. (Energiateollisuus ry 2006, 534). Kuvassa 13 energiavirrat Q_c ja Q_a tarkoittavat lauhduttimesta ja imeyttimestä poistettavaa lämpöä.

Absorptiojäädyttimen höyrystin koostuu höyrystinputkista, joissa jäähdytettävä vesi virtaa sekä jäähdytysaineen suihkuputkista että kokooma-altaasta. Imeyttimessä on liuospumppu, joka suihkuttaa absorptioaineen jäähdytysveden putkille. Laimentunut liuos

kerätään kokooma-altaaseen. Keittimessä lämpöä luovuttavan putkiston ja imeyttimeltä tulevan liuoksen suihkutuspukisto ovat kiehutusaltaassa. Lauhdutin koostuu jäähdytysvesiputkista sekä välilevyistä. Lauhduttimen lämpötila ja lauhtumispaine p_c määräytyvät käytettävän jäähdytysveden mukaan. Jäähdytysveden lämpötilan täytyy olla tarpeeksi alhainen, jotta saadaan aikaan lämpötilagradientti lauhdutettavan virtauksen ja jäähdytysveden välille. (Energiateollisuus ry 2006, 535).

Absorptiojäähdytyskoneen huolto koostuu lähinnä koneen kunnan sekä työaineen pitoisuuksien seurannasta. Eräissä selvityksissä vuosittaisiksi huoltokustannuksiksi on arvioitu 0,5–2 % laitteen investointikustannuksista. Absorptiokoneiston sisällä ei ole lainkaan liikkuvia osia, mikä tekee siitä toimintavarman. (Energiateollisuus ry 2006, 538).

4.5 Adsorptiojäähdytin

Adsorptiojäähdytin on jäähdytinlaite, jonka käyttöenergia on lämpö. Askalany et al. (2013, 566) sekä Wang et al. (2010, 344) mukaan adsorptiojäähdytysjärjestelmät ovat saaneet viime vuosina paljon huomiota johtuen niiden ympäristöystävällisyydestä ja kyvystä hyödyntää myös matalalämpötilaista jätelämpöä tai esimerkiksi auringosta peräisin olevaa lämpöä.

4.5.1 Adsorptioprosessi

Adsorptiolla tarkoitetaan prosessia, jossa kaasu sitoutuu kiinteän aineen pintaan (Aittomäki 2008, 98). Esimerkki kyseisestä prosessista on vesihöyryn adsorboituminen silikaageelin pinnalle. Adsorptioprosessia voidaan käyttää myös kuivaamiseen, jolloin ilmasta tai muista materiaaleista poistetaan vettä kuivausaineen avulla. Esimerkki kiinteästä kuivausaineesta on silikageeli. Adsorptio- ja kuivausjärjestelmät toimivat samalla fysikaalisella periaatteella, mutta niiden erona voidaan pitää sitä, että adsorptiojärjestelmää käytetään jäähdytykseen ja kuivausjärjestelmiä kosteuden poistoon. (Breembroek 2001, 10.)

Adsorptiossa sitoutuvan kaasun määrä pinta-alaa kohti ei voi olla suuri, joten tarvitaan aineita, joilla on hyvin suuri pinta-ala tilavuutta kohti. Tällaisia aineita kutsutaan mikro-

huokosellisiksi aineiksi. Tavallisimpia niistä ovat aktiivihiili, silikageeli ja zeoliitit. Esimerkiksi silikageelissä voi olla pinta-alaa jopa $800 \text{ m}^2/\text{g}$. (Aittomäki 2008, 98.)

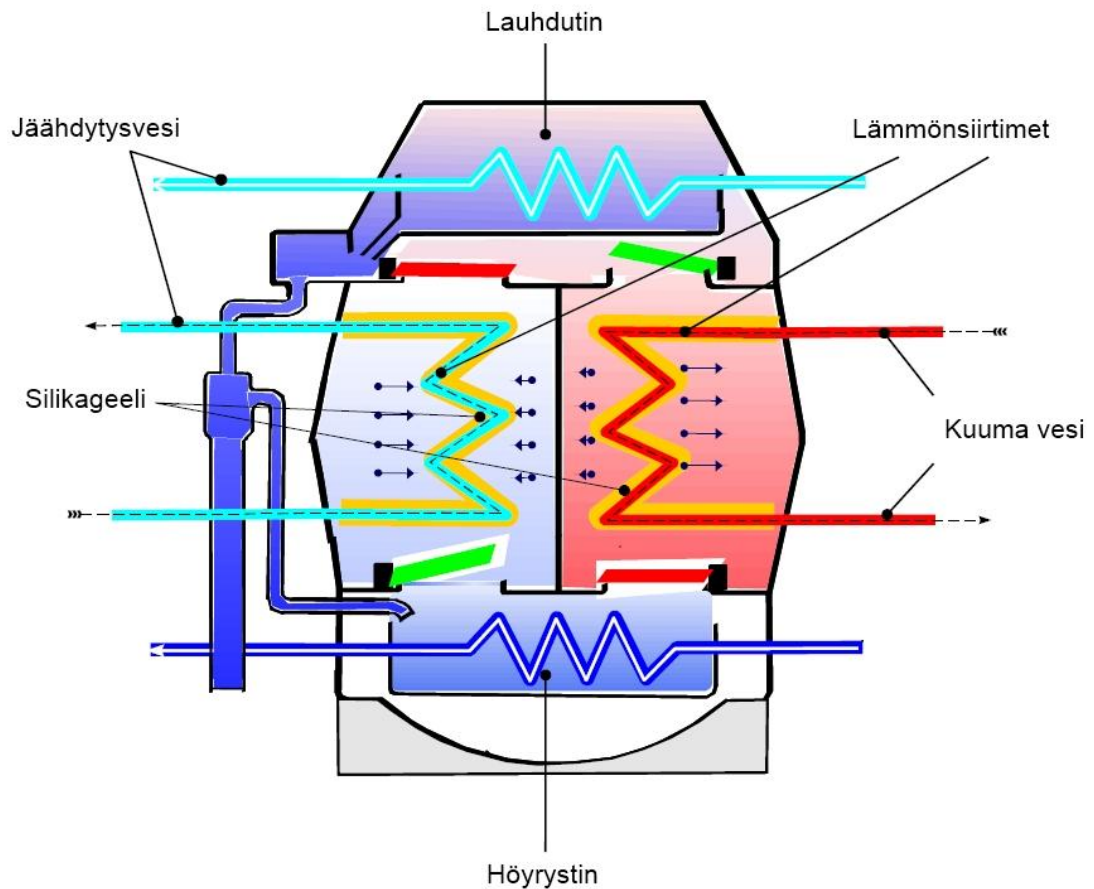
Adsorptioprosessilla saatava jäähdystysvaikutus perustuu käytettävän adsorbaatin eli imeytyvän aineen höyrystymiseen ja lauhtumiseen. Adsorptioprosessi toimii jopa $50 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpötilalla (Frey & Göbel 1996, 218). Adsorptiojäähdytintä on mahdollista käyttää useilla eri lämmönlähteillä. Eniten rajoituksia asettaa lämpötila, vaikka mataliakin lämpötiloja on mahdollista käyttää. Tiedossa on ainakin laitteita, joita käytetään aurinko- ja kaukolämmöllä. Käyttökelpoinen lämmönlähde on myös esimerkiksi teollisuuden hukkalämpö.

Kaukolämpövesi soveltuu suurimman osan vuodesta sellaisenaan adsorptiojäähdytin käyttöön. Wang et al. (2009, 525) mukaan silikageeli-vesi aineparia käytettäessä kuumen veden lämpötila ei voi olla suurempi kuin $120 \text{ }^\circ\text{C}$ ja se on yleensä alle $90 \text{ }^\circ\text{C}$. Kaukolämpöveden lämpötila voi talvisin olla jopa $120 \text{ }^\circ\text{C}$, jolloin sen lämpötilaa saattaisi olla tarve alentaa lämmönsiirtimen avulla tai meno- ja paluuvettä sekoittamalla. Toisaalta myös kaukolämmön paluuveden hyödyntämistä voisi tutkia, tällöin ei edes adsorptiojäähdytin kuumen veden huono jäähdystys olisi ongelmana.

4.5.2 Rakenne ja toiminta

Adsorptiolla saadaan aikaan jäähdystystä käyttämällä adsorbaatin ja adsorbentin yhdistelmää (Alghoul et al. 2007, 225). Adsorbaatilla tarkoitetaan ainetta, joka adsorboituu ja adsorbentilla ainetta, johon jokin muu aine adsorboituu. Desorptiolla tarkoitetaan adsorptiolle vastakkaista tapahtumaa.

Adsorptiojäähdytin koostuu höyrystimestä, lauhtuttimesta sekä kahdesta adsorptiosäiliöstä, jotka kumpikin on täytetty kiinteällä sorptiomateriaalilla. Kuvassa 14 on esitetty adsorptiojäähdytin rakenne.



Kuva 14. Adsorptiojäähdyttimen rakenne (mukailtu lähteestä GBU 1999, 4).

Yllä olevan kuvan järjestelmä toimii seuraavalla tavalla (Breembroek 2001, 10):

- oikeanpuoleiseen säiliöön adsorboitunut jäähdytysaine ajetaan kuuman veden avulla ulos
- jäähdytysaine tiivistyy lauhduttimessa ja tiivistymisessä vapautuva lämpö poistetaan jäähdytysvedellä
- tiivistynyt jäähdytysaine suihkutetaan höyrystimeen, jossa jäähdytysaine höyrystyy höyrystimessä vallitsevan alhaisen paineen takia. Tässä vaiheessa saadaan tuotettua haluttu jäähdytysvaikutus
- jäähdytysainehöyry adsorboituu vasemmanpuoleiseen säiliöön ja lämpö poistetaan sieltä jäähdytysvedellä

Adsorbenttia sisältävän säiliön ollessa täysin ladattu, vasemman ja oikean puoleisten säiliöiden tehtävät vaihdetaan keskenään. Prosessi on siis jaksoittainen, mikä on sen

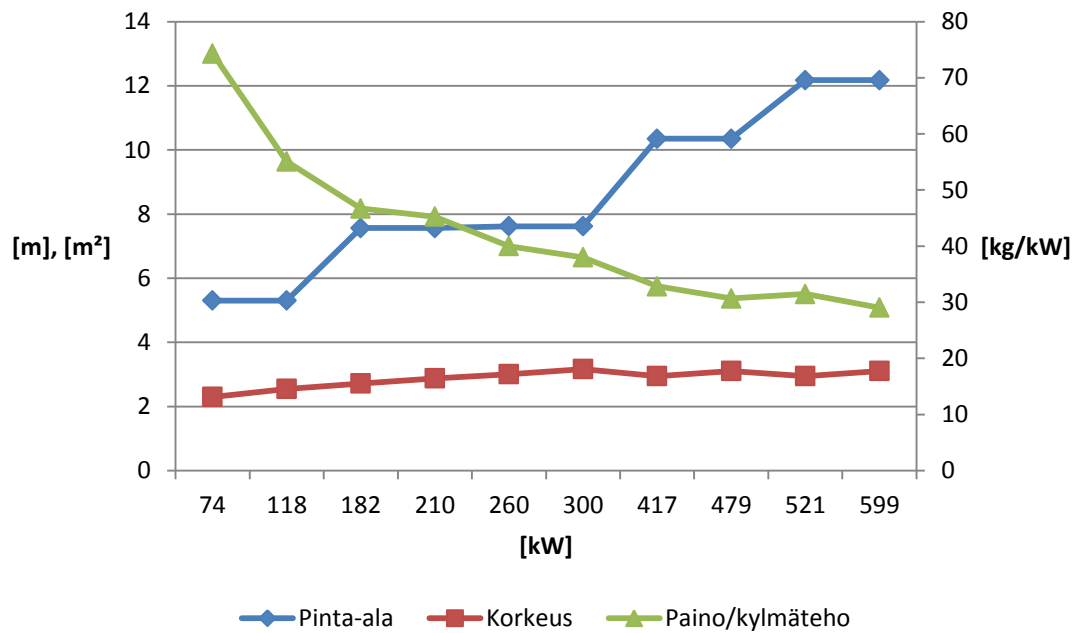
suurin haittapuoli. Säiliöiden tehtävien vaihtamisessa kuluu aikaa ja lisäksi se tarkoittaa sitä, että jäähdytys ei ole jatkuvaa. Näiden asioiden johdosta prosessin tehokkuus heikkenee. Yhtenäisen ja jatkuvan jäähdytyksen aikaansaamiseksi tulee kaksi tai useampi adsorptiosykliä liittää toisiinsa. Tällöin on aina vapaana yksi adsorptiosäiliö, johon höyrystimestä tuleva höyry voi adsorboitua. Useita yksiköitä käytettäessä eri yksiköt voivat siirtää lämpöä keskenään, jolloin ylimääräisen lämmön tarve vähenee ja prosessin tehokkuus paranee. (Breembroek 2001, 10). Tarkempi kuva adsorptiojäähdyttimen eri vaiheista on liitteessä 2.

Kuvassa 15 on esitetty osa saksalaisen valmistajan SorTechin adsorptiojäähdyttimen lämmönsiirtopinnasta.



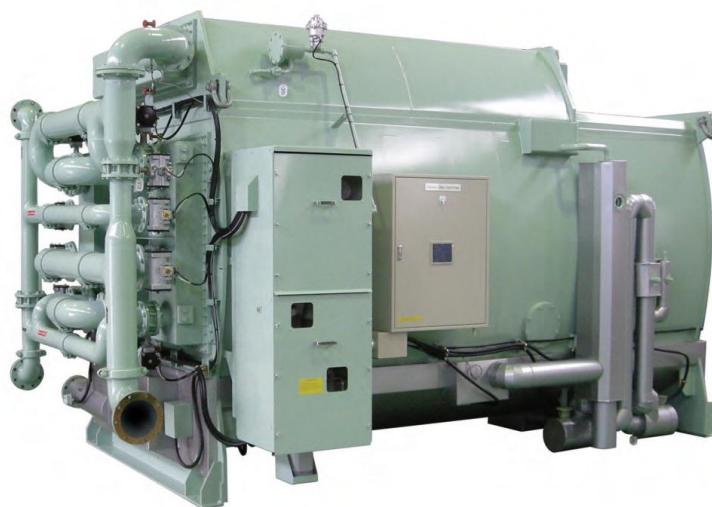
Kuva 15. Silikageeliä mitta-astiassa sekä osa SorTechin adsorptiojäähdyttimen lämmönsiirtopinnasta. (SorTech 2013).

Adsorbentti on saatu lämmönsiirtopinnalle muodostamalla kristalleja ja kasvattamalla pintaa kerroksittain. Laitteiden kokoluokkaa on havainnollistettu kuvalla 16.



Kuva 16. Eri kokoluokkien adsorptiojäähdyttimien pohjan pinta-aloja, korkeuksia sekä painon ja kylmätehon suhteita (Gerald 2013).

Kuvasta nähdään, että laitteen ominaispaino laskee selvästi teholuokan kasvaessa ja korkeus kasvaa vain vähän. Suurempi kapasiteetti saadaan aikaan siis kasvattamalla laitteen leveyttä ja pituutta. Kuvassa 17 on tyypillinen adsorptiojäähdytin.



Kuva 17. Adsorptiojäähdytin (Weatherite Manufacturing 2013).

Ylläolevasta kuvasta nähdään, että keskellä sijaitsevat adsorptiokammiot vievät suurimman osan laitteen tilavuudesta. Laitteen yläosassa sijaitsee lauhdutin ja alimpana höyrystin.

4.5.3 Adsorption aineparit

Adsorptiojäähdytyksen eri ainepareja on tutkittu melko runsaasti. Tässä luvussa esitellään yleisimmät käytettävät aineparit ja käydään läpi niiden ominaisuuksia. Esitellyt aineparit kuuluvat niin sanottuihin fysikaalisiin ainepareihin. Adsorptiossa käytettävillä adsorbenttiaineilla on oltava suuri ominaispinta-ala eli suuri pinta-ala massayksikköä kohden. Esimerkiksi aktiivihiilen ominaispinta-ala on noin 500–1500 m²/g ja silikageelin 100–1000 m²/g (Wang et al. 2009, 519–520.)

Adsorbaatti–adsorbentti aineparin valinta riippuu niiden termodynaamisista ja kemiallisista ominaisuuksista, mutta myös niiden saatavuudesta sekä hinnasta. Jäähdytyksessä käytettävällä adsorbaatilla tulisi olla seuraavat ominaisuudet (Alghoul et al. 2007, 225):

- alle 0 °C höyrystymislämpötila (jolloin voidaan tuottaa esimerkiksi jäätä)
- pieni molekyylikoko, mikä mahdollistaa sen adsorboitumisen adsorbenttiin
- korkea höyrystymislämpö ja pieni ominaistilavuus
- termisesti stabiili adsorbentin kanssa toiminta-alueen lämpötiloissa
- myrkytön, korroosiota aiheuttamaton ja palamaton
- matala kyllästymispaine tavallisessa toimintalämpötilassa

Metanolilla sekä vedellä on adsorptiojäähdyttimen toimintalämpötiloissa alle ilmapaineinen kyllästymispaine, minkä takia ne ovat suotuisia vaihtoehtoja. Molemmilla aineilla on suhteellisen korkea latentti lämpö, metanolilla 1,16 kJ/kg ja vedellä 2,26 kJ/kg. Vesi on näistä kahdesta aineesta termisesti stabiilimpi sopivien adsorbenttien kanssa. Vettä ei kuitenkaan voida käyttää jäädystarkoituksiin, sillä sen jäätymispiste on 0 °C. (Alghoul et al. 2007, 225-226).

Adsorbentin valintaan vaikuttavia asioita ovat (Alghoul et al. 2007, 225):

- kyky adsoroida suuria määriä adsorbaattia matalassa lämpötilassa

- kyky desorptoida suurin osa adsorbaatista lämmön vaikutuksesta
- ei adsorptiokyvyn heikkenemistä ajan tai käytön seurauksesta
- myrkytön ja korroosiota aiheuttamaton
- helppo saatavuus ja pienet kustannukset

Adsorbentti-adsorbantti pari on tärkeä osa adsorptiojäähdytysprosessia. Aineparin valinta jäähdytystarvetta varten riippuu sen ominaisuuksista. Näitä ominaisuuksia ovat esimerkiksi niiden termodynaamiset, kemialliset ja fysikaaliset ominaisuudet. Lisäksi laitteessa käytettävien aineiden hinta ja saatavuus vaikuttavat valintaan. (Askalany et al. 2013, 566.)

Seuraavissa luvuissa esitellään adsorptiojäähdytyksessä käytettäviä ainepareja. Eri tutkimusten pohjalta esitetään myös eri ainepareilla saavutettuja COP-lukuja sekä pienintä mahdollista höyrystymislämpötilaa.

Taulukossa 12 on esitetty adsorptiojäähdytyksessä yleisimmin käytettyjen jäähdytysaineiden fysikaalisia ominaisuuksia. Lukuarvoista voidaan huomata muun muassa se, että veden ominaishöyrystymislämpö on suurin, eli höyrystyessään se sitoo eniten lämpöä.

Taulukko 12. Yleisimpien adsorptiojäähdytyksessä käytettävien kylmäaineiden ominaisuuksia (Wang et al. 2009, 522).

Jäähdytysaine	Kiehumispiste ilmanpaineessa [°C]	Moolimassa [g/mol]	Ominaishöyrystymislämpö [kJ/kg]	Tiheys [kg/m ³]	$\rho \times L$ [MJ/m ³]
Ammoniakki	-34	17	1368	681	932
Vesi	100	18	2258	958	2163
Metanoli	65	32	1102	791	872
Etanoli	79	46	842	789	665

Ammoniakilla, metanolilla ja etanolilla on kaikilla vettä pienempi ominaishöyrystymislämpö, mutta toisaalta niiden kiehumispiste ilmanpaineessa on vettä matalampi. Niiden käyttöön voisi siis soveltua melko matalalämpötilaiset energianlähteetkin. Vedellä on kuitenkin selkeästi paras kyky sitoa energiaa. Siihen voi sitoutua jopa kaksi kertaa enemmän energiaa tilavuutta kohti kuin seuraavaksi parhaaseen ammoniakkiin.

4.5.3.1 Aktiivihiili-ammoniakki

Aktiivihiili valmistetaan pyrolysoimalla ja hiililyttämällä lähdeaineita kuten kivihiiltä ruskohiiltä, puuta tai synteettisiä polymeererejä korkeissa (700–800 °C) lämpötiloissa. Aktiivihiiltä on saatavissa useissa eri muodoissa kuten pölynä, mikrohuokoisena, rakeina tai kuituina. Ammoniakilla on suhteellisen korkea latentti lämpö: 1365 kJ/kg -30 °C:ssa. Aktiivihiileen sen suurin mahdollinen adsorptio on 0,29 grammaa aktiivihiiliagrammaa kohti. Ammoniakin haittapuolena on kuitenkin sen myrkyllisyys ja korrosiivisuus. Aktiivihiili-ammoniakki aineparin adsorptiossa vapautuva lämpö on noin 2000–2700 kJ/kg. (Askalany et al. 2013, 566.)

Eräässä tutkimuksessa tutkittiin adsorptiojäähdytintä, joka käytti aineparina monoliittista hiiltä ja ammoniakia. Tulosten perusteella suurin ominaisjäähdytysteho oli 60 W/kg ja suurin kylmäkerroin 0,12. Toisessa tutkimuksessa selvitettiin myös hiilen ja ammoniakin käyttöä jäähdytystarkoituksiin. Simulaatio oli tehty 26 erilaisella aktiivihiili-ammoniakki aineparilla ja kolmella erilaisella adsorptiokierrolla. Lämmönlähteet olivat 80–200 °C lämpötilassa. Ilmastointisovelluksessa saavutettiin kylmäkertoimeksi jopa 0,61, kun kaksivaiheisessa laitteessa käytettiin monoliittista hiiltä ja 100 °C lämmönlähdettä laitteen ajamiseen. Muita saavutettuja tuloksia olivat COP 0,35 ja ominaisjäähdytysteho 2000 W/kg käyttämällä 200 °C lämmönlähdettä. Yhden syklin pituus oli tällöin pienimmillään 1200 sekuntia. (Askalany et al. 2013, 566.)

4.5.3.2 Aktiivihiili-metanoli

Aktiivihiili-metanoli on yksi yleisimmistä ainepareista johtuen suuresta adsorption määrästä. Lisäksi sillä on matala adsorptiolämpö, noin 1800–2000 kJ/kg. Metanolin suurin adsorptiomäärä aktiivihiileen on 0,45 grammaa aktiivihiiliagrammaa kohden. Latentti lämpö -30 °C:ssa on 1229 kJ/kg. Metanoli kuitenkin hajoaa 120 °C:ssa ja alumiiniseoksilla todettiin olevan suurempi katalyyttinen vaikutus hajoamiseen kuin kuparilla. (Askalany et al. 2013, 566.)

Eräässä tutkimuksessa selvitettiin metanolin adsorpoitumista hiilipohjaisiin adsorbentteihin. Höyrystimen lämpötilan ollessa 15 °C, Maxsorb III -tyyppinen aktiivihiili pystyi adsorboimaan 1,2 grammaa metanolia hiiliagrammaa kohden 160 minuutissa. Korkein

saavutettu kylmäkerroin oli 0,78, kun käytetyn veden lämpötila oli 90 °C. (Askalany et al. 2013, 567.)

4.5.3.3 Aktiivihiili-etanoli

Jäähdytystä käyttäen aktiivihiili-etanoli aineparia on tutkittu useiden eri ihmisten toimesta. Yhdessä tutkimuksessa käytettiin Maxsorb III –tyyppistä aktiivihiiltä adsorbenttina. Sen adsorptiokyky oli etanolin kanssa sama kuin metanolia käytettäessä, eli 1,2 g/g adsorptiolämpötilojen ollessa 20–60 °C. Prosessia ajava lämpötila oli 80 °C. Järjestelmän kylmäkerroin oli 0,8, kun höyrystymislämpötila oli 15 °C. Toisessa tutkimuksessa saatiin 60–95 °C ajavilla lämpötiloilla kylmäkertoimeksi 0,6 yhden jäähdytysyökin pituuden ollessa 600–700 sekuntia. (Askalany et al. 2013, 567.)

4.5.3.4 Silikageeli-vesi

Silikageeli on amorfista synteettistä piitä (Askalany et al. 2013, 567). Wang et al. mukaan silikageeli-vesi aineparilla on haittana se, että vettä adsorboituu vain 0,2 grammaa silikageeligrammaa kohden. Toisena heikkoutena pidetään sitä, että alle 0 °C höyrystymislämpötiloja ei voida tuottaa veden jääytymisen takia. (Wang et al. 2009, 525.)

Silikageeli-vesi aineparin adsorptiolämpö on noin 2500 kJ/kg. Desorptiolämpötila voi olla hyvinkin alhainen, mutta sen on oltava kuitenkin yli 50 °C. Desorptiolämpötila ei voi olla korkeampi kuin 120 °C ja yleensä se on alle 90 °C. Japanilaiset tutkijat ovat kehittäneet kolmivaiheisen silikageeli-vesi adsorptiojärjestelmän, jota voidaan käyttää jopa 50 °C lämpötiloilla. Shangain Jia Tong yliopistossa on kehitetty adsorptiojäähdytyslaite, jota pystyttiin käyttämään 55 °C lämpötilalla. Näin matalat desorptiolämpötilat mahdollistavat myös aurinkolämmön hyödyntämisen jäähdytyksessä. (Wang et al. 2009, 525.) Eri valmistajien tietojen perusteella silikageeli-vesi on eniten kaupallisesti käytetty adsorptiojäähdyttimien ainepari.

4.5.3.5 Zeoliitti-vesi

Zeoliitit ovat alumiinisilikaateista koostuvia huokoisia mineraaleja. Keinotekoisesti syntetisoidut zeoliitit ovat luonnollisia zeoliitteja kalliimpia, mutta niillä on korkeampi

ominaispaino ja parempi lämmönsiirtokyky. Adsorptiokyky on verrannollinen zeoliitissa olevan piin ja alumiinin väliseen suhteeseen. Mitä pienempi niiden suhde on, sen parempi on adsorptiokyky. Adsorptio- ja desorptiolämpö zeoliiteille on korkea. Desorptiolämpötila on noin 250-300 °C. Zeoliitteja käytetään yleensä adsorptiojäähdytyssovelluksissa, joiden lämmönlähteen lämpötila on 200 °C ja 300 °C välillä. (Wang et al. 2009, 521.)

Zeoliitti-vesi aineparia voidaan käyttää kosteutta poistavassa jäähdytysjärjestelmässä sekä adsorptiojäähdyttimissä. Adsorptiolämpö on noin 3300–4200 kJ/kg. Haittana on kuten silikageeli-vesi aineparin tapauksessa, että alle 0 °C höyrystymislämpötiloja ei voida saavuttaa. (Wang et al. 2009, 525.) Käyttö kaukolämpöverkon yhteydessä ei korkeasta lämpötilavaatimuksesta johtuen onnistu.

4.5.4 Adsorptiojäähdyttimen käytön etuja ja haittoja

Adsorptiojäähdyttimien käytöllä voidaan saavuttaa merkittäviä etuja perinteisiin koneellisiin jäähdytyslaitteistoihin nähden. Adsorptiojäähdyttimien käyttövoimaksi riittävät matalien lämpötilatasojen energialähteet. Ympäristön kannalta kenties tärkein asia on se, että voidaan välttää perinteisten CFC-yhdisteiden käyttö kylmäaineena. Käytettävillä kylmäaineilla ei ole lainkaan otsonia tuhoavaa tai ilmastonmuutosta edistävää vaikutusta (Wang et al. 2009, 519.) Adsorptiojäähdyttimessä kylmäaineena voi toimia esimerkiksi vesi. Lisäksi käyttämällä yhteistuotannon lämpöä, voidaan Freyn ja Göbelin mukaan selvittää vain 17 % primäärienergialla verrattuna perinteisiin sähköllä toimiviin kylmäkoneisiin. (Frey & Göbel 1996, 218.)

Muiden muassa Demir et al. (2008, 2386–2387) ovat listanneet adsorptiojäähdyttimen tärkeitä etuja ja haittoja.

Etuja:

- käyttövoimana toimivat lämmönlähteet kuten esimerkiksi jätelämpö, aurinkolämpö ja geoterminen energia
- lämmönlähteen lämpötila voi olla melko matala
- pitkä käyttöikä

- toimivat äänettömästi ja ilman värinää
- yksinkertainen toimintaperiaate
- eivät tarvitse usein tapahtuvaa huoltoa
- ympäristöystävällisiä, sillä ne eivät sisällä ympäristölle haitallisia aineita

Haittoja:

- matalat COP-arvot
- jaksoittainen toiminta
- vaativat korkeaa tekniikkaa ja erikoissuunnittelua lähes tyhjiön aikaansaamiseksi laitteeseen
- ovat tilavuudeltaan suuria ja raskaita verrattuna perinteisiin mekaanisiin laitteisiin

Yhtenä haittana etenkin kaukolämmön kanssa käytettäessä on valmistajien ilmoittamat tiedot laitteen kuuman veden jäähdytyksestä. Jäähdytystä on mahdollista parantaa, mutta toisaalta tällöin keskimääräinen lämmöntuontilämpötila laskee ja laitteen suorituskyky heikkenee. Vaikka itse adsorptiojäähdytin ei käytä merkittävästi sähköä, kuluttavat siihen liitettävät jäähdytystornit sähköenergiaa.

4.6 Jäähdytyslaitoksen lauhdutus

Adsorptiojäähdytin sekä sähkötoimiset kompressorijäähdyttimet tarvitsevat ulkoista jäähdytystä lauhduttimessa. Lauhdutusta tarvitaan, jotta kiertoaine saadaan kaasumaisesta olomuodosta takaisin nesteeksi ja jotta sen lämpötilaa saadaan laskettua. Lauhdutus toteutetaan kierrättämällä jäähdytysnestettä lauhduttimessa. Kylmälaitoksen lauhdustarve on mahdollista laskea yhtälöstä (6) (Hakala & Kaappola 2007, 71).

$$Q_l = Q_j + W_k \quad (6)$$

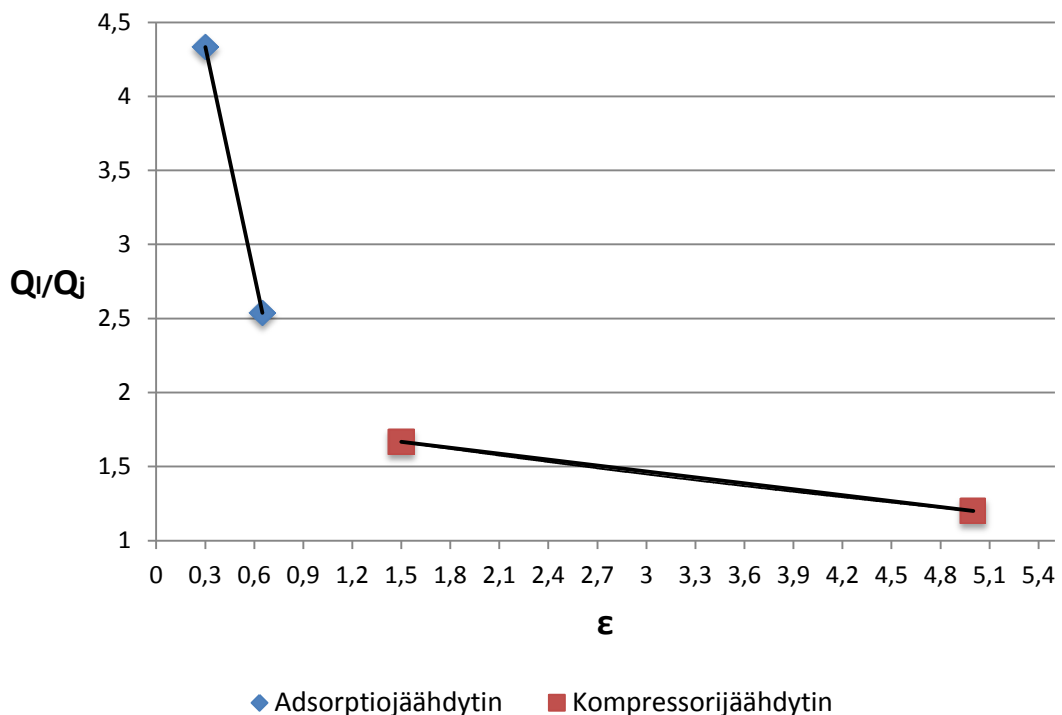
missä	Q_l	lauhdutustarve	[J]
	Q_j	jäähdytysenergia	[J]
	W_k	kompressorin sähköenergia	[J]

Lauhdutustarve voidaan vastaavasti esittää yhtälön (7) muodossa, jolloin se pätee myös adsorptiojäähdyttimelle.

$$Q_l = Q_j + \frac{Q_j}{\varepsilon} \quad (7)$$

missä ε kylmäkerroin [-]

Oheisessa esimerkissä lasketaan tarvittavat lauhdutusenergiantarpeet tuotettua jäähdytysenergiaa kohden eri tapauksissa. Esitysmuoto on saatu aikaiseksi jakamalla yhtälön (6) vasen puoli jäähdytysenergialla Q_j . Käytetään adsorptiojäähdyttimelle Demir et al. (2008, 2388) ilmoittamia ääripäitä 0,3–0,65 ja kompressorijäähdyttimelle Oinosen & Soimakallion (2001, 31) esittämien tyypillisten kylmäkertoimien ääripäitä 1,5–5. Tulokset on esitetty kuvassa 18.



Kuva 18. Kylmäkertoimen vaikutus kylmäkoneen lauhdutustarpeeseen.

Adsorptiojäähdyttimen lauhdutustarve mainittujen kylmäkertoimien rajoissa on 2,5–4,3 kertainen ja kompressorijäähdyttimen 1,2–1,7 kertainen jäähdytystehoon nähden. Adsorptiojäähdytin tarvitsee siis pienellä kylmäkertoimella toimiessaan jopa 4,3 MW

lauhdutustehoa 1 MW jäähdytystehoa kohden. Kuvasta nähdään myös, että adsorptiojäähdytin tarvitsee huomattavasti enemmän lauhdutustehoa kompressorijäähdyttiin nähden ja lauhdutustehon tarve kasvaa voimakkaammin toimintaolosuhteiden muuttuessa huonommiksi.

Lauhduttimen jäähdytys on mahdollista toteuttaa luonnollisista lähteistä kuten merestä tai järvestä jos ne ovat riittävän lähellä jäähdytyslaitosta. Jäähdytyspiiri ja luonnonvesikierto erotetaan lämmönsiirtimellä. Mikäli luonnollista jäähdytystä ei ole käytettävissä, on käytettävä esimerkiksi ilmajäähdytteistä nestejäähdytintä tai jäähdytystornia. Pienitehoisten kompressorijäähdyttimien tapauksessa voidaan pärjätä ilmajäähdytyksellä (Energiateollisuus ry 2006, 533), mutta adsorptiojäähdyttimet tarvitsevat usein jäähdytystornin sillä niistä poistettavan lämmön määrä on huomattavasti suurempi.

Jäähdytystornissa vettä jäähdytetään haihduttamalla siitä osa ilmaan. Haihduttaminen tapahtuu mahdollisimman suurella kosketuspinnalla veden ja ilman välillä. Vesi valuteetaan täyhteelle, joka on esimerkiksi metallikennosto. Ilmaa puhalletaan joko veden virtaussuuntaa vastaan tai poikittain. Jäähdytys perustuu veden haihtumisenergiaan ja sitä tehostetaan puhaltimilla. Jäähdytystornista saatavaa jäähdytystehoa säädetään ilma- sekä vesimäärällä. Vesimääräsäädössä osa vedestä kierrätetään jäähdytystornin ohi. Ilmamääräsäätö toteutetaan puhaltimilla portaittaisena tai jatkuvana kierroslukusäätönä. (Aittomäki 2008, 210–211, 214.) Jäähdytystornissa on osa käytettävästä kiertovedestä korvattava. Korvaustarve johtuu jäähdytyksessä tapahtuvasta haihtumisesta. Veden korvaus on myös tehtävä, jotta epäpuhtaudet eivät pääse rikastumaan kiertoveteen. Haihtumishäviö on tyypillisesti noin 0,05 % kiertoveden massavirrasta. (ViFlow 2013, 3.)

Jäähdytystornien sähkönkulutusta on mahdollista arvioida yhtälöllä (8). Yhtälö on laadittu valmistajilta saatujen lauhdutustehojen ja niitä vastaavien sähkötehojen perusteella.

$$P = 0,0271\Phi_l + 0,4392 \quad (8)$$

missä	P	jäähdytystornin sähköteho	[W]
	Φ_l	jäähdytystornin lauhdutusteho	[W]

Nesteiden ilmajäähdytyksessä neste virtaa putkissa ja ilma lamellikennoissa. Veden jäähtyminen perustuu ilman lämpenemiseen, mistä syystä veden lämpötilaa ei voida jäädyttää ympäröivän ilman lämpötilan alapuolelle. Tyypillisesti veden ja ilman lämpötilaero on 5 °C. Ilmajäähdytyksen etu on se, että sitä voidaan käyttää sielläkin, missä vettä ei ole saatavilla tai sen käytöstä aiheutuisi korkeat kustannukset. Siitä ei myöskään muodostu näkyviä höyrypilviä (ViFlow 2013, 7.)

4.7 Kaukojäähdytyksen jakelu

Kaukojäähdytysenergia jaetaan rakennuksiin putkea pitkin kylmän veden avulla. Rakennuksessa kaukojäähdytysveteen siirtyy lämmönsiirtimen välityksellä rakennuksesta poistettavaa lämpöä, jonka jälkeen kaukojäähdytysvesi johdetaan paluuputkea pitkin uudelleen jäähdytettäväksi.

Kaukojäähdytysputkina voidaan käyttää esimerkiksi teräs-, muovi- ja lasikuituputkia. Veden matalan lämpötilan vuoksi ilman tai maaperän kosteus voi tiivistyä putken pinnalle ja aiheuttaa korroosiota. Putkia ei voida kostumisvaaran vuoksi eristää villalla. Maan alle rakennettaessa käytetään usein kiinnivaahdotettuja kaukolämpöputkia. Maaperän ja putken pienen lämpötilaeron vuoksi ei tarvita yhtä paksua eristekerrosta kuin kaukolämpöputkissa. Paluuputki voi olla myös eristämätön, mutta tällöin se täytyy pinnoittaa muovilla, jotta kosteus ei pääse metallipinnalle. Vapaasti ulkoilmassa oleva putki on eristettävä ja suojattava kosteudelta. Tunneleissa ja parkkitiloissa sijaitsevat putket voivat olla maakaasun kuljetukseenkin käytettävää teräsputkea, jonka pinnassa on 10–20 millimetrin muovikerros. Jäähdytysverkon rakentamiskustannukset ovat suuruusluokaltaan samoja kuin kaukolämpöverkon. Rakentaminen on kuitenkin nopeampaa, sillä putkien esilämmitystä ei tarvita. (Energiateollisuus ry 2006, 541.)

Kaukojäähdytyksen jakeluun tarvittava pumppausteho voidaan laskea yhtälöstä (9) (Energiateollisuus ry 2006, 170).

$$P = \frac{\dot{m}\Delta p}{\rho\eta} \quad (9)$$

missä	P	sähköteho	[W]
	\dot{m}	massavirta	[kg/s]
	Δp	paine-ero	[Pa]
	ρ	pumpattavan aineen tiheys	[kg/m ³]
	η	pumpun hyötysuhde (0,7-0,9)	[-]

Taulukossa 13 on esitetty kaukojäähdytysputkien maksimivirtauksia ja tehoja painehäviöllä 100 Pa/m. Näitä tietoja voidaan käyttää kaukojäähdytysverkon yleissuunnittelussa.

Taulukko 13. Kaukojäähdytysputkien maksimivirtauksia ja tehoja, kun mitoitusperusteena on käytetty putken painehäviötä 100 Pa/m (Suomen Kaukolämpö ry 2004, 9).

Putkikoko (DN)	Maksimi massavirta [kg/s]	Kaukojäähdytysteho [kW] ($\Delta T=8^{\circ}\text{C}$)
100	11	370
200	61	2040
300	172	5760
400	306	10200
500	583	19500
600	917	30650

Kaukojäähdytyksessä meno- ja paluueden lämpötila on vain noin viidesosan siitä mitä se on kaukolämmityksessä. Eroosiovaaran vuoksi kylmän veden virtausnopeus tulisi rajoittaa noin puoleen siitä mitä se on kaukolämpöverkossa. Karkeasti voidaan arvioida, että kaukojäähdytysputkella saadaan siirrettyä noin kuudesosa tehoa siitä mitä samankokoisella kaukolämpöputkella saataisiin siirrettyä. (Energiateollisuus ry 2006, 541.)

5 KANNATTAVUUSVERTAILU

Kannattavuustarkastelua varten laadittiin työkalu, jonka avulla voidaan selvittää toiminnan kannattavuutta niin asiakkaille kuin Vantaan Energialle. Tarkasteltaviksi esimerkiksi valittiin Vantaan Energian toimitalon kiinteistökohtainen jäähdytys sekä kaksi aluejäähdytyskohdetta. Jäähdytystehon ja jäähdytysenergian tarpeen arvioinnissa sovelletaan tässä työssä aiemmin esitettyjä lukemia sekä kiinteistökohtaisia tietoja.

Laskentakorkona käytetään 7 % ja pitoaikana 25 vuotta. Adsorptiojäähdyttimen vuotuisena kylmäkertoimena käytetään 0,5 ja kompressorijäähdyttimien vuotuisena kylmäkertoimena 2,5 (Ympäristöministeriö 2012, 60).

5.1 Tarkasteltavat kohteet

Aluejäähdytyksen tarkasteltavat kohteet ovat valikoituneet arvioimalla, missä saavutettaisiin tarpeeksi suuri tehotiheys. Vantaalta löytyy lukuisia muitakin alueita ja rakennusryhmiä, joita olisi voitu tarkastella. Energiankulutukset perustuvat huipunkäyttöaikojen ja tehontarpeiden perusteella laskettuihin arvioihin, sillä tarkkoja tietoja ei ollut saatavilla. Kohteille lasketaan myös tehontarve, kun risteily otetaan huomioon. Tarkempien tietojen puuttuessa voidaan käyttää samanaikaisuuskertoimen 0,9, jolloin todellisen tehontarpeen epävarmuudesta ei aiheudu haittaa tuloksiin. Risteilyn laskemista on käsitelty luvussa 2.3.

Kaikissa tarkasteluissa huipputehon tarve on mahdollista kattaa kylmävarastosta otettavalla energialla. Kylmävarastoa ladataan esimerkiksi yöllä, kun jäähdytysenergian tarve on vähäisintä. Kappaleessa 3.3 on mainittu, että kylmäakun mitoitusperusteena voi pitää suurin piirtein kolmasosaa tuotantotehosta ja kylmäkoneen kahta kolmasosaa. Tällöin kylmäkoneilla saadaan tuotettua suoraan noin 80 % ja varastolla noin 20 % jäähdytysenergian tarpeesta. Rakennusten tiedot on saatu Vantaan kaupungin karttajärjestelmästä.

5.1.1 Vantaan Energian toimitalo

Vantaan Energian toimitalon jäähdytykseen käytetään kahta kompressorijäähdytintä. Niistä uudemman jäähdytys- ja sähkötehot ovat 161 kW ja 41 kW. Vanhemman laitteen jäähdytystehosta ei saatu selvyyttä, sillä tieto puuttui laitekilvestä. Sen sähköteho on 45 kW. Kun oletetaan, että sen kylmäkerroin on sama kuin uudemmankin laitteen, saadaan jäähdytystehoksi noin 177 kW. Kiinteistön kokonaisjäähdytysteho on siis noin 338 kW. Taulukossa 14 on toimitalon tietoja. Huipunkäyttöaikana on käytetty 750 tuntia. Kiinteistön ominaistehoksi saadaan laskemalla 12 W/m^3 .

Taulukko 14. Vantaan Energian toimitalon perustietoja.

Kerrosala [m ²]	Rakennustila- vuus [m ³]	Jäähdytysteho [kW]	Jäähdytysener- gian kulutus [MWh]	Huipunkäyttö- aika [h]
6403	28939	338	254	750

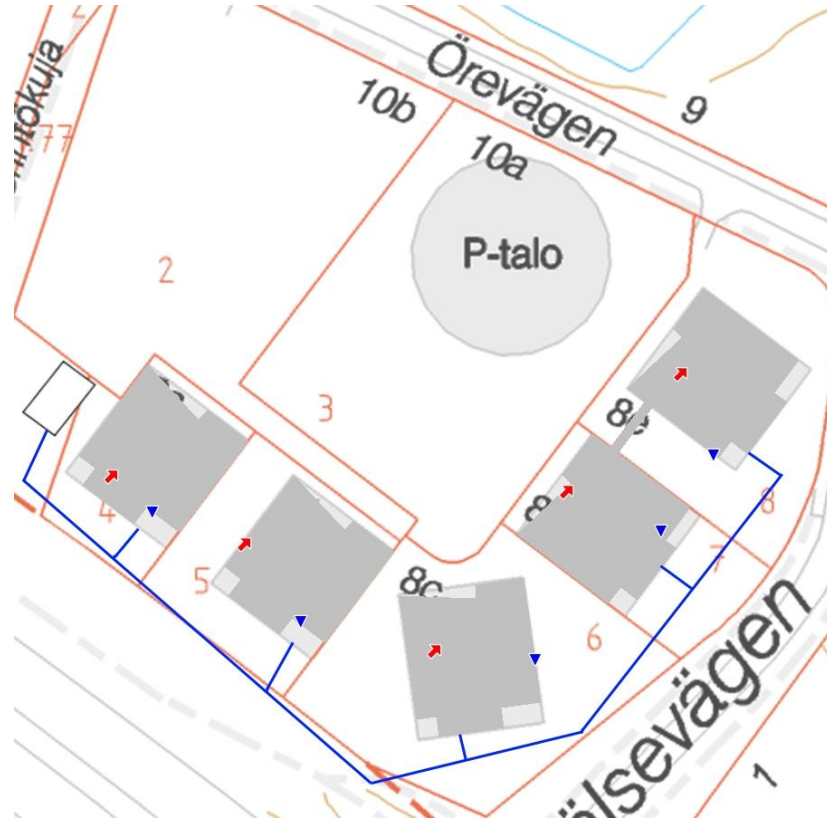
Jäähdytysteholtaan 338 kW adsorptiojäähdytin tarvitsee 1014 kW tehoisen jäähdytystornin. Kiinteistökohtaisessa jäähdytyksessäkin on mahdollista käyttää kylmäakkua, jolloin itse jäähdytintä ei tarvitse mitoittaa huipputehon mukaan ja se toimii suuremman osan ajasta paremman hyötysuhteen alueella.

Vantaan Energian toimitalon tarvittava jäähdytysteho on noin 338 kW ja tästä voitaisiin kylmäakulla kattaa noin kolmasosa eli 112 kW. Kylmäakun energianvarastointikapasiteetti $11,7 \text{ kWh/m}^3$ on esitelty tyypillisessä tilanteessa aiemmassa luvussa. Tällöin tarvittaisiin karkeasti arvioituna noin 30 m^3 kylmäakku, jotta siitä saataisiin kolmen huipputunnin ajan 112 kW teho.

5.1.2 Äyritie 8

Äyritie 8 koostuu viidestä eri toimistorakennuksesta. Rakennukset valittiin erilliseen tarkasteluun, sillä tässä tarkastelussa selvitetään melko pienellä kaukojäähdytysverkolla, joka laskee investointikustannuksia. Lisäksi laiteinvestoinnit ovat merkittävästi pienemmät. Laskennassa on käytetty jäähdytystehontarpeena 20 W/m^3 ja kaikkien rakennusten huipunkäyttöaikoina 750 tuntia.

Kuvassa 19 on esitetty tarkasteltavat kohteet kartalla.



Kuva 19. Äyritie 8:n rakennukset a-e.

Taulukoissa 15 ja 16 on esitetty rakennusten tietoja.

Taulukko 15. Rakennusten perustietoja.

Osoite	Rakennustyyppi	Rakennustilavuus [m ³]	Kerrosala [m ²]
Äyritie 8 a	Toimistorakennus	23983	5708
Äyritie 8 b	Toimistorakennus	24163	5748
Äyritie 8 c	Toimistorakennus	29694	6432
Äyritie 8 d	Toimistorakennus	24800	5846
Äyritie 8 e	Toimistorakennus	26290	6260

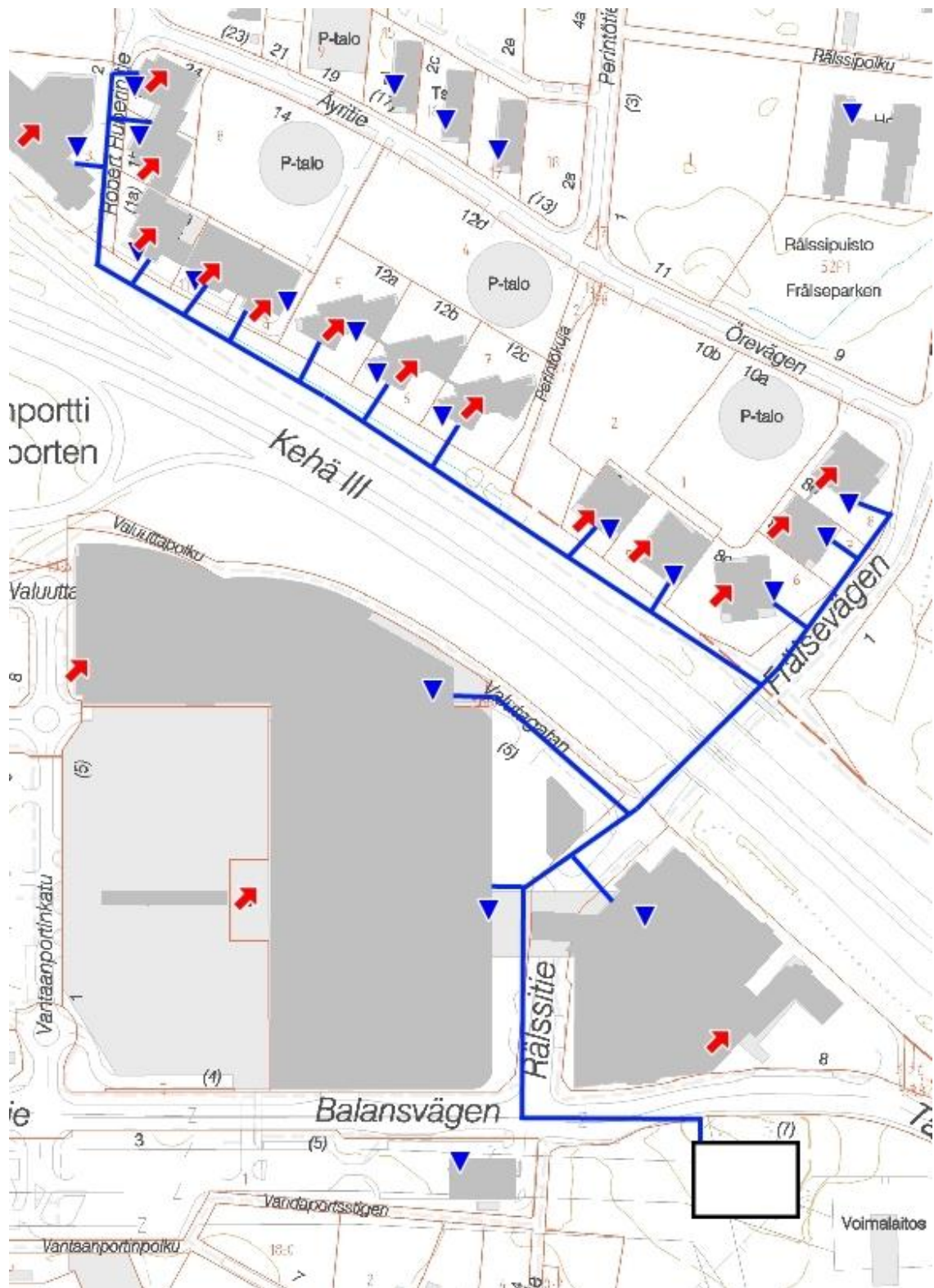
Taulukko 16. Rakennusten arvioituja tehontarpeita ja energiankulutuksia.

Osoite	Huipputehontarve [kW]		Huipunkäyttöaika [h]	Energiankulutus [MWh]
	min	max		
Äyritie 8 a	360	480	750	360
Äyritie 8 b	362	483	750	362,25
Äyritie 8 c	445	594	750	445,5
Äyritie 8 d	372	496	750	372
Äyritie 8 e	394	526	750	394,5
Yhteensä	1934	2579		1934,25

Huomioimalla jäähdytyksen eriaikaisuus eli risteily sekä kylmäakusta saatava teho, saadaan Äyritie 8 erillistarkastelun huipputehontarpeeksi noin 1700 kW, jota voidaan käyttää putkiston mitoituksessa. Kolmen tunnin huipputehon aikana käytettävän kylmäakun tilavuudeksi tulee noin 150 m³.

5.1.3 Jumbon lähialue

Kuvassa 20 on tarkasteltavat kohteet kartalla. Punaiset nuolet kuvaavat tarkasteluun valittuja rakennuksia. Siniset kolmiot kuvaavat Vantaan Energian kaukolämpöasiakkaita. Yleissuunnitelma aluejäähdytyksen putkireiteistä on piirretty kuvaan sinisin viivoin.



Kuva 20. Suuremman aluejäähdytystarkastelun kohteet.

Taulukossa 17 on tarkasteluun valitut kohteet ja niiden tiedot.

Taulukko 17. Rakennusten perustietoja

Osoite	Rakennustyyppi	Rakennustilavuus [m ³]	Kerrosala [m ²]
Vantaanportinkatu 7	Tavaratalo tai kaup- pakeskus	270262	58399
Vantaanportinkatu 3	Tavaratalo tai kaup- pakeskus	486748	73557
Tasetie 8	Muu rakennus	384500	51897
Äyritie 8 e	Toimistorakennus	26290	6260
Äyritie 8 d	Toimistorakennus	24800	5846
Äyritie 8 c	Toimistorakennus	29694	6432
Äyritie 8 b	Toimistorakennus	24163	5748
Äyritie 8 a	Toimistorakennus	23983	5708
Äyritie 12 c	Toimistorakennus	28000	7200
Äyritie 12 b	Toimistorakennus	28100	7200
Äyritie 12 a	Toimistorakennus	28000	7200
Äyritie 24	Toimistorakennus	32168	6001
Äyritie 22	Toimistorakennus	30059	6092
Äyritie 20	Toimistorakennus	36627	7613
Äyritie 18	Toimistorakennus	32704	6657
Äyritie 16	Toimistorakennus	27874	5343
Robert Huberin tie 2	Toimistorakennus	30850	5936

Rakennusten tiedoista nähdään, että kolme kohdetta poikkeaa selvästi kaikista muista kohteista. Vantaanportinkatu 3 ja 7 ovat Jumbon vanha ja uudempi puoli ja Tasetie 8 Jumbon yhteyteen rakennettu viihdekeskus Flamingo, jossa on muun muassa hotelli ja kylpylä. Muut kohteet ovat kooltaan käytännössä samankokoisia Vantaan Energian toimitalon kanssa.

Taulukossa 18 on esitetty valittujen rakennusten energiankulutukseen liittyviä arvioita.

Taulukko 18. Rakennusten arvioituja tehontarpeita ja energiankulutuksia.

Osoite	Huipputehontarve [kW]		Huipunkäyttöaika [h]	Energiankulutus [MWh]
	min	max		
Vantaanportinkatu 7	4860	5410	1100	5951
Vantaanportinkatu 3	8760	9730	1100	10703
Tasetie 8	5800	7690	750	5768
Äyritie 8 e	390	530	750	398
Äyritie 8 d	370	500	750	375
Äyritie 8 c	450	590	750	443
Äyritie 8 b	360	480	750	360
Äyritie 8 a	360	480	750	360
Äyritie 12 c	420	560	750	420
Äyritie 12 b	420	560	750	420
Äyritie 12 a	420	560	750	420
Äyritie 24	480	640	750	480
Äyritie 22	450	600	750	450
Äyritie 20	550	730	750	547,5
Äyritie 18	490	650	750	487,5
Äyritie 16	420	560	750	420
Robert Huberin tie 2	460	620	750	465
Yhteensä	25460	30890		5951

Kun otetaan huomioon risteilykerroin ja kylmäakusta saatava teho, saadaan käyttämällä yhteenlaskettua huipputehoa 30890 kW koko asiakasryhmän huipputehontarpeeksi noin 18340 kW. Tätä tehoa voidaan käyttää verkon mitoitustehona. Tarvittavan adsorptiojäähdytin lauhdutusteho on noin 55 MW. Kolmen tunnin huipputehon aikana käytettävän kylmäakun tilavuudeksi tulee noin 1550 m³.

5.2 Hintatietoja

Tässä kappaleessa esitellään kaikki kannattavuuslaskelmiin vaikuttavat hinnat. Niitä ovat itse jäädytykseen liittyvien laitteiden eli jäähdyttimien ja jäähdystornien hinnat, kaukojäähdytysputkiston hinnat sekä energian hinnat.

5.2.1 Laitteisto

Jäähdytys- ja lauhdutuslaitteistojen hintatiedot perustuvat valmistajilta saatuihin tietoihin. Tiedot ovat salaisia, joten valmistaja- ja mallikohtaisia tietoja ei esitetä. Jäähdytys-

tornien hinnat arvioidaan taulukon ylittävien tehojen osalta. Taulukossa 19 on ruuvi-kompressorijäähdyttimien hintoja eri teholuokissa tehoyksikköä kohden. Taulukossa 20 on ilmajäähdytteisten lauhduttimien ja jäähdytystornien hintatietoja.

Taulukko 19. Ruuvikompressorijäähdyttimien hintatietoja.

Jäähdytysteho [kW]	Kustannus tehoyksikköä kohden [€/kW]
500	149,2
580	137,4
740	126,3
790	126,0
1040	126,4
1160	125,3
1320	124,7
1450	123,5
1630	120,9
1760	121,0

Taulukko 20. Ilmajäähdytteisten lauhduttimien ja jäähdytystornien hintatietoja.

Lauhdutusteho [kW]	Ilmajäähdytteinen lauhdutin [€/kW]	Jäähdytystorni [€/kW]
100	114,8	132,1
250	82,3	94,6
500	61,2	70,4
1000	38,3	44,0
1200	24,9	28,6
1500	23,0	26,4
2000	19,1	22,0

Adsorptiojäähdyttimien hintatietojen hankintaa hankaloitti muun muassa valmistajien vähäinen määrä. Suomalaisia maahantuojia ei ole. Yhdeltä valmistajalta saatiin kustannusarvio 600 kW adsorptiojäähdyttimelle. Laitteen ominaishinta tällä teholla on noin 389 €/kW. Kyseinen malli vaikuttaa olevan samalla suuritehoisin adsorptiojäähdytin mitä valmistetaan. Kylmäakkujen hinta on noin 1000 m³ kokoluokassa 200 €/m³. Tässä työssä näitä hintoja käytetään myös kyseisestä teholuokasta poikkeaville tehoille paremman tiedon puutteessa.

5.2.2 Kaukojäähdytysputkisto

Kaukojäähdytysputkien kustannukset muodostuvat maarakennus-, materiaali-, putki- ja liitostyökustannuksista. Kaukojäähdytyksessä voidaan käyttää kaukolämpöputkia, jolloin niiden kustannukset vastaavat kaukojäähdytysputkien rakentamisesta aiheutuvia kustannuksia. Taulukossa 21 on esitetty erikokoisten kiinnivaahdotettujen yksiputkisten kaukolämpöjohtojen keskimääräiset kokonaiskustannukset vuosina 2009–2011. Kustannuksiin sisältyy meno- ja paluuputki.

Taulukko 21. Kaukolämpöjohtojen (2Mpuk) keskimääräisiä verottomia kokonaiskustannuksia (Kaukolämpöekstra 2013).

DN-koko	Kustannukset keskimäärin eri vuosina [€/m]			Keskiarvo [€/m]
	2011	2010	2009	
40	173	181	166	173
50	160	178	183	174
65	190	209	191	197
80	196	178	179	184
100	249	240	241	243
125	254	264	235	251
150	274	279	300	284
200	332	319	324	325
250	406	427	367	400
300	569	429	398	465
400	782	711	646	713
500	642	853	1165	887
600		1944	1229	1587

5.2.3 Energian hinnat

Laskennassa käytetään kaukolämmön omakustannehintana 0 €/MWh, sillä jatkossa kesäaikana on käytettävissä runsaasti ylimääräistä lämpöä, eikä polttoaineiden hankinnasta aiheudu kustannuksia. Asiakkaan jäähdytysenergiasta maksamaa hintaa hahmotellaan myöhempänä.

Sähkön hintana käytetään Vantaan Energian yleissähkön hintaa. Taulukossa 22 on esitetty laskennassa käytetyt sähkön myynti- ja siirtohinnot sekä sähkövero.

Taulukko 22. Vantaan Energian yleissähkön hinnat 24.9.2013 (Vantaan Energia 2013).

	Hinta [€/MWh] (alv 0 %)	Hinta [€/MWh] (alv 24%)
Sähkön hinta	53,50	70,4
Sähkön siirto	21,28	28
Sähkövero	16,05	21,11172
Sähkön kokonaishinta	90,83	119,51

Kaukojäähdytysenergian myyntihinta voidaan muodostaa laskemalla vaihtoehdoista tuotantotavasta aiheutuvat kustannukset. Tällä tavoin hinta voidaan asettaa asiakkaalle houkuttelevaksi ja samalla nähdään tuleeko toteutusvaihtoehdoista kannattavia. Tässä tarkastelussa vaihtoehtoinen kylmäntuotantotapa on kiinteistökohtainen kompressorijäähdytin. Vaihtoehtoiskustannus lasketaan vain tuotettavalle kylmäenergialle eli investointikustannuksia ei lasketa energian yksikköhintaan mukaan. Kaukojäähdytyksen liittymismaksu voidaan laskennassa määritellä halutunlaiseksi. Sen olisi kuitenkin oltava selvästi pienempi kuin kompressorijäähdyttimen investointikustannus, jotta palvelun houkuttelevuus säilyisi. Kaukojäähdytyspalvelun toteutuessa hinta muodostuisi energia- ja perusmaksusta tämän tarkastelun pelkän energiamaksun sijaan.

Taulukossa 23 on esitetty Vantaan Energian toimitalon sekä Jumbon kokoisten rakennusten osalta kompressorijäähdytinjärjestelmän osat sekä investointi- ja käyttökustannukset. Sähkönkulutukseen sisältyy itse kompressorijäähdyttimen ja lauhduttimen sähkönkulutus ja investointikustannuksiin itse kompressorijäähdytin ja lauhdutin. Kompressorikoneen vuosihuoltokuluiksi on eri selvityksissä arvioitu 3–12 % laitteen investointikustannuksista (Energiateollisuus ry 2006, 533). Alla olevat huoltokustannukset on laskettu käyttämällä 5 % investoinnista.

Taulukko 23. Kahden erikokoisen kompressorijäähdyttimen investointi- ja käyttökustannukset.

	Vantaan Energian toimitalo	Jumbo
Jäähdytystehontarve	338 kW	15 140 kW
Huipunkäyttöaika	750 h	1100 h
Jäähdytysenergiankulutus	254 MWh	16 654 MWh
Investointikustannus	77 740 €	1 833 000 €
Sähkönkulutus	104 MWh	6 320 MWh
Kustannukset sähköstä	9 483 €/a	574 000 €/a
Huoltokustannus	3 887 €/a	91 625 €/a
Käyttökustannukset	52,7 €/MWh	40,0 €/MWh

Erikokoisten kiinteistöjen erilainen kylmäntuotantokustannus johtuu muun muassa suuremman yksikkökoon mukana tuomista säästöistä.

5.3 Kassavirtalaskelmat

Kassavirtalaskelmia varten laadittiin työkalu, josta selviää investoinnin nettonykyarvo, sisäinen korko sekä takaisinmaksuaika. Lisäksi investoinneista on tehty herkkyysanalyysit. Kannattavuus saadaan näkyviin niin yrityksen kuin asiakkaankin kannalta. Lämmön hinnan ollessa 0 €/MWh aiheutuu adsorptiojäähdytyksestä kustannuksia sähköstä sekä muista kustannuksista, jotka lasketaan prosentuaalisena osuutena kokonaiskustannuksista. Tuloja saadaan liittymismaksusta sekä energian myynnistä. Energiankulutusten ja kustannusten oletetaan olevan samansuuruisia koko pitoaikana. Nettonykyarvo lasketaan yhtälön (10) avulla (Kärri 2011, 27).

$$NNA = \sum_{n=1}^n \frac{S_t}{(1+i)^n} - I \quad (10)$$

missä	NNA	nettonykyarvo	[€]
	S_t	hankkeen nettotuotot	[€]
	i	laskentakorko	[%]
	n	pitoaika	[a]
	I	investointi	[€]

Nettotuottojen laskentaa varten määriteltiin aiemmassa luvussa kaukojäähdytyksen myyntihinnat. Taulukossa 24 on esitetty kaikkien kolmen eri tarkastelun investointikustannukset. Työ- ja muut kustannukset sekä epävarmuus on laskettu koko jäähdytysjärjestelmän kustannuksista.

Äyritie 8:n aluejäähdytystarkastelussa putkistoa vaaditaan runkolinjaksi kokoa DN300 noin 600 metriä sekä rakennusten talohaaroihin DN200 noin 150 metriä. Jumbon sisältävässä tarkastelussa talohaarat ovat DN200 260 metriä, DN300 110 metriä ja DN400 100 metriä. Runkolinjaksi tarvitaan DN600 putkea 570 metriä ja DN400 putkea 570 metriä.

Jumbon sisältävän tarkastelun osalta kustannuksia muodostuu myös jäähdytyslaitteille rakennettavasta rakennuksesta. Yhden 600 kW adsorptiojäähdyttimen pohjapinta-ala on noin 12 m². Tässä tarkastelussa kyseisiä laitteita tarvitaan 31 kappaletta, jolloin yksinään niiden viemä lattiapinta-ala on noin 372 m². Tilaa tarvitaan kuitenkin niin putkisto- ja kuin huoltotöitäkin varten laitteiden ympärille, joten tässä tarkastelussa jäähdytyskeskuksen pinta-alaksi määritellään 700 m². Laitetilan rakentamiskustannuksena käytetään 1000 €/m² (Sipilä & Ranne 2004, 27).

Taulukko 24. Eri tarkasteluiden investointikustannuksia.

	Vantaan Energian toimitalo [€]	Äyritie 8 [€]	Jumbon lähialue [€]
Jäähdytysjärjestelmä			
-jäähdytyskoneet	203 000	662 130	7 138 000
-jäähdytystorni	41 263	59 000	550 000
Työ- ja muut kustannukset sekä epävarmuus 20 %	48 600	144 200	1 903 00
Kaukojäähdytysputket	0	327 950	1 518 000
Kylmäakku	10 000	30 000	310 000
Laitetilarakennus	0	0	700 000
Yhteensä	301 600	1 223 280	12 146 000

Kunnossapito- ja muut kustannukset on laskettu 15 % sähkön ja lämmön yhteiskustannuksista. Adsorptiojäähdyttimien kunnossapitokustannukset eivät ole merkittäviä, sillä

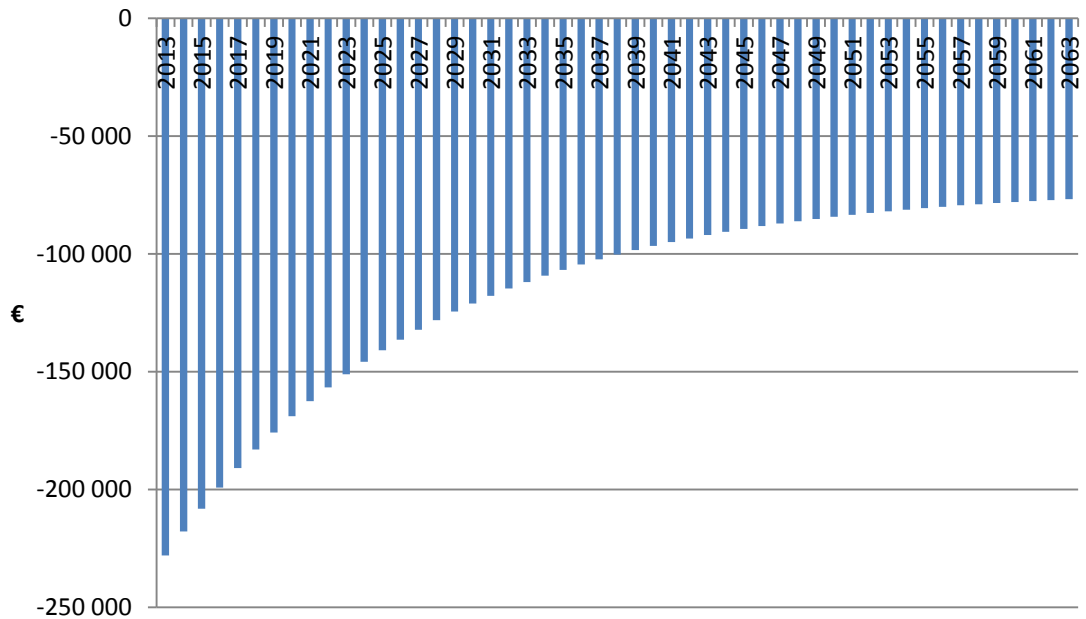
liikkuvia osia on vähän. Pumppauksesta aiheutuvat kustannukset on laskettu käyttämällä paine-eroa 100 Pa/m, hyötysuhdetta 0,8 ja massavirtana arviota putkikoon mukaisesta virtauksesta. Äyritie 8:n pumppaustehontarve on 15 kW ja Jumbon lähialue –tarkastelun 236 kW. Yksi 600 kW adsorptiojäähdytysyksikkö on sähköteholtaan 0,6 kW. Eniten sähköä kuluu jäähdytystorneihin. Äyritie 8:n osalta ajatellaan, että asiakas tarjoaa laitteiston vaatimat tilat eikä niistä aiheudu kustannuksia Vantaan Energialle. Käyttökustannuksia on esitelty taulukossa 25.

Taulukko 25. Eri tarkasteluiden käyttökustannuksia ja kulutetun energian määriä.

	Vantaan Energian toimitalo	Äyritie 8	Jumbon lähialue
Energia			
-sähkö	23 [MWh] 2 085 [€]	148 [MWh] 13 480 [€]	628 [MWh] 57 043 [€]
-lämpö	507 [MWh] 0 €	5861 [MWh] 0 €	104 909 [MWh] 0 €
Kunnossapito- ja muut kustannukset	313 [€/a]	2022 [€/a]	8 556 [€/a]

5.3.1 Vantaan Energian toimitalo

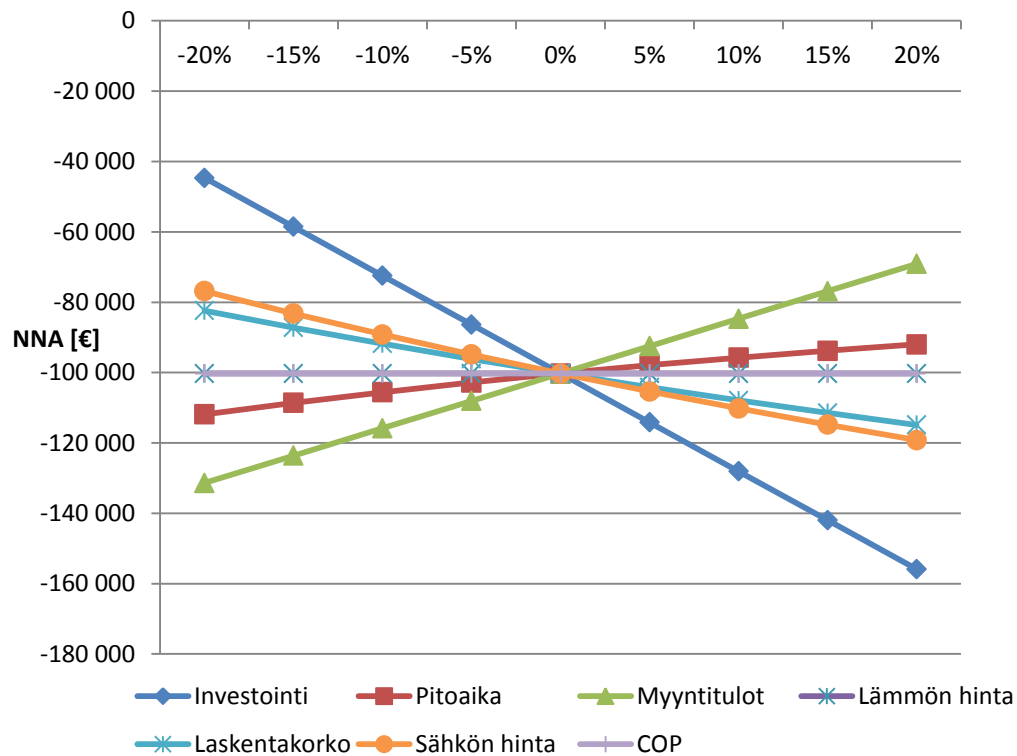
Aiemmin esiteltyjen kustannusten sekä kylmäenergian myynnistä seuraavien tulojen perusteella saadaan muodostettua kassavirtakuvaaja. Liittymismaksuksi on määritelty 50 000 €, mikä on noin 65 % vaihtoehdoisen tuotantotavan investointikustannuksista. Pienemmällä alkuinvestoinnilla kaukojäähdytyksestä saadaan asiakkaalle houkutteleva vaihtoehto. Lämmön ollessa ilmaista aiheutuisi jäähdytyksestä kustannuksia 2085 € ja myyntituloja 13 359 € vuodessa. Nettokassavirta olisi siis noin 10 962 euroa vuodessa. Kuvassa 21 on esitetty kassavirtakaavio Vantaan Energian toimitalon osalta.



Kuva 21. Kassavirtakaavio Vantaan Energian toimitalon osalta.

Investoinnin nettonykyarvo 25 vuoden päästä on noin -100 255 euroa ja sisäinen korko 1,47 %. Takaisinmaksuajaksi saadaan yli 50 vuotta. Näillä tiedoilla investointi ei kannata, sillä nettonykyarvo jää negatiiviseksi. Lisäksi takaisinmaksuaika on erittäin pitkä ja tänä aikana laite jouduttaisiin uusimaan.

Kuvassa 22 on esitetty investoinnin herkkyyshanalyysi. Herkkyyshanalyysistä selviää investoinnin herkkyys investointikustannusten, pitoajan, myyntitulojen, lämmön hinnan, laskentakoron, sähkön hinnan sekä laitteen kylmäkertoimen suhteen. Lämmön ollessa ilmaista ei se vaikuta investoinnin kannattavuuteen millään lailla. Investoinnin kannattavuus laskee merkittävästi heti, kun käytetylle lämmölle määritellään pienikin omakustannushinta.



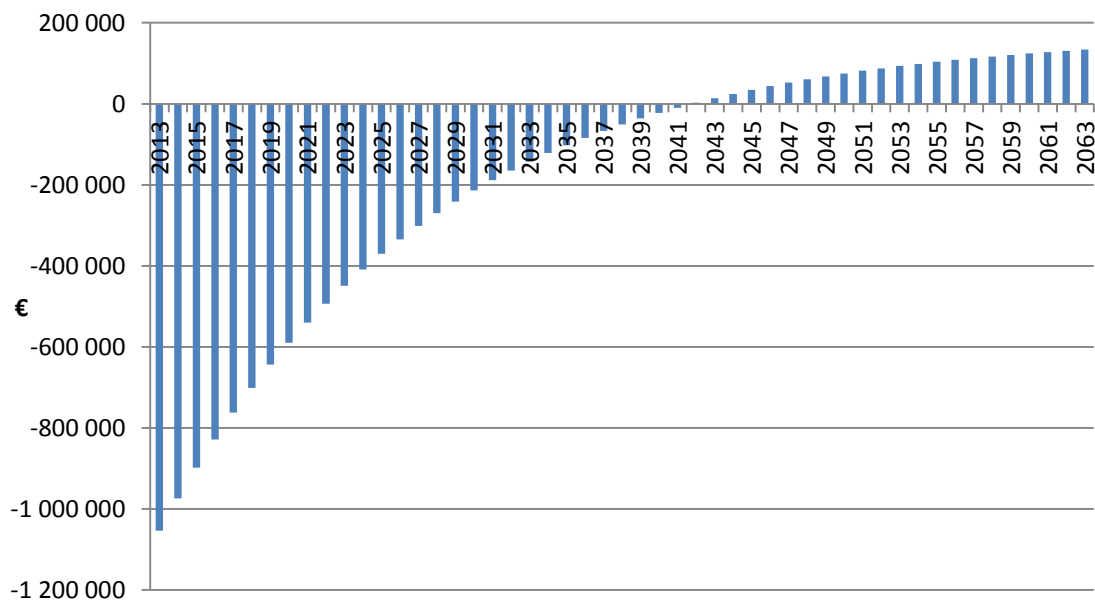
Kuva 22. Herkkyysanalyysi Vantaan Energian toimitalon osalta.

Herkkyysanalyysistä nähdään, että investointi on melko herkkä osalle muuttujista. Eniten investoinnin kannattavuuteen vaikuttavat investoinnin suuruus ja myyntitulot. Investoinnista tulisi siis kannattava pitoaikana, jos adsorptiojäähdytinten hinta olisi edullisempi tai jäähdytystornien sijaan lauhdutus voitaisiin toteuttaa esimerkiksi meren avulla. Paras vaikutus saataisiin, jos samaan aikaan myyntitulot kasvaisivat. Tämä toteutuisi kylmäenergian kulutuksen kasvaessa tai myyntihintaa nostettaessa. Energian ollessa ilmaista, eivät lämmön hinnan, eikä COP:n muutokset vaikuta kannattavuuteen. Tämän takia niiden viivat ovat kuvassa 22 vaakatasossa ja päällekkäin. Näin tapahtuu myös kahdessa seuraavassa herkkyysanalyysissä.

5.3.2 Äyritie 8

Äyritie 8:n rakennukset a-e ovat kaikki jäähdytystehontarpeiltaan samaa suuruusluokkaa kuin Vantaan Energian toimitalokin, joten kassavirtalaskuissa voidaan käyttää samaa energian myyntihintaa 52,7 €/MWh kuin aiemmin. Liittymismaksu on jälleen määritelty

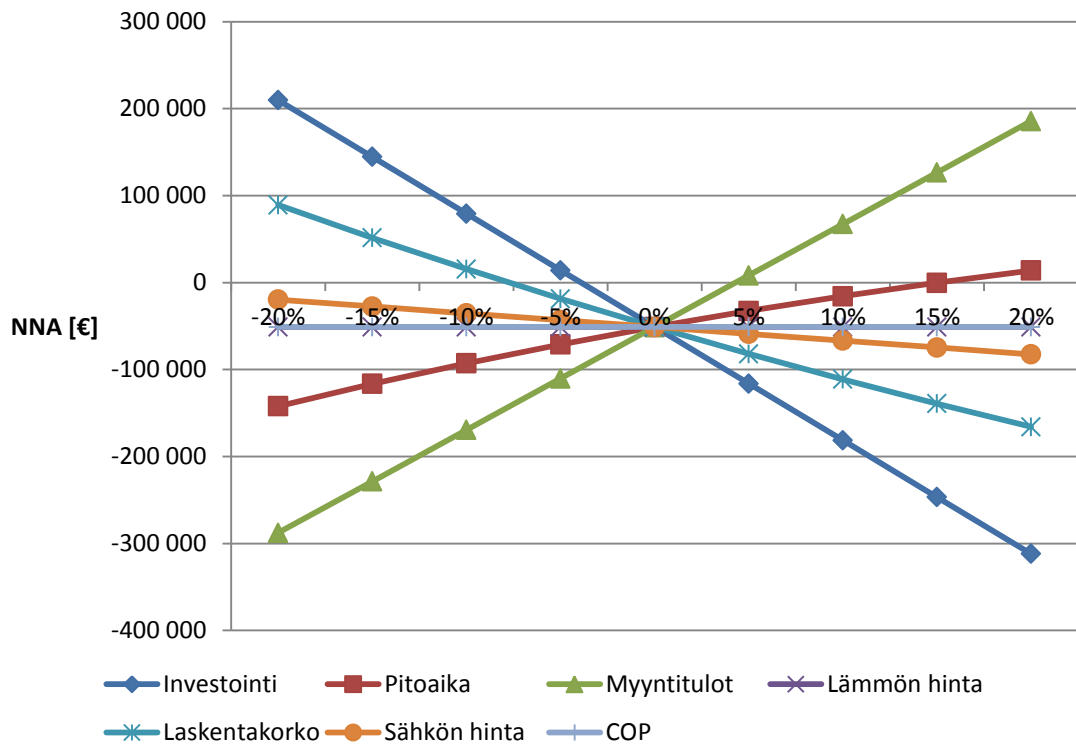
50 000 euron suuruiseksi kunkin rakennuksen osalta, sillä rakennusten kokoluokka on lähes sama kuin edellisessä tarkastelussakin. Tässä investointitarkastelussa muodostuu noin 15 500 euroa käyttökustannuksia. Myyntituloja saataisiin vuosittain noin 101 550 euroa. Nettotuotot olisivat siis noin 86 000 euroa vuodessa. Kuvassa 23 on esitetty Äyritie 8:n kassavirtakaavio.



Kuva 23. Kassavirtakaavio Äyritie 8:n rakennusten osalta.

Investoinnin nettonykyarvo 25 vuoden päästä on noin -51 000 euroa. Sisäinen korko jää 6,5 %:iin ja takaisinmaksuajaksi tulisi 29 vuotta. Takaisinmaksuaika on tämäntyyppiselle projektille pitkä ja investointikustannusten ollessa melko suuret ovat myös riskit merkittävät. Investointi ei ole myöskään kannattava, sillä nettonykyarvo jää alle nollan.

Kuvassa 24 on esitetty Äyritie 8 investoinnin herkkyyssanalyysi. Herkkyyssanalyysissä tarkastellaan herkkyyttä samojen asioiden suhteen kuin aikaisemmassakin tarkastelussa.



Kuva 24. Herkkyysanalyysi Äyritie 8:n osalta.

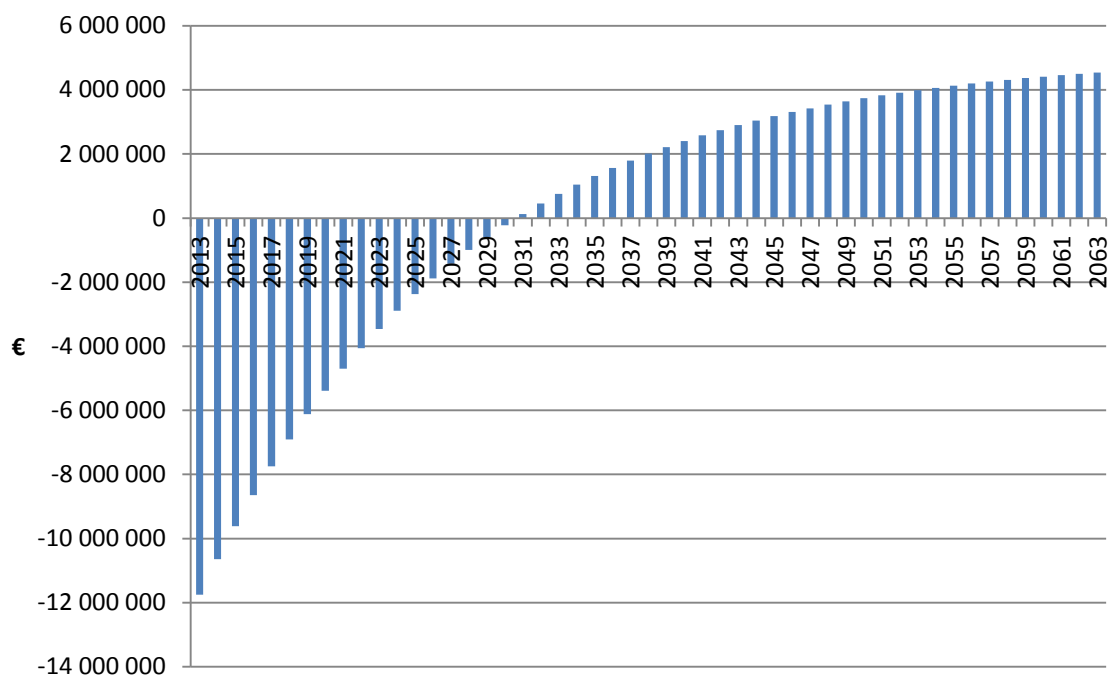
Herkkyysanalyysistä nähdään, että jälleen investointi on kaikista herkin investoinnin suuruudelle ja myyntituloille. Analyysin mukaan investointi on käytännössä yhtä herkkä eri asioille kuin Vantaan Energian toimitalon tarkastelun osalta. Investointi muuttuisi kannattavaksi jo melko pienillä muutoksillakin: investointikustannusten laskiessa 5 % tai myyntitulojen kasvaessa 5 %.

Laskentaan on sisällytetty 20 % työkustannuksia sekä epävarmuutta ja kunnossapito- ja muut kustannukset on asetettu 15 %:iin. Etenkin 20 %:iin sisällytetty investointikustannusten epävarmuus heikentää osaltaan kannattavuutta. Investointi muuttuisi juuri ja juuri kannattavaksi jos kyseinen prosenttiluku muutettaisiin 15 %:iin. 7 %:lla takaisinmaksuaika putoaisi 20 vuoteen ja nettonykyarvo olisi noin 90 000 euroa. Tarkempi vastaus investoinnin kannattavuudesta edellyttäisi siis huomattavasti tarkempia tietoja kaikista kustannuksista, mutta näiden laskelmien perusteella hanke ei kannattaisi.

5.3.3 Jumbon lähialue

Jumbon sisältävän tarkastelun osalta energiamaksuna käytetään kaikille asiakkaille Jumbon kokoiselle kiinteistölle laskettua vaihtoehtoisesta jäähdytystavasta aiheutuvaa kustannusta 40 €/MWh. Todellisessa hinnoittelutilanteessa hinta voisi mahdollisesti olla myös kaikille asiakkaille yhtä suuri ja perusmaksulla pystyttäisiin kattamaan erityyppisistä asiakkaista aiheutuvia erisuuruisia kustannuksia.

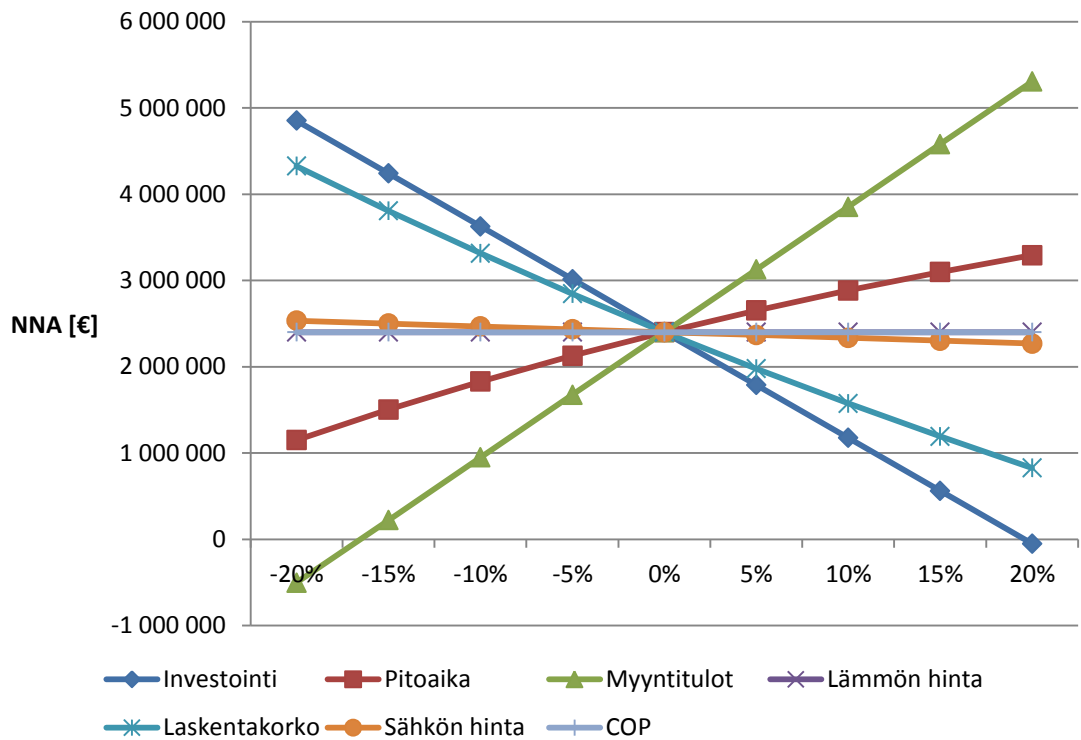
Liittymismaksutuloiksi on määritelty yhteensä miljoona euroa, joka on selvästi matalammalla tasolla kuin kiinteistökohtaisten jäähdytyslaitteiden hankkimiseen kuluva summa. Kustannuksia aiheutuu vuosittain noin 65 000 euroa ja vuosittaisia tuloja energianmyynnistä saadaan noin 1 245 000 euroa. Nettokassavirraksi muodostuu siis noin 1 180 000 euroa. Kassavirtakaavio on esitetty kuvassa 25.



Kuva 25. Kassavirtakaavio Jumbon sekä sen lähialueen osalta.

Investoinnin nettonykyarvo 25 vuoden päästä on noin 2 400 000 euroa. Takaisinmaksuajaksi saadaan 17 vuotta ja investoinnin sisäiseksi koroksi noin 9,3 %. Investoinnin nettonykyarvo on positiivinen eli investointi olisi kannattava. Takaisinmaksuaika on toisaalta yhä melko pitkä ja investoitava summa on suuri varsinkin pilottiprojektiksi. Käyt-

tökokemusten puute tuo myös mukanaan omia riskejä, kuten järjestelmän toimivuus ja laitteistojen todellinen kestoikä. Kuvassa 26 on esitetty tämän investoinnin herkkyysanalyysi.



Kuva 26. Jumbon sisältävän tarkastelun herkkyysanalyysi.

Myös tämä tarkastelu on kaikista herkin investointikustannusten ja myyntitulojen muutoksille. Nettonykyarvo on kuitenkin sen verran suuri, että projektin investointikustannusten pitäisi laskea yli 15 % tai vaihtoehtoisesti myyntitulojen vähentyä noin 15 %, jotta investointi ei enää kannattaisi. Asiakkaiden energiankulutuksissa on käytetty arvioita, joten todelliset kulutusarvot antaisivat myös todenmukaisemman kuvan kokonaistilanteesta.

6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Adsorptiojäähdytin voi olla hyvä tapa tuottaa jäähdytystä, jos käytössä on ylimääräistä ja ilmaista lämpöä. Sen on kuitenkin toistaiseksi vaikea kilpailla muita kylmäntuotantotapoja vastaan etenkin jos käyttöenergiasta on maksettava. Tähän on syynä muun muassa laitteistojen korkeat hinnat sekä matalat kylmäkertoimien arvot. Myös laitteistosta poistettavan lämmön määrä on merkittävä, mikä johtaa jäähdytykseen käytettävien vesistöjen puutteessa suuritehoisiin jäähdytystorneihin. Adsorptiojäähdyttimillä voisi kuitenkin hintojen laskiessa olla lisää potentiaalia etenkin maissa, joissa saadaan hyvin hyödynnettyä aurinkoenergiaa.

Kannattavuustarkastelujen perusteella adsorptiojäähdytinten käyttö kaukojäähdytyksen tuottamisessa ei kannata kaikissa tapauksissa. Syynä on pääasiassa laitteiston hinta, joka on toistaiseksi liian korkea, jopa 2–3ertainen kompressorijäähdyttimiin nähden. Kaukojäähdytyksen tuottaminen adsorptiojäähdyttimillä ei tällä hetkellä vaikuta kannattavan, vaikka lämpö olisi ilmaista. Kannattavuutta laskee myös adsorptiojäähdyttimen matala kylmäkerroin, jolla on vaikutusta heti, jos käytetylle lämmölle määritellään hinta. Kannattavuuteen vaikuttaa oleellisesti myös energianmyynnistä saatavat tulot. Siihen vaikuttavat asiakkaiden jäähdytysenergian kulutus ja energian myyntihinnan sekä perusmaksun suuruudet. Tuloksiin sisältyy kuitenkin paljon epävarmuutta ja tarkemmat lähtötiedot antaisivat tarkemmat tuloksetkin. Etenkin investointikustannuksista ja rakennusten energiankulutuksesta tulisi saada mahdollisimman tarkat tiedot.

Tämän työn laskelmissa kaukojäähdytys adsorptiojäähdyttimellä saatiin kannattamaan kun mukana oli lukuisia rakennuksia joihin kuului kaksi erittäin isoa kiinteistöä. Investointi on kannattava vaikka investointikustannukset olisivat lähes 12 miljoonaa euroa, koska energian myynnistä saatavat tulot ovat niin suuret. Tämän kokoluokan investointi on kuitenkin erittäin suuri riski varsinkin ensimmäiseksi kaukojäähdytysprojektiksi.

Laitteiden huono saatavuus, yhden yksikön 600 kW enimmäisteho ja käyttökokemusten vähäisyys hankaloittaisivat toteutusta oleellisesti. Lisäksi adsorptiojäähdyttimien huono jäähdytys saattaisi muodostaa ongelman etenkin laajamittaisessa käytössä. Yksittäisten pienehköjen jäähdytyskohteiden osalta voitaisiin mahdollisesti sallia hieman tavallista

korkeampi kaukolämmön paluueden lämpötila, koska sillä ei olisi juurikaan vaikutusta koko verkkoon.

Tässä työssä ei tarkasteltu jäähdytystoiminnasta seuraavaa lisääntyneen lämmönkulutuksen vaikutusta Vantaan Energian CHP-laitosten toimintaan. Lisääntynyt lämmönkulutus voisi tarkoittaa myös parantunutta sähköntuotantohyötysuhdetta, joka mahdollisesti vaikuttaisi koko yrityksen tuloihin positiivisesti. Mikäli tällainen tarkastelu liitettäisiin osaksi laskelmia, tulokset voisivat näyttää kannattavammilta.

Kohteissa, jotka tarvitsevat samaan aikaan sekä kylmä- ja lämpötehoa voisi olla mahdollista hyödyntää lauhdutintehoa lämmityksessä. Kiinteistökohtainen adsorptiojäähdytint toimisi tällöin lämpöpumpun tavoin. Tämä tekisi laskelmista erilaisia, sillä lauhdutinlaitteistoihin kului vähemmän rahaa. Esimerkki sopivasta kohteesta voisi olla kylpylä-hotelli.

Jatkoselvityksenä olisi syytä tutkia lisää muidenkin jäähdytystekniikoiden käyttöä kaukojäähdytyksen tuottamisessa. Esimerkiksi absorptiojäähdytinten käyttö aluejäähdytyksessä voisi kannattaa mikäli kaukolämpöverkon lämpötilatasot riittävät. Niiden hinta on yli 1 MW kokoluokassa voi olla jopa vain 100€/kW, jolloin se pystyisi kilpailemaan kompressorijäähdyttimien kanssa ainakin investointikustannusten osalta.

Toisaalta myös sähkötoimisten kompressorien käyttöä kylmän tuotannossa tulisi selvittää, mikäli jonkinlainen jäähdytysliiketoiminta on tarkoitus käynnistää. Niidenkin avulla voisi olla mahdollista saavuttaa suurempien jäähdytysyksiköiden mukana tuomia etuja ja saada palvelu kannattavaksi niin asiakkaan kuin Vantaan Energian kannalta. Lämpöpumppujen käyttö voisi myös olla potentiaalinen vaihtoehto, mikäli saatavalle lämmölle löytyisi sopiva käyttötarkoitus. Niistä saatavan lämmön tulisi olla kesällä vähintään 70 °C, jotta lämpö voitaisiin hyödyntää kaukolämpöverkossa.

7 YHTEENVETO

Tässä työssä selvitettiin adsorptiojäähdyttimen käytön kannattavuutta jäähdytyksen tuottamisessa. Adsorptiojäähdytin on jäähdytyslaite, joka saa käyttöenergiänsä lämmöstä. Tässä työssä tarkasteltiin adsorptiojäähdyttimen käyttöä kaukolämpöverkossa.

Rakennusten jäähdytystä tarvitaan, jotta jäähdytettävän kohteen lämpötila saadaan ympäristön lämpötilaa matalammaksi. Jäähdytystarpeen mitoittamiseen vaikuttavat esimerkiksi ikkunoiden pinta-ala, rakenne ja aurinkosuojaus sekä rakenteiden lämmönjohtavuus, rakennusmassat ja niiden varauskyky. Suomessa jäähdytystehon huipun käyttöajat jäävät tyypillisesti melko mataliksi johtuen lyhyestä jäähdytyskaudesta. Rakennusten jäähdytystarve on korkeimmillaan yleensä heinä-elokuussa.

Kaukojäähdytyksellä tarkoitetaan jäähdytetyn veden keskitettyä tuotantoa ja sen jakelua putkiston kautta rakennusten jäähdyttämiseen. Tekniikka on sama kuin kaukolämmityksessä. Viime vuosina sen käyttö Suomessa on laajentunut yhä useamman energiayhtiön aloittaessa tarjoamaan kaukojäähdytystä. Kaukojäähdytyksellä saavutetaan lukuisia etuja. Yleisesti sen eduksi lasketaan energiatehokkuus. Lisäksi tilantarve on tavallisia kompressorilaitteita pienempää, sillä itse tuotantolaitteet sijaitsevat muualla kuin jäähdytettävässä rakennuksessa. Kaukojäähdytyksellä säästetään myös merkittävästi sähköä. Monessa tapauksessa jäähdytykseen voidaan käyttää sähkön sijaan muuten hukkaan meneviä resursseja, kuten kylmää merivettä. Hajautetussa kylmäntuotannossa myös toiminnan varmuus kasvaa.

Jäähdytysenergiaa voidaan tuottaa usealla eri tavalla. Kiinteistökohtaisista tuotantotavoista tällä hetkellä yleisin on kompressorilaitteilla toteutettu jäähdytys. Kaukojäähdytystä voidaan kompressorijäähdyttimien lisäksi tuottaa adsorptio- ja absorptiojäähdyttimillä sekä lämpöpumpuilla. Lisäksi voidaan käyttää vapaajäähdytystä, mikäli lähistöllä sijaitsee meri tai muu iso vesistö, jonka lämpötila on riittävän matala.

Työtä varten kehitettiin työkalu, jolla voidaan arvioida kiinteistö- ja aluekohtaisen jäähdytyksen kannattavuutta. Laskennassa on otettu huomioon investointi- ja käyttökustannukset sekä rakennusten erilaiset energiankulutukset. Tuloksiin sisältyy jonkin verran

epävarmuutta, sillä esimerkiksi kaikista käyttökuluista ei ollut mahdollista saada tarkkaa tietoa, joten ne perustuvat yleisesti käytössä oleviin arvioihin tai oletuksiin.

Tulosten perusteella Vantaan Energian ei kannata investoida adsorptiojäähdyttimillä toteutettuun kaukojäähdytykseen, sillä kahdessa laskentatapauksessa se ei kannattanut ja yhdessä investointikustannukset nousivat selvästi liian suuriksi. Investoinnit ovat erittäin herkkiä etenkin investointikustannusten ja myyntitulojen suhteen. Kannattavuuden kannalta suurimpana esteenä voisikin pitää adsorptiojäähdyttimien kallista hintaa sekä putkiston rakentamisesta aiheutuvia kustannuksia. Yhdessä tapauksessa jo 5 % lasku investointikustannuksissa olisi tehnyt investoinnin kannattavaksi. Laitehintojen laskies-
sa adsorptiojäähdytinten käyttöä voitaisiin luultavasti lisätä etenkin yksittäisissä koh-
teissa, joissa on saatavilla jatkuvasti hukkalämpöä.

Lähdeluettelo

Aittomäki, A. (toim.) 2008. Kylmäteknikka. 3. painos. Helsinki: Suomen Kylmäyhdistys r.y. 406 s. ISBN 978-951-96449-6-7

Alam, K.C.A., Khan, M.Z.I., Uyun, A.S., Hamamoto, Y., Akisawa, A. & Kashiwagi, T. 2007. Experimental study of a low temperature heat driven re-heat two-stage adsorption chiller. Applied Thermal Engineering, 2007, volume 27: 10. ss. 1686-1692. ISSN: 1359-4311

Alghoul, M.A., Sulaiman, M.Y., Azmi, B.Z., Sopian, K. & Wahab, M.Abd. 2007. Review of materials for adsorption refrigeration technology. Anti-Corrosion Methods and Materials, 2001 volume 54: 4. ss. 225-229. ISSN 0003-5599

Askalany, A.A., Salem, M., Ismael, I.M., Ali, A.H.H., Morsy, M.G. & Saha, B.B. 2013. An overview on adsorption pairs for cooling. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, volume 19: March. ss.565-572. ISSN 1364-0321

Clouhury, B., Saha, B.B., Chatterjee, P.K. & Sarkar, J.P. 2013. An overview of developments in adsorption refrigeration systems towards a sustainable way of cooling. Applied Energy, 2013, volume 104: April. ss. 554-567. ISSN 0306-2619

Danfoss 2013. Kylmäsovellusten scroll-kompressorit. [verkkajulkaisu]. [viitattu 11.12.2013]. 7 s. Saatavissa: http://www.danfoss.com/NR/rdonlyres/D42A573B-D423-42A4-B366-9B9EF12272C8/0/scroll_textFIN.pdf

ECO-MAX. 2013. Adsorption chillers. [verkkajulkaisu]. [viitattu 29.7.2013]. 11 s. Saatavissa: http://www.ppiway.com/sites/default/files/downloads/eco-max_chillers_white_paper.pdf

Energiateollisuus ry. 2006. Kaukolämmön käsikirja. Helsinki: Energiateollisuus ry. 566 s. ISBN 952-5615-08-1

Energiateollisuus ry. 2012. Kaukojäähdytys lisääntyy Suomessa Euroopan nopeinta tahtia. [verkkodokumentti]. [viitattu 26.8.2013]. Saatavissa:

<http://energia.fi/ajankohtaista/lehdistotiedotteet/kaukojaahdytys-lisaantyy-suomessa-euroopan-nopeinta-tahtia>

Energiateollisuus ry. 2013a. Kaukojäähdytys. [verkkodokumentti]. [viitattu 20.5.2013].
Saatavissa: <http://energia.fi/energia-ja-ymparisto/kaukolampo-ja-kaukojaahdytys/kaukojaahdytys>

Energiateollisuus ry. 2013b. Kaukojäähdytyksen toimintaperiaate. [verkkodokumentti]. [viitattu 20.5.2013]. Saatavissa: <http://energia.fi/energia-ja-ymparisto/kaukolampo-ja-kaukojaahdytys/kaukojaahdytys/kaukojaahdytyksen-toimintaperiaate>

Energiateollisuus ry. 2013c. Kaukojäähdytys. [verkkodokumentti]. [viitattu 21.8.2013].
Saatavissa: <http://energia.fi/tilastot-ja-julkaisut/kaukolampotilastot/kaukojaahdytys>

Frey, G., Göbel, R. 1996. Vorteile der Adsorptionskälteanlage in Verbindung mit Fernwärme in Kassel. Euroheat & Power - Fernwärme international, 1996, volume 25: 4-5. ss. 218-228. ISSN 0949-166X

GBU. 1999. Adsorption chiller NAK. [viitattu 2.9.2013]. [verkkojulkaisu]. 19 s Saatavissa: <http://www.gbunet.de/outgoing/nak-prospect-e.pdf>

Gerald, W. 2013. Weatherite Adsorption Chiller Specification. Weatherite Manufacturing Ltd. [sähköposti].

Gerdi, B. 2001. Adsorption and desiccant systems – an international overview. IEA Heat Pump Centre Newsletter, 2001 volume 19: 4. ss. 10–12. ISSN 0724-7028

Hakala, P., Kaappola, E. 2007. Kylmälaitoksen suunnittelu. 2. painos. Jyväskylä: Gummerrus Kirjapaino Oy. 268 s. ISBN 978-952-13-3321-7

Helsingin Energia. 2013a. Kaukojäähdytys hyödyntää hukkaenergiaa. [verkkodokumentti]. [viitattu 3.6.2013]. Saatavissa: <http://www.helen.fi/ymparisto/kaukojaahdytys.html>

Helsingin Energia. 2013b. Kaukojäähdytys. [verkkodokumentti]. [viitattu 15.8.2013]. Saatavissa: <http://www.helen.fi/kaukojaahdytys/>

Kaukolämpöekstra. 2013. Kaukolämpöjohtojen rakentamiskustannukset. [verkkodokumentti]. [viitattu 1.10.2013]. Saatavilla: <http://www.kaukolampoekstra.fi/> (vaatii kirjautumisen).

Koljonen, T., Sipilä, K. 1998. Uudemman absorptiojäähdytystekniikan soveltaminen kaukojäähdytyksessä. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus. [verkkojulkaisu]. [viitattu 31.5.2013]. 55 s. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/1998/T1926.pdf>. ISBN 951-38-5335-7

Krarti, M. 2010. Energy Audit of Building Systems: An Engineering Approach. 2. painos. Yhdysvallat: Taylor and Francis Group, LLC. 456 s. ISBN 978-1-4398-2872-4

Kärri, T. 2011. Investointilaskelmat. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. [kurssimateriaali] 52 s.

Lamp, P., Schweigler, C. & Ziegler, F. 1998. Opportunities for sorption cooling using low grade heat. Applied Thermal Engineering, 1998, volume 18: 9-10. ss. 755-764. ISSN: 1359-4311

Larjola, J. 2012. Energianmuuntoprosessit. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. [kurssimateriaali]. 168 s.

Ocean Thermal Energy. 2013. Seawater district cooling. [verkkojulkaisu]. [viitattu 3.6.2013]. Saatavissa: http://oteplc.com/seawater_district_cooling.html

Oinonen, T., Soimakallio, S. 2001. HFC- ja PFC-yhdisteiden sekä SF₆:n päästöjen tekniset vähentämiskeinot ja niiden kustannukset Suomessa. 174 s. [viitattu 26.8.2013]. [verkkojulkaisu]. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2001/T2099.pdf> ISBN 951-38-5900-1

Seitsonen, A. 2012. Kaukojäähdytyksen hinnan muodostuminen asiakkaalle Lahden Ranta-Kartanon alueella. [viitattu 26.8.2013]. [verkkojulkaisu]. 50 s. Saatavissa: http://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/38482/Seitsonen_Antti.pdf

Sipilä, K., Ranne, A. 2004. Kiinteistökohtaisen jäähdytystehon tuotantokustannukset, osa 1. Kylmäkoneistojen mitoitus, investointi- ja käyttökustannukset. 40 s. VTT Tutkimusraportti. [sähköposti].

Skagestad, B. & Mildenstein, P. 2002. District Heating and Cooling Connection Handbook. International Energy Agency. 86 s. Saatavissa: <http://old.iea-dhc.org/Annex%20VI/annex%20vi%20S6%20DHC%20Handbook.pdf> ISBN 90-5748-026-3

SKLL, Suomen kylmäliikkeiden liitto ry. 2008a. Yleistä kylmäaineista ja niiden rajoituksista. [viitattu 26.8.2013]. [verkkojulkaisu]. Saatavissa: <http://www.skll.fi/www/att.php?id=45>

SKLL, Suomen kylmäliikkeiden liitto ry. 2008b. Kylmäainetilanne 2008. [viitattu 26.8.2013]. [verkkojulkaisu]. Saatavissa: <http://www.skll.fi/yhdistys/www/att.php?type=2&id=37>

SorTech. 2013. Heat to refrigeration. Adsorption chillers – The energy-saving and environmental friendly alternative to current-driven chillers? [sähköposti].

Suomen Kaukolämpö ry. 2004. Kaukojäähdytys. Helsinki: Suomen Kaukolämpö ry. [verkkojulkaisu]. [viitattu 31.5.2013]. 36 s. Saatavissa: http://energia.fi/sites/default/files/raporttij1_2004.pdf. ISSN 1795-0635

Suomen rakentamismääräyskokoelma D2. 2012. Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto – Määräykset ja ohjeet. Helsinki: Ympäristöministeriö. [verkkojulkaisu]. [viitattu 5.6.2013]. 34 s. Saatavissa: http://www.finlex.fi/data/normit/37187-D2-2012_Suomi.pdf

Tampereen Sähkölaitos. 2013. Kaukojäähdytys. [verkkojulkaisu]. [viitattu 15.8.2013]. 4 s. Saatavissa: https://www.tampereensahkolaitos.fi/kaukolampojaahdytysjamaakaasu/kaukojaahdytys/Documents/kaukojaahdytys_netti.pdf

Teknillinen termodynamiikka. 2013. Verkko-opetusmateriaali. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. [verkkodokumentti]. [viitattu 29.7.2013]. Saatavissa: <http://www.kurssit.lut.fi/040301000/>

Turku Energia. 2013. Kaukojäähdytys on ympäristöystävällinen ja taloudellinen tapa jäähdyttää kiinteistöjä. [verkkodokumentti]. [viitattu 15.8.2013]. Saatavissa: <http://www.turkuenergia.fi/yrityksille/lampo/kaukojaahdytys/>

Union Industry. 2013. Water cooling chiller made in japan. [verkkodokumentti]. [viitattu 10.9.2013]. Saatavissa: http://www.alibaba.com/product-tp/132923688/Water_cooling_chiller_made_in_japan.html

Wang, D.C., Li, Y.H., Li, D., Xia, Y.Z. & Zhang, J.P. 2010. A review on adsorption refrigeration technology and adsorption deterioration in physical adsorption systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010, volume 14: 5. ss. 344-353. ISSN 1364-0321

Wang, L.W., Wang, R.Z. & Oliveira, R.G. 2009. A review on adsorption working pairs for refrigeration. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009, volume 13: 3. ss. 518-534. ISSN 1364-0321

Vantaan Energia. 2013. Sähkön hinnastot ja sopimusehdot. [verkkojulkaisu]. [viitattu 24.9.2013] Saatavissa: <http://www.vantaanenergia.fi/FI/SAHKO/HINNASTOTJAEHDOT/Sivut/default.aspx>

ViFlow. 2013. Jäähdytystornit ja Dry Coolerit. [verkkojulkaisu]. [viitattu 9.9.2013]. 9 s. Saatavissa: <http://www.viflow.fi/uploads/coolingtowersfi.pdf>

Weatherite Manufacturing. 2013. Adsorption chiller technology. [verkkojulkaisu]. [viitattu 11.12.2013]. Saatavissa: <http://www.weatherite-manufacturing.com/edit/files/brochures/ADsorption%20chiller%20brochure.pdf>

Yle. 2013. Kaukokylmä siintää Lahti Energian silmissä. [verkkodokumentti]. [viitattu 15.8.2013]. Saatavissa: http://yle.fi/uutiset/kaukokylma_siintaa_lahti_energian_silmissa/6647763

Ympäristöministeriö. 2012. Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta. [verkkojulkaisu]. [viitattu 31.10.2013]. 76 s. Saatavissa: <http://www.ym.fi/download/noname/%7BDF2B6F84-2CF9-4C43-9D76-9B04C7AF1D72%7D/30748>

Yhden adsorptiojäädyttimen kylmäkertoimia eri lämpötilatasoilla. (GBU 1999, 17)

Chilling Temperature 14°C to 9°C

Cooling Water Temperature	Hot Water - Temperature								
	55°C	60°C	65°C	70°C	75°C	80°C	85°C	90°C	95°C
28°C	0,52	0,56	0,58	0,61	0,62	0,64	0,65	0,66	0,66
29°C			0,56	0,58	0,6	0,61	0,62	0,63	0,64
30°C			0,52	0,56	0,57	0,59	0,61	0,62	0,63
31°C				0,52	0,55	0,57	0,6	0,61	0,62
32°C				0,49	0,53	0,56	0,57	0,58	0,59

Chilling Temperature 13°C to 8°C

Cooling Water Temperature	Hot Water - Temperature								
	60°C	65°C	70°C	75°C	80°C	85°C	90°C	95°C	100°C
28°C	0,43	0,51	0,56	0,6	0,62	0,64	0,65	0,66	0,67
29°C		0,47	0,53	0,57	0,6	0,62	0,64	0,65	0,66
30°C			0,5	0,55	0,58	0,61	0,63	0,64	0,65
31°C			0,46	0,52	0,56	0,59	0,61	0,63	0,64
32°C				0,49	0,53	0,57	0,59	0,61	0,63

Chilling Temperature 12°C to 7°C

Cooling Water Temperature	Hot Water - Temperature							
	65°C	70°C	75°C	80°C	85°C	90°C	95°C	100°C
28°C	0,56	0,57	0,58	0,61	0,63	0,64	0,65	0,66
29°C	0,44	0,51	0,55	0,59	0,61	0,63	0,64	0,65
30°C		0,47	0,53	0,56	0,59	0,61	0,63	0,64
31°C		0,44	0,50	0,54	0,57	0,60	0,61	0,63
32°C			0,46	0,51	0,55	0,58	0,60	0,61

Chilling Temperature 11°C to 6°C

Cooling Water Temperature	Hot Water - Temperature							
	65°C	70°C	75°C	80°C	85°C	90°C	95°C	100°C
28°C	0,46	0,52	0,56	0,59	0,61	0,63	0,64	0,65
29°C		0,48	0,53	0,57	0,60	0,62	0,63	0,64
30°C		0,45	0,50	0,55	0,58	0,60	0,62	0,63
31°C			0,47	0,52	0,55	0,58	0,60	0,62
32°C			0,44	0,49	0,53	0,56	0,58	0,60

Chilling Temperature 10°C to 5°C

Cooling Water Temperature	Hot Water - Temperature							
	65°C	70°C	75°C	80°C	85°C	90°C	95°C	100°C
28°C	0,43	0,50	0,54	0,58	0,60	0,62	0,63	0,64
29°C		0,46	0,51	0,55	0,58	0,60	0,62	0,63
30°C			0,48	0,53	0,56	0,58	0,60	0,62
31°C			0,45	0,50	0,54	0,57	0,59	0,60
32°C				0,47	0,51	0,54	0,57	0,59

Adsorptioprosessin neljä eri vaihetta (mukailtu lähteestä Albring Industrievertretung GmbH 2000, 6).

