

Markus Merilä

DATAKESKUSTEN HUKKALÄMMÖN TALTEENOTTO JA HYÖDYNTÄMINEN

Opinnäytetyö

Energiatekniikan koulutusohjelma

Huhtikuu 2016



KYAMK
University of Applied Sciences

Tekijä/Tekijät Markus Merilä	Tutkinto Insinööri	Aika Huhtikuu 2016
Opinnäytetyön nimi Datakeskusten hukkalämmön talteenotto ja hyödyntäminen		52 sivua
Toimeksiantaja CTS Engtec Oy		
Ohjaaja Hannu Sarvelainen, Lehtori Matti Kataikko, Vanhempi projekti insinööri		
Tiivistelmä <p>Opinnäytetyön tavoitteena oli tehdä selvitys teknologioista, jotka soveltuvat datakeskuksissa syntyvän hukkalämmön hyödyntämiseen ja selvittää, minkälaista hyötyä niillä on mahdollista saavuttaa. Työ rajattiin käsittelemään megawattiluokan datakeskuksia sekä hukkalämmön hyödyntämiseen soveltuvia järjestelmiä. Datakeskusteollisuus on tällä hetkellä nopeimmin kehittyvä teollisuudenala ja energiankuluttaja.</p> <p>Lukijalle annetaan yleiskäsitys nykyaikaisten teollisen mittakaavan datakeskusten toiminnasta ja rakenteesta. Keskeisenä tarkastelun kohteena on datakeskusten energiatehokkuuteen vaikuttavat järjestelmät sekä niiden toiminta. Hukkalämmön hyödyntämiseen soveltuvien teknikkoiden teoria käydään läpi. Myös alan keskeisimmät standardit sekä energiatehokkuuden mitausmenetelmät esitellään.</p> <p>Osana työtä toteutettiin kyselytutkimus kotimaisille kaukolämmön toimittajille. Kyselyn tavoitteena oli selvittää kaukolämmön toimittajien kiinnostusta hyödyntää hukkalämpöä osana liiketoimintaansa, sekä hukkalämmön vastaanottokapasiteettia. Kyselyn tuloksista ilmeni, että asenne hukkalämmön hyödyntämistä kohtaan on erittäin positiivinen ja kiinnostusta löytyy, mikäli teknistaloudelliset edellytykset täyttyvät.</p> <p>Selvitystyön tuloksena erilaiset lämmitysratkaisut, kuten kaukolämpö, ovat kannattavin vaihtoehto hukkalämmön hyödyntämiseen. Työssä tutkittiin myös teknologioita, joita on mahdollista hyödyntää alueilla, joilla kaukolämpöverkkoja ei ole. Näistä adsorptiojäähdytys sekä PCM Engine -teknologiat osoittautuivat lupaavimmiksi. PCM Engine -teknologia on ainoa, joka kykenee hyödyntämään erittäin alhaisia, jopa 25 °C lämpötiloja energianlähteenä. PCM Engine -prosessilla voidaan muuntaa hukkalämpöä takaisin sähköenergiaksi, noin 3 – 4%:n hyötysuhteella.</p>		
Asiasanat datakeskus, hukkalämpö, kaukolämpö, ORC-prosessi, PCM Engine, lämpöpumppu		

Author (authors) Markus Merilä	Degree Bachelor of Engineering	Time April 2016
Thesis Title Data Center Waste Heat Recovery and Utilization		52 pages
Commissioned by CTS Engtec Oy		
Supervisors Hannu Sarvelainen, Senior Lecturer Matti Kataikko, Senior Project Engineer		
Abstract <p>The objective of this thesis was to examine technologies suitable for the utilization of low grade waste heat in data centers and identify their potential benefits. The thesis is limited to megawatt-scale data centers and systems for the appropriate utilization of waste heat. The data center industry is currently the fastest expanding energy sector and consumer.</p> <p>In the thesis, an overview is given on the activities and the structure of modern industrial-scale data centers. The main subjects of examination are systems affecting the data center energy efficiency, as well as their operations. Theories of appropriate utilization of waste heat technologies are also discussed. The main industry standards, as well as energy efficiency measurement methods are presented.</p> <p>A survey of domestic suppliers of district heating was carried out. The objective of the survey was to obtain information on the interest of district heating suppliers in taking advantage of waste heat as part of their business, as well as the receiving capacity of waste heat. The results of the survey show that the attitudes towards the utilization of waste heat are positive and there is interest in it, if the technical and economic conditions are met.</p> <p>The results of the study indicate that different heating solutions, such as district heating, are the most profitable option for the utilization of waste heat. Technologies that can be utilized in areas where there are no district heating networks were also investigated as part of this study. It was discovered that out of these technologies, adsorption cooling systems and PCM Engine technologies are the most promising. PCM Engine technology is the only one which is able to take advantage of temperatures as low as 25 °C as its energy source, and convert waste heat back into electrical energy with an approximate efficiency 3 – 4 per cent.</p>		
Keywords Data Center, Waste Heat Recovery, Central Heating, ORC process, PCM Engine, Heat Pump		

SISÄLLYS

Käytetyt lyhenteet	5
1 JOHDANTO	6
2 DATAKESKUKSET.....	7
2.1 Dakeskusten luokittelu	7
2.2 Energiatehokkuuden mittaaminen	8
2.3 Dakeskusten standardit	11
2.3.1 ASHRAE Thermal Guidelines	11
2.3.2 TIA-942 Data Center Standard.....	12
2.4 Dakeskusten tekniikka	13
2.4.1 Sähkönjakelujärjestelmä	14
2.4.2 Jäähdytysjärjestelmä.....	16
2.4.3 IT-järjestelmä	22
2.4.4 Muut järjestelmät.....	22
2.5 Ympäristötekijät	23
3 DATAKESKUSTEN ENERGIA	25
4 HUKKALÄMMÖN HYÖDYNTÄMINEN JA TALTEENOTTO	27
4.1 Kaukolämpö.....	28
4.1.1 Tekniikka	29
4.1.2 Kaukolämpöliityntään vaikuttavat tekijät.....	33
4.1.3 Kyselytutkimus kaukolämmön toimittajille.	34
4.2 Jäähdytys	36
4.2.1 Absorptiojäähdytys	36
4.2.2 Adsorptiojäähdytys	39
4.3 Sähköntuotanto.....	41
4.3.1 ORC-prosessi.....	41
4.3.2 PCM Engine system.....	43
4.4 Alhaisia lämpöjä hyödyntävä teollisuus	44
5 Päätelmät	46
LÄHTEET	48

KÄYTETYT LYHENTEET

ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air Condition Engineers
CHP	Combined Heat and Power
COP	Coefficient of performance
CPU	Central processing Unit
CRAC	Computer Room Air Conditioning
CRAH	Computer Room Air Handler
ERE	Energy Reuse Effectiveness
ERF	Energy Reuse Factory
Exabitti	10^{18} = tuhat miljardia gigabittiä
FES	Flywheel Energy Storage
GPU	Graphics Processing Unit
IoT	Internet of Things
IT	Informaatioteknologia
LED	Light- emitting Diode
LTO	Lämmöntalteenotto
NPUE	Net Power Usage Effectiveness
ORC	Organic Rankine Cycle
PCM	Phase Change Material
PUE	Power Usage Effectiveness
SSD	Solid-state Drive
TIA	Telecommunications Industry Association
UPS	Uninterruptible Power Supply

1 JOHDANTO

Suuren kokoluokan datakeskukset ovat lisääntyneet huomattavasti viime vuosina. Tilastojen mukaan teollistuneiden maiden energiankulutuksesta noin 1,5–3,0 % kuluu datakeskuksissa, joissa käytetty sähköenergia muuntuu lopulta lähes kokonaan lämpöenergiaksi.

Tämän opinnäytetyön tarkoitus on antaa lukijalle yleiskäsitys moderneista datakeskuksista sekä tarkastella datakeskuksissa syntyvän lämpöenergian hyödyntämismahdollisuuksia. Työssä perehdytään syvällisemmin hukkalämmön hyödyntämiseen liittyviin teknologioihin ja tarkastellaan niiden teknisiä ratkaisuja sekä soveltuvuutta datakeskusten yhteyteen.

Työssä tarkastellaan teollisen mittakaavan datakeskuksia, joissa tehot ovat usein kymmeniä megawatteja. Työ on rajattu käsittelemään teknologioita, joiden järjestelmätehot on mahdollista kasvattaa megawattiluokkaan. Työssä ei käsitellä termo- ja piezosähköisiä prosesseja.

Suuret teknologiayritykset kuten Google, Yandex ja Facebook ovat hyviä esimerkkejä osoittamaan Suomen ja muiden Pohjoismaiden soveltuvuudesta datakeskusten sijoituspaikaksi.

Työn toimeksiantajana toimi CTS Engtec Oy. Saatuja tuloksia käytetään pohjana datakeskushankkeiden konseptisuunnitteluvaiheissa sekä tuomaan lisäinformatiota siitä, minkälaista lisäarvoa hukkalämmön hyödyntämisellä on mahdollista saavuttaa.

Osana työtä toteutettiin myös kyselytutkimus, jolla kartoitettiin kotimaisten kaukolämpötoimittajien kiinnostusta hyödyntää datakeskusten hukkalämpöä osana liiketoimintaansa.

2 DATAKESKUKSET

Datakeskusten historia juontaa 2000-luvun alun IT-kuplaan, jolloin yrityksille syntyi tarve nopeille internet-yhteyksille ja 24/7 -käytettävyydelle. Harvalla yrityksellä oli kuitenkaan resursseja investoida omaan palvelinlaitteistoon. Tämä avasi markkinat uusille palvelinkeskustoimijoille.

Suuren kokoluokan datakeskukset ovat lisääntyneet huomattavan nopeasti ja lähitulevaisuudessa keskusten lukumäärän arvioidaan kasvavan edelleen eksponentiaalisesti.

Yksityishenkilöiden lisäksi lähes jokainen yritys liiketoiminta-alastaan riippumatta käyttää tietoteknologiaa hyödykseen. Mobiilidatan käyttö, videoiden suoratoisto ja pilvipalveluiden nopea yleistymisen ovat synnyttäneet täysin uuden tarpeen suurille datakeskuksille. Datakeskukset ovat tänä päivänä merkittävässä roolissa teknologiayritysten liiketoiminnassa.

Vuoden 2015 loppuun mennessä vuotuisen internet-liikenteen odotetaan rikkovan 1000 exabitin rajan. Tällöin internetin vuotuinen tietoliikenne olisi lisääntynyt 3300 % verrattuna vuoden 2005 lukemiin (Nissilä, Eho & Kokkonen 2014).

Lähitulevaisuudessa tallennuskapasiteetin on lisääntyttävä entistä voimakkaammin IoT:n (Internet of Things) yleistymisen myötä. Vuoteen 2020 mennessä pelkästään Eurooppaan on arvioitu syntyvän 60 uutta suuren mittaluokan datakeskusta (Nissilä ym. 2014).

2.1 Datakeskusten luokittelu

Datakeskukset voidaan jakaa käyttötarkoituksensa mukaan karkeasti kahteen ryhmään. Ensimmäinen on suurten teknologiayritysten omistamiin ja hallinnoimiin datakeskuksiin, jotka palvelevat pääasiassa yrityksen omia tarpeita. Tällaisia ovat esimerkiksi Google Haminassa sekä Yandex Mäntsälässä.

Toinen yleinen tyyppi on niin sanottu colocation -keskus, joka eroaa edeltävistä vuokraamalla palvelintoimintoja muille yrityksille. Tämän tyyppiset keskukset kasvattavat suosiotaan, sillä ne vastaavat pienten ja keskisuurten yritysten

IT- tarpeisiin. Tätä tyyppiä tulee edustamaan myös Soneran palvelinkeskus Helsingin Pitäjämäessä.

2.2 Energiatohokkuuden mittaaminen

Jatkuva energiakulutuksen mittaaminen on välttämätöntä energiatohokkuuden parantamisen kannalta. Datakeskusten energiatohokkuutta voidaan mitata useilla eri menetelmillä. Mittausmenetelmät on kehittänyt IT-alan kansainvälinen konsortio the Green Grid (The Green Grid 2010).

Energiatiheys

Energiatiheys on IT-laitteistojen sähkötehon sekä datakeskuksen pinta-alan suhdeluku. Normaalisti energiatiheys on välillä 0,5–1,0 kW/m². Suhdeluku ei suoraan kerro keskuksen energiatohokkuudesta, vaan se kuvaa keskuksen täyttöastetta, eli kuinka tiiviisti keskus on täytetty IT-laitteilla. (Motiva 2010.) Uudemman sukupolven datakeskuksissa energiatiheys voi olla jopa kymmenen kertaa suurempi nykyisiin verrattuna (Ebrahimi, Jones & Fleischer 2013, 623–624).

PUE

Power Usage Effectiveness eli PUE on yleisimmin käytetty energiatohokkuutta kuvaava tunnusluku, joka kertoo, kuinka suuri osa keskuksen syötetystä energiasta kuluu IT-laitteisiin. PUE lasketaan kaavan 1 mukaisesti.

$$PUE = \frac{P_{tot}}{P_{IT}} \geq 1 \quad (1)$$

jossa	<i>PUE</i>	<i>Power Usage Effectiveness</i>	
	P_{tot}	Kokonaisteho	[kW]
	P_{IT}	Palvelimien teho	[kW]

Kokonaisteho koostuu kaikkien järjestelmien yhteenlasketusta tehosta (jäähdytyslaitteisto + sähkönjakelujärjestelmä + IT-laitteisto + valaistus).

Ideaalitilanteessa PUE on 1, tällöin kaikki keskuksen käyttämä energia olisi IT-laitteiden käytössä. Käytännössä lukema on aina yli yhden.

Esimerkki

Datakeskuksen IT-teho on 15 000 kW ja kokonaisteho 18 000 kW, tällöin PUE on 1,2.

$$PUE = \frac{18\,000\text{ kW}}{15\,000\text{ kW}} = 1,2$$

Jäähdytyslaitteiston energiankäyttöä tehostamalla saadaan keskuksen kokonaistehoa pudotettua 1 000 kW, tällöin PUE muodostuu seuraavasti:

$$PUE = \frac{17\,000\text{ kW}}{15\,000\text{ kW}} = 1,13$$

PUE:n käyttämisestä on myös kritisoitu, koska se asettaa erilaisiin lähtökohtiin datakeskukset, jotka sijaitsevat viileämmässä ilmastossa ja käyttävät näin vähemmän energiaa jäähdytykseen kuin lämpimimmillä alueilla sijaitsevat keskuksat. Myös IT-laitteistojen teho vaikuttaa suoraan lukemaan: osakuormalla toimivan keskuksen PUE on siis huonompi kuin täydellä kuormalla toimivan vastaavan datakeskuksen. PUE ei myöskään huomioi hukkalämmön hyödyntämistä.

ERE

Energy Reuse Effectiveness on energiantehokkuusmittari kuten PUE:kin. Se kuitenkin huomioi syntyneen lämpöenergian hyödyntämisen. Mittausmenetelmä on aiemmin tunnettu nimellä Net Power Usage Effectiveness (NPUE). ERE lasketaan kaavan 2 mukaisesti.

$$ERE = \frac{E_{tot} - E_{reuse}}{E_{IT}} = \geq 0 \quad (2)$$

jossa	<i>ERE</i>	Energy Reuse Effectiveness	
	<i>E_{tot}</i>	kokonaisenergia	[kWh]
	<i>E_{reuse}</i>	uusiokäytetty energia	[kWh]
	<i>E_{IT}</i>	IT laitteiden energia	[kWh]

ERE-arvo on ideaalitalanteessa 0, tällöin 100 % datakeskuksessa syntyneestä lämpöenergiasta saadaan hyödynnettyä.

ERE:n lisäksi käytetään ERF-lukua, jolla kuvataan uusiokäytetyn energian suhdetta kokonaisenergiaan. ERF lasketaan kaavan 3 mukaisesti.

$$ERF = \frac{E_{reuse}}{E_{tot}} = \leq 1 \quad (3)$$

jossa	ERF	Energy Reuse Factor	
	E_{reuse}	uusiokäytetty energia	[kWh]
	E_{tot}	kokonaisenergia	[kWh]

ERF-arvo asettuu välille 0–1. Ideaalitalanteessa suhdeluku on 1, jolloin kaikki energia uusiokäytettäisiin. Vastaavasti arvon ollessa 0 energiaa ei uusiokäytetä lainkaan.

Esimerkki

Teholtaan 17 000 kW datakeskuksen kokonaisenergiankulutus vuorokauden aikana on 408 000 kWh, josta IT-laitteiston osuus on 360 000 kWh. Lisätään olettamus, että laitoksen hukkalämpöä saadaan hyödynnettyä 72 000 kWh.

$$ERE = \frac{408\,000\text{ kWh} - 72\,000\text{ kWh}}{360\,000\text{ kWh}} = 0,93$$

ERE-lukema on siis 0,93. Tämä ei kuitenkaan kerro suoraan datakeskuksen energiatehokkuudesta. Yhdessä PUE-luvun 1,13 kanssa voidaan arvioida datakeskuksen kokonaistehokkuutta. Lasketaan myös ERF-arvo:

$$ERF = \frac{72\,000\text{ kWh}}{360\,000\text{ kWh}} = 0,2$$

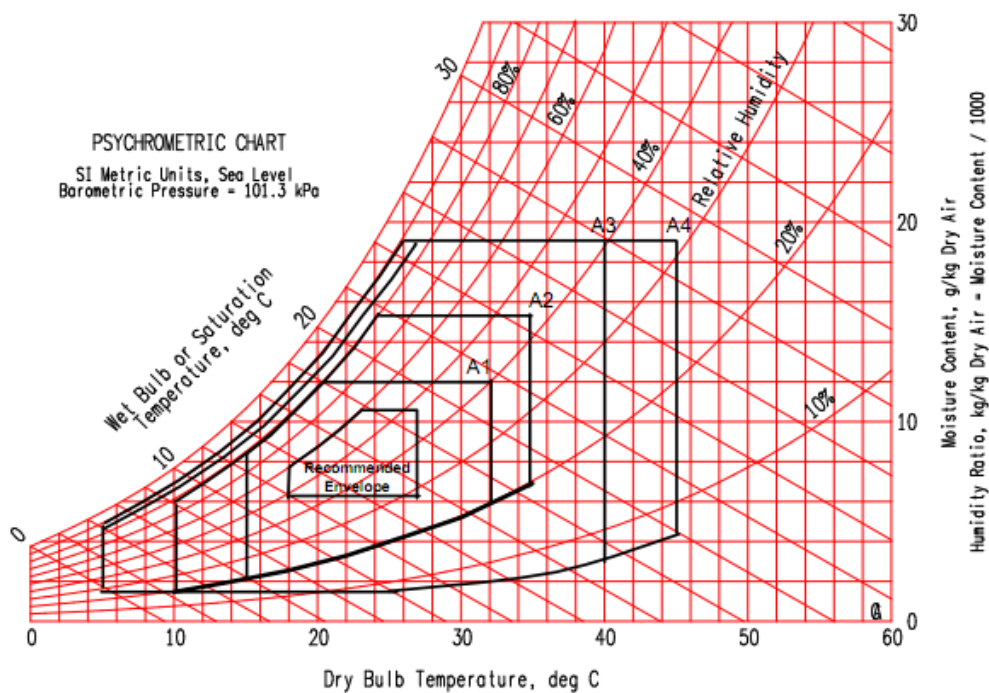
ERF on 0,2 eli IT-laitteiston hukkalämmöstä hyödynnetään 20 %.

2.3 Datakeskusten standardit

Luvussa esitellään tämän työn kannalta keskeisimmät datakeskuksiin vaikuttavat standardit.

2.3.1 ASHRAE Thermal Guidelines

The American Society of Heating, Refrigerating and Air Condition Engineers (ASHRAE) on laatinut datakeskusten operointiin ja toimintaympäristöihin soveltuvan standardin. Standardissa määritellään ohjearvot laitetilojen lämpötiloille ja ilmankosteuksille sekä luokitellaan ne neljään luokkaan A1–A4. Luokitukset suositeltuine raja-arvoineen löytyvät kuvasta 1.



Kuva 1. ASHRAE Thermal Guidelines luokitukset suositeltuine raja-arvoineen. (Van Geet 2014, 9.)

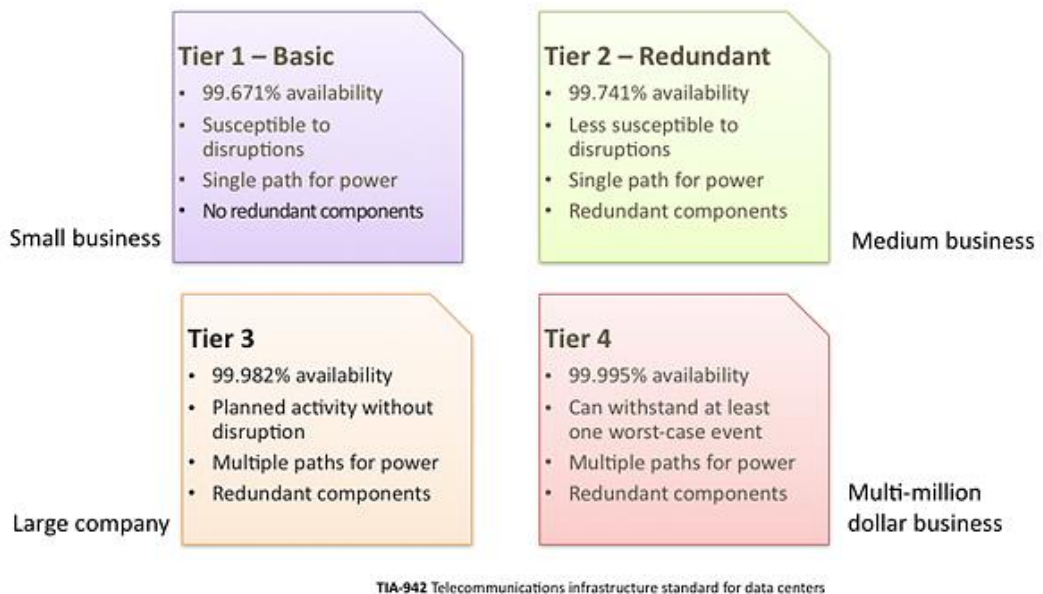
Standardin on tarkoitus yhdenmukaistaa datakeskusten suunnittelua ja vähentää energiankulutusta. Jäähdytyksen optimoinnilla voidaan saavuttaa huomattavia energiansäästöjä. Tyypillinen datakeskus sijoittuu luokkaan A1 (Van Geet 2014).

2.3.2 TIA-942 Data Center Standard

Telecommunications Industry Association julkaisi vuonna 2005 standardin TIA-942. Standardin tarkoitus on yhtenäistää datakeskusten toiminnalliset osat ja siten keventää suunnittelutyötä.

Standardi koostuu neljästä osa-alueesta: datakeskusten rakenteesta, kaapeloinneista, saatavuudesta sekä ympäristöolosuhteista.

Tärkeänä osana standardia on datakeskusten saatavuusluokittelu, joka voidaan myös käsittää datakeskuksen kykyä sietää häiriötilanteita. Luokituksen on toteuttanut amerikkalainen Uptime Institute. (Uptime Institute 2010.) Se kuvaa prosentuaalisesti aikaa, jolloin keskuksen tallennettu data on saatavilla. Datakeskukset luokitellaan neljään Tier-kategoriaan ja standardi määrittää kullekin tasolle vaaditun suorituskyvyn sekä käytettävyyssasteen. Kuvassa 2 on havainnollistettu keskeisimmät Tier-luokitusten erot.



Kuva 2. Uptime Instituten Tier-luokitukset ja niiden erot. (Uptime Institute 2010, 6.)

Tier 1. Datakeskuksen käytettävyyssasteen tulee olla 99,671 % (vuotuinen seisokkiaika $\leq 28,8$ h), yksinkertainen sähkönsyöttö, ei varavoimavarmennusta. Kärsii huoltokatkoista sekä suunnittelemattomista virtakatkoista.

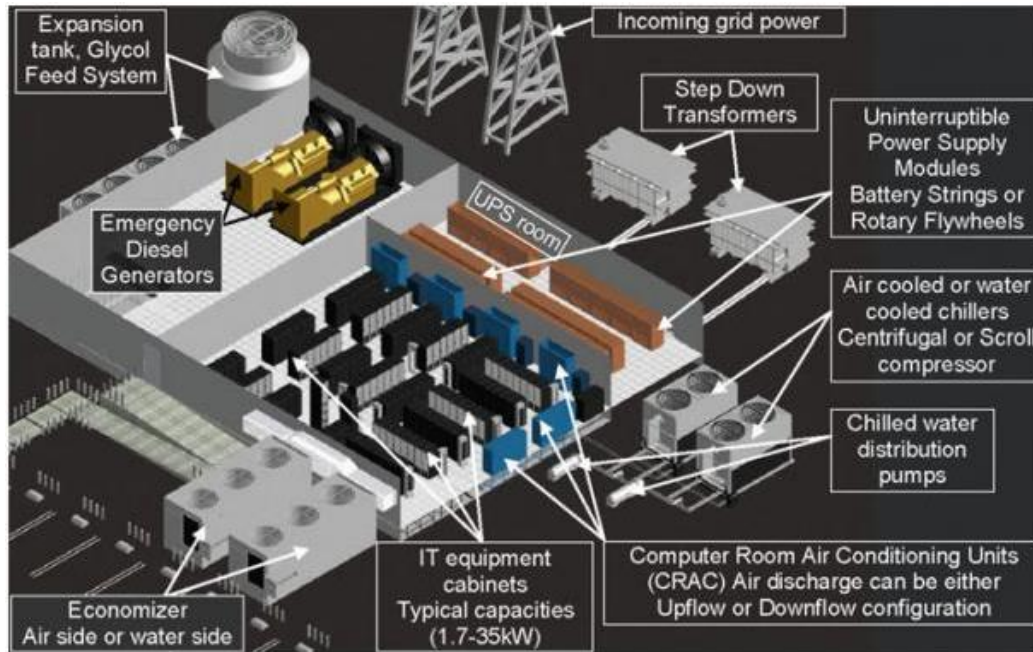
Tier 2. Datakeskuksen käytettävyyssasteen tulee olla 99,741 % (vuotuinen seisokkiaika $\leq 22,0$ h), yksinkertainen sähkönsyöttö, varavoimavarmennettu. Parempi häiriötilanteiden sietokyky kuin Tier 1 -luokitelluilla keskuksilla.

Tier 3. Datakeskuksen käytettävyyssasteen tulee olla 99,82 % (vuotuinen seisokkiaika $\leq 1,6$ h), useita sähkönsyöttöjä, useita varavoimavarmennuksia. Kestää suunnitellut sähkökatkot ilman häiriötä IT-kuormalle.

Tier 4. Kriittisin luokitus. Datakeskuksen käytettävyyssasteen tulee olla 99,995 % (vuotuinen seisokkiaika $\leq 0,4$ h), useita sähkönsyöttöjä. Useita varavoimavarmennuksia. Kestää ainakin yhden suunnittelelemattoman häiriötilanteen ilman merkittävää vaikutusta IT-kuormaan. Kulunvalvonta on tiukin. (Uptime Institute 2010.)

2.4 Datakeskusten tekniikka

Datakeskusten sisältämä tekniikka jaetaan neljään osaan: sähkönjakelujärjestelmään, jäähdytysjärjestelmään, IT-järjestelmään sekä muihin järjestelmiin. IT-järjestelmä on usein hyvin optimoitu ja näin ollen energiatehokas. Muut kolme järjestelmää puolestaan ovat kohteita, joihin on syytä kiinnittää huomiota energiatehokkuutta parannettaessa. Kuvassa 3 on esitetty tyypillisen datakeskuksen layout, josta ilmenee tekniikan sijoittuminen.



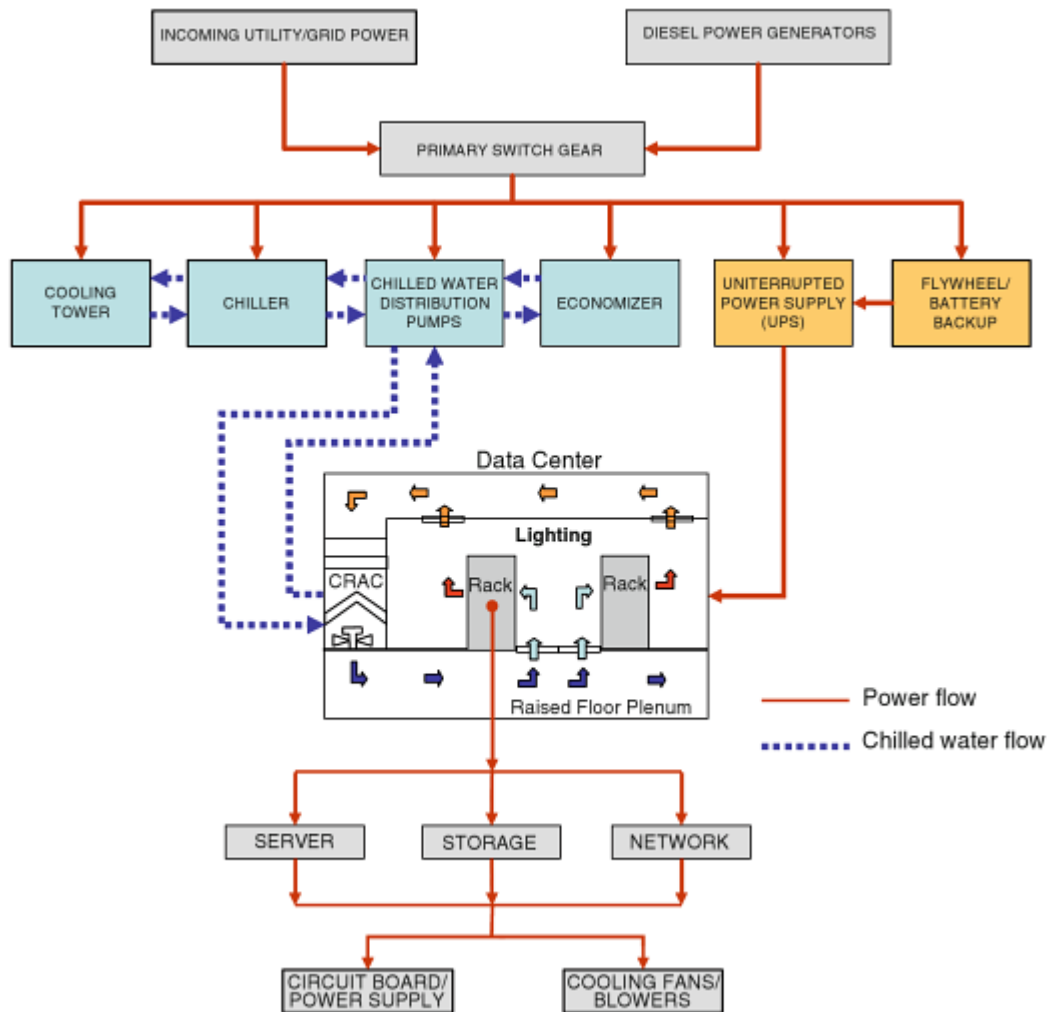
Kuva 3. Tyypillinen datakeskuksen layout. (Joshi & Kumar 2012, 2.)

Datakeskusten järjestelmien toiminta on hyvin kriittistä liiketoiminnan kannalta. Erityisesti colocation-tyyppisissä keskuksissa saattaa suunnittelematon seisokki aiheuttaa mittavia tappioita laitteiden vuokraajille. Ponemon Instituten vuoden 2016 raportin mukaan keskimääräinen suunnittelematon seisokkiaika maksaa noin 8850 \$/min (Draper 2016).

2.4.1 Sähkönjakelujärjestelmä

Virranjakelujärjestelmä koostuu eri tehoisista muuntajista, varavirtajärjestelmistä, akuista sekä generaattoreista. Tyypillisesti isot datakeskukset on kytketty valtakunnalliseen 110 kV siirtoverkkoon. Korkeajännite muunnetaan keskitason jännitteeksi (10–20 kV), joka on yleinen siirtojännite datakeskuksen sisällä. Lopullinen IT-laitteistoa syöttävä jännitekiskosto on yleisesti kolmivaiheinen voimavirtakisko (400 V). Käytetyissä jännitetasoissa on maakohtaisia eroja.

Keskuksissa on yleensä kaksi toisistaan riippumatonta syöttöä: päävirransyöttö valtakunnan verkosta sekä varavirransyöttö generaattoreilta. Jos päävirransyöttö jostain syystä häiriintyy, kytkeytyvät generaattorit automaattisesti päälle. Kuvassa 4 havainnollistetaan virranjakelujärjestelmän rakennetta. Punaiset linjat kuvaavat sähköliityntöjä.



Kuva 4. Tyypillinen datakeskuksen sähköjakelujärjestelmä. (Joshi & Kumar 2012, 10.)

Generaattorien taajuuden synkronointiin kuluva aika on yleensä noin 30 sekuntia. Tämä aika katetaan joko rakkien sisäisellä akkuvarmennuksella, UPS-laitteistoilla tai vastaavalla lyhytaikaisen tehon tuotantoon soveltuvalla järjestelmällä, kuten Flywheel Energy Storage (FES). Usein UPS-järjestelmätkin ovat kahdennettuja häiriötilanteiden ja huoltotoimien helpottamiseksi.

Datakeskus sähköverkon säätövoimana

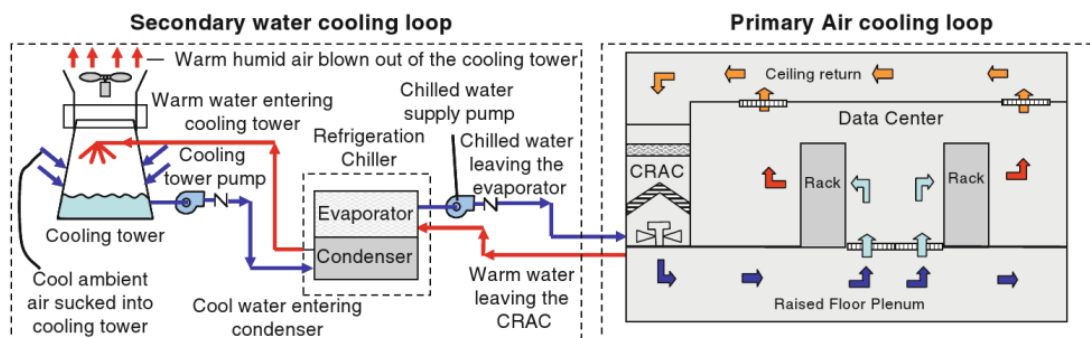
Datakeskusten mittava varavoimakapasiteetti mahdollistaa niiden nopean irroittautumisen valtakunnan verkosta. Tämä mahdollistaa esimerkiksi Datakeskusten hyödyntämisen sähköverkon säätövoimana. Kantaverkkoa hallinnoivalle Fingridille voivat jättää säätötarjouksia kaikki tahot, jotka kykenevät tuottamaan vähintään 10 MW tehomuutoksen 15 minuutin kuluessa.

Säätövoimalajeja on useita erilaisia. Datakeskukset soveltuisivat esimerkiksi osaksi taajuusohjattua säätöreserviä. Edellytyksenä tähän on nopea vasteai-

ka, joka ei datakeskuksille ole ongelma. Tulevaisuudessa keskuksset voisivatkin toimia osana älykästä sähköverkkoa. (Fingrid 2015.)

2.4.2 Jäähdytysjärjestelmä

Jäähdytysjärjestelmä on datakeskusten toiminnan kannalta yksi keskeisimpiä elementtejä. Järjestelmän toiminta perustuu lämmönsiirtoketjuun, jossa serverien tuottama lämpö siirretään lämpönieluun. Lämmönsiirtoketjussa on useita vaiheita. Ensimmäisessä vaiheessa serverien lämpö siirretään primäärijäähdytyskiertoon. Tämä tapahtuu yleensä ilma/vesi- lämmönvaihtimen avulla (CRAC). Toisessa vaiheessa lämpöenergia siirretään toisella lämmönvaihtimella (yleensä vesi/vesi) lopulliseen lämpönieluun. Kuvassa 5 on esitetty yleisesti käytössä oleva jäähdytysjärjestelmä, jossa näkyy primääri- sekä sekundaarijäähdytyspiiri.



Kuva 5. Havainnekuva yleisesti käytetystä jäähdytysjärjestelmästä. (Joshi & Kumar 2012, 44.)

Datakeskuksessa 30–50 % käytetystä energiasta kuluu jäähdytykseen (Dai, Ohadi, Das & Pecht 2014, 47). Datakeskuksen sijoittaminen viileään ilmastoon tuo merkittävän energiasäästön, kun perinteisen mekaanisen jäähdytyksen sijaan voidaan hyödyntää ympäristön viileyttä jäähdytyksessä. Tämä näkyy myös suoraan keskuksen PUE-luvussa ja operointikustannuksissa.

Ympäristön lämpöolosuhteiden hyödyntämistä jäähdytyksessä kutsutaan vapaajäähdytykseksi. Vapaajäähdytystä hyödynnettäessä lämpönieluna voidaan käyttää esimerkiksi järviä, jokia, merta tai ulkoilmaa.

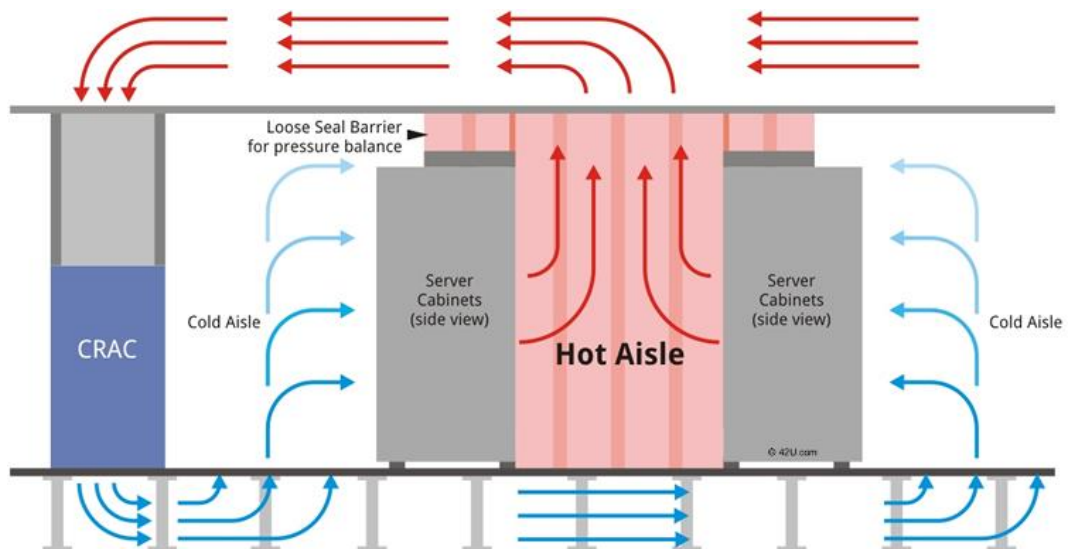
Energiankäytön kannalta edullisinta on jäähdyttää mahdollisimman vähän. Arvioiden mukaan perinteisessä mekaanisista jäähdytystä hyödyntävässä datakeskuksessa voidaan säästää 4–5 % energiankulutuksessa jokaista primääri-

jäähdytyspiirin korotettua yhden celsiusasteen asetusarvomutosta kohden (Dai ym. 2014, 31). Usein datakeskusten IT-laitteistoja jäähdyttävän jäähdytysveden/ilman lämpötila on 20–24 °C, joka on turhan alhainen. Jäähdytyslämpötilan voisi nostaa esimerkiksi lähemmäs 27 °C:een ilman vaikutusta laitteiden elinkaareen. 27 °C on ASHRAE standardin suurin suositeltu lämpötila IT-laitteistolle. (Motiva 2010.)

Ideaalitilanteessa voidaan järjestelmien jäähdytys toteuttaa vuoden ympäri hyödyntäen vain ympäristön kylmää ilmaa tai vesistöä.

Primäärijäähdytyksen periaate

Primäärijäähdytyksellä tarkoitetaan lämmönsiirtoketjun ensimmäistä vaihetta, jossa servereiden tuottama lämpö siirretään ensimmäiseen lämpönieluun. Useimmiten käytetty menetelmä siirtää servereiden tuottama lämpö eteenpäin on ilmajäähdytys. Serveriräkkien takapuolelle rakennetaan kuumakäytävät (Hot Aisle), jolloin räkkien etupuolelle jäävän kylmäkäytävän (Cold Aisle) yli-paineinen jäähdytysilma kulkee servereiden läpi. Kuumakäytävään siirtyvä lämmennyt ilma nousee luonnostaan ylöspäin ja paine-eron takia se siirtyy CRAC-yksiköille (Computer Room Air Conditioning), jossa lämmennyt ilma jäähdytetään. Kuvassa 6 esitetään jäähdytysilman liikkuminen.



Kuva 6. Periaatekuva ilmassojen liikkumisesta konesalissa. (42U Data Center Solutions 2009.)

CRAC-yksiköiltä lämpö siirretään eteenpäin varsinaiseen jäähdytysjärjestelmään, joita käsitellään myöhemmin tässä kappaleessa. Tehokkainta on eristää kylmä ja kuumailmakäytävät toisistaan. Tällä vältetään turhaa ilmassojen liikuttelua sekä kohdennetaan jäähdytys juuri servereihin eikä ympäröi-

vään ilmaan. Serverit sijoitetaan juuri tästä syystä riveihin, jolloin räkit toimivat kylmän ja kuuman ilman erottajina. Ilmamassojen sekoittuminen voi vähentää jäähdytystehoa jopa 50 % (Motiva 2010).

Tulevaisuudessa jäähdytysjärjestelmät tulevat todennäköisimmin hyödyntämään enemmän nestettä lämmön kuljettimena. Kun syntynyt lämpö saadaan siirrettyä nesteeseen heti serverien läheisyydessä, säästetään energiaa, joka muuten kuluisi puhaltimien liikuttaessa ilmamassoja. Kyseistä tekniikka hyödynnetään jo teollisessa mittakaavassa.

Toinen näkökanta on prosessorien ja elektroniikan kehittyminen. Vielä tois- taiseksi kehitys on noudattanut Mooren lakia, jonka mukaan mikroprosesso- rien transistorien lukumäärä kaksinkertaistuu noin kahden vuoden välein (Intel 2015). Mikäli kehitys jatkuu kuten tähän asti, mikropiirien koko pienenee ja te- ho kasvaa. Tällöin perinteinen ilmajäähdytys on riittämätön siirtämään syntyvä lämpö pois. (Dai ym. 2014, 161–162).

Lämmönsiirto voidaan maksimoida upottamalla elektroniikka suoraan dielekt- riseen nesteeseen tai prosessorien pintaan asennettavilla nestejäähdytysjär- jestelmillä. Suora nestekosketus poistaa tarpeen useilta tällä hetkellä käytössä olevilta laitteistoilta, kuten CRAC/CRAH-yksiköiltä sekä mahdollistaa kompak- timman tilankäytön, kun kylmä- ja kuumailmakäytäviä ei tarvita. Intel on rapor- toinut upotusjäähdytyksen vähentävän datakeskuksen energiankulutusta jopa 90 %. (Shah 2014)

Syntyneen lämpöenergian uudelleenhyödyntäminen yksinkertaistuisi huomattavasti, jos massiivisia puhallinjärjestelmiä sekä ilma/vesi-lämmönsiirtimiä ei tarvittaisi. Myös lämmönsiirtymisen lämpötilahäviöt pienenisivät, kun häviölliset ilma-vesi-rajapinnat vähenisivät. Nestejäähdytystä hyödyntämällä on myös mahdollista käyttää nykyistä lämpimämpää vettä jäähdytykseen.

Sekundäärijäähdytys

Sekundäärijäähdytyksellä tarkoitetaan lämmönsiirtoketjun viimeistä vaihetta, jossa syntynyt lämpöenergia siirretään primäärikierrosta eteenpäin, lopulliseen lämpönieluun.

Suora ilmajäähdytys

Suorassa ilmajäähdytyksessä käytetään datakeskuksen jäähdytykseen puhdistettua ulkoilmaa. Käyttämällä sijaintipaikan ilmaston viileyttä hyödyksi säästetään energian säästö, kun ilmaa ei tarvitse jäähdyttää koneellisesti. Energiaa kuluu ainoastaan ilman liikuttamiseen. Ilmajäähdytystä hyödyntävät datakeskukset soveltuvat hyvin Suomen ilmasto-olosuhteisiin. Esimerkiksi Yandexin datakeskus Mäntsälässä hyödyntää suorilmajäähdytystä.

Ilmajäähdytyksen rajoittavia tekijöinä ovat ilmankosteus sekä lämpötila. Pohjoisen ilmaston luonteeseen kuuluu yleisesti lämpötilojen vaihtelu pitkin vuotta: talvet ovat kylmiä ja kesät verrattain lämpimiä. Kesäisin suorilmajäähdytyksessä saattaa syntyä tilanteita, jolloin jäähdytysilman lämpötila kohoaa yli asetusarvojen. Suositellut lämpötila ja kosteusrajat määritellään alan standardeissa. Näitä ”jäähdytyshuippuja” varten keskuksissa on usein varajärjestelmä, joka kykenee lisäjäähdytykseen, kuten lämpöpumppu tai vesisumutusjärjestelmä. Ilmajäähdytyksessä käytetään lämpönieluna luonnollisesti ulkoilmaa, ellei syntyvää lämpöä muuten hyödynnetä.

Vapaa vesijäähdytys

Vapaa vesijäähdytys hyödyntää ympäristöstä saatavaa kylmää vettä. Prosessissa on vesi/vesi -lämmönvaihdin, jonka avulla primäärikierron lämpöenergia siirretään lopulliseen lämpönieluun. Vesijäähdytyksessä voidaan hyödyntää makeaa tai suolaista vettä. Rajoittavana tekijänä vapaassa vesijäähdytyksessä on hyödynnettävä veden lämpötila.

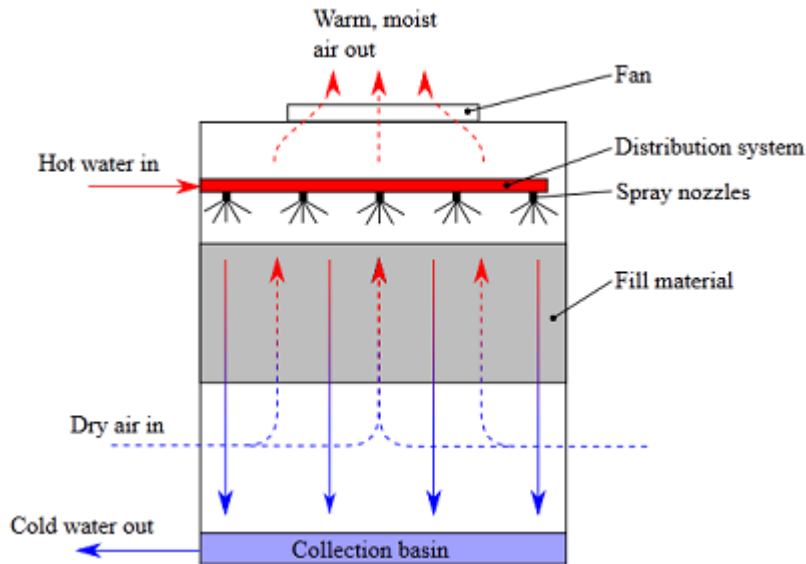
Kuten ilmajäähdytteisissäkin järjestelmissä, myös vesijäähdytyksen yhteydessä on usein ”jäähdytyshuippujen” varalle järjestelmä kuten lämpöpumppu, jolla saadaan toteutettua tarvittava lisäjäähdytys. Suomen etelärannikon olosuhteissa voidaan 100 % vapaajäähdytystä hyödyntää 9–10 kk vuodessa.

Googlen datakeskus Haminassa hyödyntää suoraa merivesijäähdytystä. Kuvassa 7 näkyvillä lämmönvaihtimilla siirretään syntynyt lämpöenergia jäähdytysveteen. Meriveden kierto on avoin, lämmönvaihtimien läpi kierrettyään vesi ohjataan takaisin mereen tai vesistöön, joka toimii lämpönieluna.



Kuva 7. Googlen Haminan datakeskus hyödyntää suoraa merivesijäähdytystä. (Anthony 2012.)

Vesijäähdytyksen yhteydessä on myös mahdollista käyttää jäähdytystorneja. Jäähdytystornia käytettäessä lämpönieluna toimii ulkoilma. Järjestelmässä suljetusta primäärikierrosta lämpöenergia siirretään vesi/vesi lämmönvaihtimen välityksellä jäähdytystornin kiertoon. Jäähdytystornissa voi olla avoin tai suljettu kierto. Avoimessa kierrossa vesi sumutetaan haihdutuskennoon, jolloin osa vedestä haihtuu ja luovuttaa samalla energiaa ympäröivään ilmaan. Haihtumiseen kuluva energia laskee veden lämpötilaa alle ympäröivän ulkoilman lämpötilan, jonka jälkeen jäähtynyt vesi palaa kiertoon. Jäähdytystornien toiminta on yksinkertaista. Kuvassa 8 on esitetty avoimen kierron tornin toimintaperiaate.

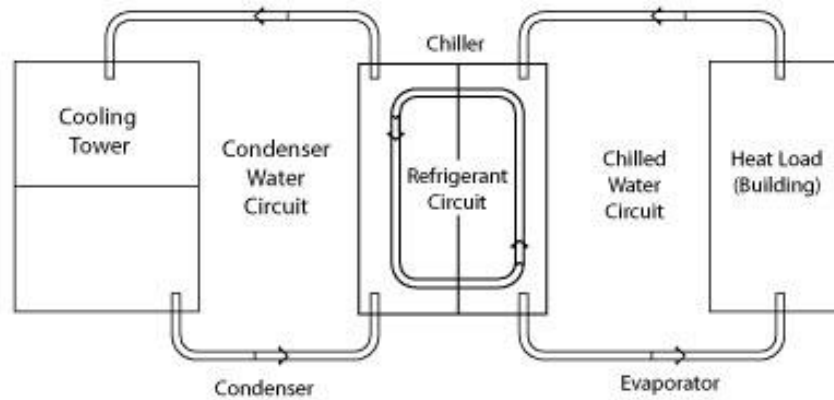


Kuva 8. Jäähdytystornin toimintaperiaate. (Midwest Cooling Towers 2012.)

Kennosto tehostaa haihtumista hajottamalla veden pienemmiksi pisaroiksi, jolloin haihdutuspinta-ala kasvaa. Tornien huipulla on tuuletin, jolla voidaan säätää tornin läpi kulkevaa ilmavirtaa ja näin vaikuttaa jäähdytystehoon. Jäähdytystornien kiertoon on säännöllisesti lisättävä vettä, jolla korvataan haihtunut vesimäärä. Avointa kiertoa hyödyntävissä jäähdytystorneissa vesi alkaa ajan myötä haihtumisen johdosta likaantumaan. Veden liiallinen likaantuminen estetään poistamalla säännöllisesti pieni osa kiertävästä vedestä, joka korvataan jälleen puhtaalla vedellä. Suljetussa tornikierrrossa jäähdytettävä neste ei ole lainkaan kosketuksissa ulkoilman kanssa jolloin se ei myöskään likaannu.

Mekaaninen jäähdytys

Mekaanisessa jäähdytyksessä lämmön siirtämiseen prosessista käytetään kompressori tai sorptio menetelmään perustuvaa laitteistoa. Maailmanlaajuisesti mekaaninen jäähdytys on ylivoimaisesti eniten käytetty menetelmä datakeskusten jäähdytyksessä (Motiva 2010). Prosessin toimintaperiaate on lähes sama kuin vapaajäähdytystä hyödyntävissä järjestelmissä. Vapaajäähdytysjärjestelmissä sähkötoiminen chiller on vain korvattu lämmönvaihtimella. Kuvassa 9 esitetään yksinkertainen jäähdytyskierto, jossa on lisäjäähdytysjärjestelmä (chiller).



Kuva 9. Prosessikuvaus mekaanisesta jäädytyksestä. (Baltimore Aircoil Company 2015.)

Teknisesti myös pelkkää vapaajäädytystä hyödyntävät prosessit varustetaan usein 3- tie venttiileillä, jotka mahdollistavat lisäjäädytysjärjestelmän lisäämisen myöhemmin prosessiin.

2.4.3 IT-järjestelmä

Datakeskusten ydin on IT-järjestelmä, johon lukeutuvat serverit, massamuistit, reitittimet, kytkimet ja kaapeloinnit sekä muut järjestelmien ylläpitoon käytetyt laitteistot. Datakeskusten tärkein tehtävä on varastoida tietoa ja tarjota luotettava pääsy siihen.

IT-järjestelmän optimointi on yksi parhaista keinoista parantaa datakeskuksen energiatehokkuutta. Esimerkiksi tavanomaisten massamuistien korvaaminen solid-state drive (SSD) muisteilla tehostaa IT-järjestelmän energiankäyttöä. SSD muistit kuluttavat noin 50 % vähemmän energiaa tavanomaiseen massamuistiin verrattuna (Dai ym. 2014, 15).

2.4.4 Muut järjestelmät

Sekalaiset järjestelmät koostuvat datakeskusten talotekniikasta kuten valaistus ja paloilmoinjärjestelmistä. PUE laskelmissa sekalaiset järjestelmät ovat ilmoitettu usein vain valaistusjärjestelmänä. Valaistus on keskusten suuren koon vuoksi suuri yksittäinen energiankuluttaja. Muut järjestelmät, kuten paloilmoinjärjestelmä, jätetään sen vähäisen energiantarpeen vuoksi usein mainitsematta. Valaistukseen käytettyyn energiaan on helppo vaikuttaa hyödyntämällä liiketunnistustekniikkaa sekä led valaisimia.

2.5 Ympäristötekijät

Datakeskusten sijoitusympäristöön vaikuttavia tekijöitä on useita. Keskeisimpiä tekijöitä ovat hyvät internetyhteydet, energian toimitusvarmuus, ilmasto, geologinen sekä poliittinen vakaus. Seuraavassa tarkastelussa käydään läpi miten Suomi täyttää datakeskusten asettamat ympäristövaatimukset.

Yhteydet

Tiedonsiirtonopeudet ja latenssit (siirtoviive) muihin datakeskuksiin sekä data-liikenteen solmukohtina toimiviin kaupunkeihin ovat keskeisiä tekijöitä datakeskusten sijoittumiselle. Suomen tietoliikenne kulkee nykyisin lähes kokonaan Ruotsin kautta. Se vaikuttaa tarjolla olevaan kaistanleveyteen sekä tietoturvallisuuteen. Kansainvälisessä datakeskusten riski-indexi tutkimuksessa Suomi sijoittuikin kaistanleveyksien vertailussa vasta sijalle 22 (Cushman & Wakefield 2013).

Ruotsissa nykyinen lainsäädäntö antaa valtion signaalintiedustelulle luvan tarkkailla maan halki kulkevaa tietoliikennettä. Tämä oli yksi osatekijä uuteen Sea-Lion merikaapeli-investointiin, joka tulee käyttöön vuoden 2016 aikana. Kaapeli yhdistää Suomen suoraan Keski-Euroopan dataliikenteeseen ja kasvattaa näin tarjottavaa kaistanleveyttä sekä pienentää latenssia. Suora kuituyhteys Eurooppaan mahdollistaa myös kyberturvallisen tietoliikenteen markkinoinnin, tämä edesauttaa Suomea luomaan mainetta ”tiedon Sveitsinä”. (Huh-
tanen 2015.)

Seuraavan viiden vuoden aikana Euroopan ja Aasian välisen tietoliikenteen odotetaan kasvavan noin 280 % (Nissilä ym. 2015, 8). Nykyisten Eurooppa-Aasia yhteyksien vaihtoehdoksi on esitetty jäämeren koillisväylän kautta kulkevaa merikaapelia. Kaapeli nopeuttaisi tiedonkulkua huomattavasti. Mikäli kaapelin toinen pää sijoittuisi Suomeen, se tarjoaisi lyhimmän mahdollisen tietoliikennereitin Aasiaan. Euroopan ja Aasian yhdistävänä linkkinä toimiminen voisi luoda Suomesta jopa Euroopan digitaalisen infrastruktuurin solmukohtan.

Energia

Datakeskukset ovat toiminnassa kellon ympäri vuoden jokaisena päivänä, näin ollen sähkön toimitusvarmuus on keskeinen tekijä. Suomessa sähköverkon toimintavarmuuden keskiarvo on 99,9998 %. Datakeskusten operatiivisista kuluista energia muodostaa jopa 50–60 %. Energian hinta on siis suoraa sidoksissa laitoksen käyttökuluihin, jolloin keskusten sijoittamisessa on luonnollista huomioida paikallinen energian hintataso, joka Suomessa on yksi Euroopan alhaisimpia. (Nissilä ym. 2015, 8.)

Huhtikuussa 2014 Suomessa otettiin käyttöön datakeskusten sähköveron alennus. Muutoksen mukaan yli 5 MW tehoiset datakeskukset kuuluvat nyt veroluokkaan 2, joka on sama kuin muulla raskaalla teollisuudella. Energiaveron suuruus ilman huoltovarmuusmaksua on 1.1.2016 alkaen 0,69 snt/kWh joka on 1,55 snt/kWh pienempi kuin veroluokkaan 1 mukainen vero.

Tullin julkaiseman asiakasohjeen mukaisesti: *Datakeskuksen tehoon laskeetaan mukaan kaikki konesalissa olevien palvelinten sähkön tarve, niihin välittömästi liittyvien samassa tilassa olevien laitteiden sähkön tarve, konesalissa olevien jäähdytyslaitteiden ja niiden pumppujen sähkön tarve sekä kaikkien valo- ja turvalaitteiden sähkön tarve.* (Tulli 2014)

Muutoksella pyritään houkuttelemaan lisää isoja datakeskustoimijoita maahan.

Maantiede

Kuten aiemmin todettiin, jäähdytysjärjestelmät kuluttavat noin puolet datakeskusten energiasta. Kun keskus sijoitetaan viileän ilmaston alueelle, voidaan vapaajäähdytystä hyödyntää tehokkaasti. Suomi on yksi maailman pohjoisimmista ja kylmimmistä maista (Nissilä ym. 2015, 8). Runsaat vesistöt sekä helposti rakennettavissa oleva vapaa maa ovat myös Suomelle etuna.

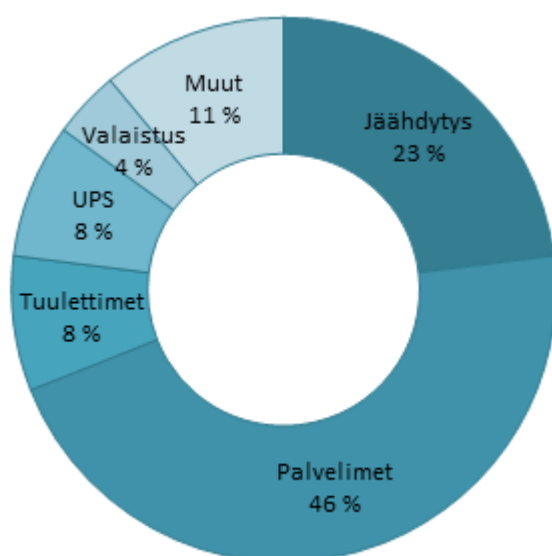
Suomessa on myös vakaa peruskallio sekä vähän sään ääri-ilmiöitä ja muita luonnon katastrofeja. Datakeskusten riskianalyyssissä Suomi sijoittui kärkeen pienimmän luonnonkatastrofiriskin kategoriassa. (Cushman ym. 2015.)

Poliittinen vakaus

Datakeskustoimijoiden kannalta tärkeää on myös sijoitusmaan poliittinen vakaus, joka parantaa liiketoiminnan ennakoitavuutta. Sääntelyn on myös syytä mahdollistaa kansainvälinen tietoliikenne ilman erityistoimia. Suomi on tässä suhteessa etulyöntiasemassa, kun verrataan esimerkiksi Ruotsiin, jossa valtion tiedustelulla on mahdollisuus seurata rajoja ylittävää tietoliikennettä. (Nissilä ym. 2015, 9.)

3 DATAKESKUSTEN ENERGIA

Datakeskusten energiankulutus on nykyarvioiden mukaan 1,5–3,0 % kaikesta maailmanlaajuisesti tuotetusta energiasta (Dai ym. 2014, 4). IT-sektorin aiheuttamat päästöt ovat globaalisti noin kaksi prosenttia kokonaispäästöistä, joka on samaa luokkaa kuin lentoliikenteen päästöt. Päästöistä noin neljännes syntyy laitteiden ja materiaalien valmistusprosesseissa, loput aiheutuvat keskusten operoinnista. Tulevien vuosikymmenien aikana datakeskusten energiankulutuksen on arvioitu kasvavan vuosittain 15–20 %. (Dai ym. 2014 4–5). Energiankulutus jakaantuu yleisimmissä datakeskuksissa kuvan 10 mukaisesti.



Kuva 10. Energian jakautuminen yleisimmissä datakeskuksissa. (Motiva 2010, 4.)

Datakeskukset koostuvat standardikokoisista räkeistä, joihin on asennettu servereitä, kytkimiä ja massamuistiyksiköitä. Sovelluksissa, joissa vaaditaan

paljon laskentatehoa, yksittäisen rakin teho voi olla jopa 60 kW. Yleisesti yksittäisten räkkien tehot asettuvat välille 7–15 kW.

Räkkien käyttämä sähköenergia muuntuu siis elektroniikan välityksellä lämpöenergiaksi. IT-laitteiden CPU, GPU ja muistiyksiköt muodostavat noin 75–90 % syntyvästä lämpökuormasta. (Van Geet 2014.)

Syntyvän lämpöenergian hyödyntäminen on haastavaa sen alhaisen lämpötilan takia. Datakeskusten IT-laitteille tavoitellaan mahdollisimman pitkää elinikää. Tähän vaikutetaan pitämällä elektroniikan lämpötila tasaisena niille suositeltujen raja-arvojen sisällä. Usein mikroprosessorien maksimilämpötilaksi suositellaan 65–85 °C. Massamuisteille suositellut maksimilämpötilat ovat vielä alhaisemmat.

Tutkimuksissa on osoitettu, että prosessoritasolla upotusjäähdytystä tai muita nesteeseen perustuvia kaksivaiheisia jäähdytysmenetelmiä hyödyntämällä on mahdollista nostaa elektroniikkaa jäähdyttävän nesteen lämpötila jopa 60 °C:een. Tutkimus tehtiin yksittäisille prosessoreille. (Zimmermann, Tiwari, Meijer, Paredes, Michel & Poulidakos 2012.) Kuumen veden käyttäminen jäähdyttämiseen perustuu nesteiden parempaan lämmönsiirtokykyyn. Veden lämmönsiirtokyky on noin 1200 kertainen ilmaan verrattuna (Dai ym. 2014, 50). Nostamalla jäähdytysveden lämpötilaa saadaan myös kuumempaa vettä ulos prosessista, jolloin sen uudelleenhyödynnettävyys on helpompaa ja kannattavampaa.

Nykyisistä datakeskuksista suurin osa käyttää ilmaa lämmönsiirtämiseen IT-laitteilta lämpönieluun. Lämmönsiirtoketjussa syntyy siis useita häviöllisiä lämmönsiirtoa vastustavia vaiheita. Näin ollen lopullinen hyödynnettävissä oleva lämpötila asettuu usein välille 35–45 °C. Näin alhaiset lämpötilat ovat haastavia hyödyntää perinteisissä termodynaamisissa prosesseissa. Järjestelmissä, joissa käytetään servereiden jäähdyttämiseen nestettä, hyödynnettävissä olevat lämpötilat asettuvat yleisesti välille 50–60 °C (Ebrahimi ym. 2013, 626).

Energiankulutus Suomessa

Suomessa datakeskusten energiankulutuksen on arvioitu olevan 0,5–1,5 % koko maassa käytetystä sähköstä (Motiva 2010, 4). Vuonna 2014 Suomen sähkön kokonaiskulutus oli 83,3 TWh. Datakeskusten osuus tästä on siis noin 0,42–1,25 TWh, joka muuntuu lopulta lämpöenergiaksi. Vertailun vuoksi Amerikassa datakeskusten energiakulutus oli vuoden 2013 tilastojen mukaan 91 TWh/a (Natural Resource Defence Council 2014).

Vuonna 2014 Suomessa tuotettiin kaukolämpöä 34,7 TWh, tuotannosta $\frac{3}{4}$ tuotettiin CHP laitoksissa ja loput erillisillä lämpökeskuksilla (Energiateollisuus 2014). Erillisillä lämpökeskuksilla tuotettu lämpöenergia on usein kallista ja epäekologista. Mikäli ICT- sektorin kasvuennusteet pitävän paikkansa ja datakeskusten energiankulutus lisääntyy 15–20 % vuodessa, on teoriassa mahdollista korvata erillisillä lämpökeskuksilla tuotettu lämpöenergia datakeskusten hukkalämmöllä jo seuraavan vuosikymmenen aikana.

Hukkalämmön hyödyntäminen kaukolämmöksi edellyttää kuitenkin teknistaloudellisten reunaehtojen täyttymistä, joita käsitellään tarkemmin luvussa 4. Seuraavassa luvussa perehdytään myös tarkemmin muihin mahdollisiin hukkalämpöä hyödyntäviin sovelluksiin.

4 HUKKALÄMMÖN HYÖDYNTÄMINEN JA TALTEENOTTO

Datakeskusten hukkalämpö poikkeaa usealla tavalla perinteisten teollisuusprosessien hukkalämmöstä. Lämmöntuotannon pysyvyys on erittäin varmaa, mikä lisää ennakoitavuutta ja kiinnostusta lämmön hyödyntämiseen. Myös datakeskuksen pysyminen alueella on varmempaa kuin perinteisen teollisuuden; usein isot datakeskustoimijat tekevät miljoonien investoinnit uusiin laittiloihin ja keskittävät toimintaansa alueelle. Datakeskusten hyvä lämpöenergioiden hallinta mahdollistaa myös tehokkaan lämmöntalteenoton, joka perinteisessä teollisuudessa on haastavaa.

Hyödynnettävissä olevalla hukkalämmöllä on alhainen lämpötilataso, mikä rajoittaa sen hyödyntämistä ja sulkee pois useat perinteiset termodynaamiset prosessit. Datakeskuksissa syntyvä lämpöenergia on käytännössä ilmaista, sitä muodostuu käytettiinpä se hyödyksi tai ei. Lämmöntalteenottoratkaisut on

mahdollista toteuttaa esimerkiksi lämpöpumpuilla tai lämmönvaihtimilla. Hukkalämmön hyödyntämisen taloudellinen edellytys on, että hukkalämmön hyödyntämisellä tuotetun energian on oltava edullisempaa kuin sillä korvattu energia.

Tässä luvussa käsitellään tekniikoita, joilla syntyvää hukkalämpöä voidaan kerätä talteen ja hyödyntää uudelleen, joko suoraan lämpöenergiana tai muuntamalla takaisin sähköksi.

4.1 Kaukolämpö

Kaukolämpöä hyödynnetään laajasti lähinnä Euroopassa ja erityisesti Pohjoismaissa (Ebrahimi ym. 2013, 629). Datakeskusteollisuus eroaa perinteisestä teollisuudesta, sillä sen toiminta on mahdollista myös urbaaneilla alueilla. Tämä mahdollistaa hukkalämmön laajamittaisen hyödyntämisen juuri kaukolämmön tuotannossa.

Datakeskusten hukkalämmön hyödyntämiseen yleisin tapa on erilaiset lämmitysratkaisut. Hukkalämpöä voidaan hyödyntää esimerkiksi käyttöveden tai keskuksen omien ja läheisten toimistorakennusten lämmittämiseen. Suomi on edelläkävijä datakeskusten hukkalämmön hyödyntämisessä kaukolämmön lähteenä. Datakeskusten hukkalämpö soveltuu hyvin kaukolämpöyhtiöiden käyttöön juuri sen tasaisen saatavuuden vuoksi.

Vuonna 2010 Tietotekniikkayritys Academica otti käyttöön merivesijäähdytteisen 2 MW datakeskuksen, joka rakennettiin Helsinkiin vanhaan pommisuojaan Uspenskin katedraalin alle. Syntyvä hukkalämpö hyödynnetään Helsingin Energian kaukolämmöntuotannossa. Yritykset ovat yhteistyössä toteuttaneet kaksi muutakin datakeskusta samalla konseptilla. (Linnake 2012.)

Mäntsälässä aloitti vuonna 2015 toimintansa venäläisen hakukoneyhtiö Yandexin datakeskus. Ensimmäisessä vaiheessa keskuksen teho on noin 10 MW, mutta laajennussuunnitelmat ovat 40 MW asti. Keskuksen hukkalämpöä hyödynnetään paikallisen sähköyhtiön kaukolämmön tuotannossa. Syntyvällä hukkalämmöllä saadaan korvattua jopa puolet tarvittavasta kaukolämmöstä, joka aiemmin tuotettiin maakaasulla. Näin saatiin myös pudotettua kaukolämmön tuotannon päästöjä 40 % (Sajari 2015). Vuonna 2017 Helsingin Pitäjän-

mäkeen valmistunee Soneran 30 MW datakeskus, joka tulee myös hyödyntämään hukkalämmön kaukolämpönä.

Suomessa on yhteensä noin 1000 datakeskusta, joista vain murto-osan hukkalämpöä hyödynnetään. Pienimuotoistenkin konesalien hukkalämmön hyödyntämiseen kannattaa kiinnittää huomiota, sillä jo 100 kW lämpötehoisille kohteille on olemassa taloudelliset edellytykset kaukolämpöverkkoon liittämiseksi. (Bröckl, Immonen & Vanhanen 2014, 15.)

4.1.1 Tekniikka

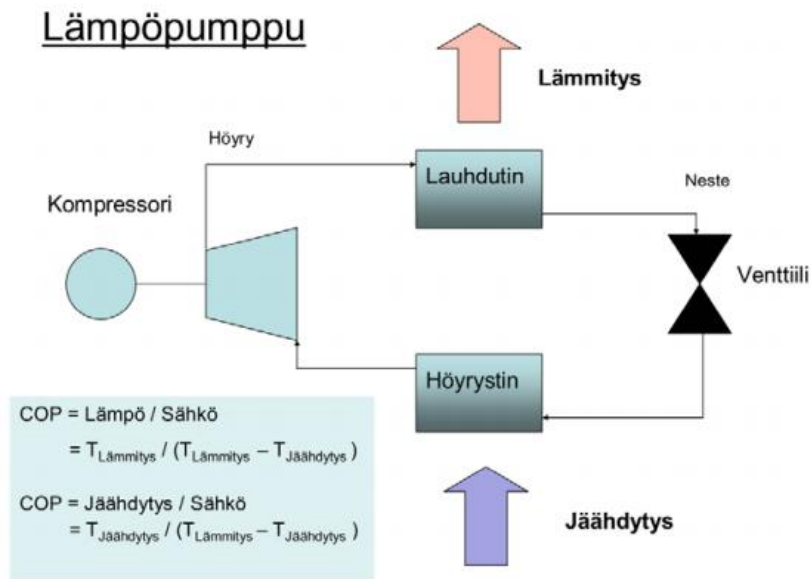
Kaukolämpöverkossa rakennuksiin syötettävän veden lämpötila on tyypillisesti talviaikaan 100–110 °C ja kesäaikaan noin 70–80 °C. Datakeskusten hukkalämpö on yleensä välillä 35–45 °C, tämän vuoksi lämpötilaa on nostettava kaukolämpöverkon vaatimalle tasolle. Lämpötilan nostaminen toteutetaan yleensä lämpöpumpputekniikalla, joka on laajalti teollisuudessa käytetty lämmöntalteenottomuoto.

Lämpöpumppu

Lämpöpumpulla nostetaan lämpöenergian lämpötilaa kylmemmästä tilasta lämpimämpään. Kaikkien lämpöpumppuprosessien teoria perustuu Carnot - prosessiin. Prosesseja on olemassa avoimella sekä suljetulla kierrolla. Datakeskusten kaukolämpöön kytkemiseen soveltuvat parhaiten mekaaniset kompressorilla toimivat lämpöpumput niiden korkean lämpökertoimen vuoksi. Suljetun kierron lämpöpumput voidaan jakaa kahteen pääryhmään niiden toteutustekniikan mukaan:

- Lämpöenergialla toimivat absorptio ja adsorptiopumput.
- Mekaanisella kompressorin työllä toimivat kaasu- ja nestepumput.

Kompressoritekniikalla toimivat lämpöpumpun toimintaperiaate on esitetty kuvassa 11. Yksinkertainen järjestelmä koostuu kompressorista, jolla tuotetaan tarvittava paineen muutos venttiilistä sekä kahdesta lämmönvaihtimesta (Lauhdutin ja Höyrystin), joissa tapahtuvat käytettävän kiertoaineen olotilamuutokset. Lämpöpumppu siis hyödyntää kiertoaineen faasimuutoksia ja lämpötilanmuutoksia lämmönsiirrossa. (Maaskola & Kataikko 2014, 17–21.)



Kuva 11. Lämpöpumppprosessin toimintaperiaate. (Maaskola & Kataikko 2014, 15.)

Lämpöpumppujen tehokkuutta voidaan kuvata lämpökertoimella, eli COP- arvolla. COP- arvo lasketaan kaavalla 4. Lämpökerroin määrittelee kuinka moninkertainen lämpöpumpusta hyödyksi saatu energia on verrattuna sen käyttämiseen tarvittavan ulkoisen energian määrään.

$$COP = \frac{Q_{out}}{W_{in}} \quad (4)$$

jossa	COP	lämpökerroin	
	Q_{out}	lämpöpumpusta hyödyksi saatava energia	[W]
	W_{in}	lämpöpumpun käyttämiseksi tehty työ	[W]

Ideaalisen Carnot prosessin COP-arvo saadaan kaavalla 5.

$$COP = \frac{T_{out}}{T_{out} - T_{in}} \quad (5)$$

jossa	T_{out}	kiertoaineen lämpötila lauhduttimessa	[K]
	T_{in}	kiertoaineen lämpötila höyrystimessä	[K]

Teollisuudessa käytetyissä lämpöpumpppuprosesseissa COP- arvot vaihtelevat yleensä välillä 0,4–30, riippuen kohteesta ja käytetystä prosessista. Paras lämpökerroin ja kannattavuus saavutetaan, kun lämpötilaero lämmönkeruun ja -luovutuksen välillä on mahdollisimman pieni. Kaukolämmöntuotannossa lämpöpumppujen COP- arvot ovat yleensä noin 3. (Maaskola ym. 2014, 17–21)

Teollisuudessa käytetyt lämpöpumput ovat yleensä suunniteltu tapauskohtaisesti. Käyttötarkoituksesta riippuen valitaan parhaiten soveltuva kiertoaine sekä määritetään lämpöpumppujen suoritusarvot. Lämpöpumppujen tehoa on mahdollista kasvattaa lähes rajattomasti kytkemällä yksittäisiä pumppuja rinnakkain.

Kuvassa 12 on esimerkkinä Yandexin datakeskus Mäntsälässä. Datakeskuksen hukkalämpö johdetaan erilliseen lämpöpumppulaitokseen, josta vastaa paikallinen sähköyhtiö. Lämpöpumppulaitoksessa lämmitetään kaukolämpövesi noin 80 °C, jonka jälkeen se pumpataan suoraan kaukolämpöverkkoon.

Datakeskuksen laajentuessa myös hukkalämpöä syntyy enemmän. Lämpöpumppulaitoksen suunnittelussa on otettu huomioon keskuksen laajentuminen ja näin järjestelmään on mahdollista lisätä uusia lämpöpumppuyksiköitä rinnakkain jolloin järjestelmän tehoa saadaan kasvatettua. Tällä hetkellä keskuksessa syntyvällä lämmöllä lämmitetään noin 1000 kotitaloutta, tulevaisuudessa tavoitteena on noin 5000 kotitaloutta. Lämmöntalteenoton ja lämpöpumppulaitoksen on toteuttanut kotimainen Calefa Oy. (Calefa 2016.)



Kuva 12. Yandexin datakeskus ja lämpöpumppulaitos jolla nostetaan kaukolämpöveden lämpötilaa datakeskuksen hukkalämpöä hyödyntäen. (Calefa 2016.)

Kaukolämpöveden paluulämpötila datakeskukselle on myös syytä ottaa huomioon. Kaukolämmön paluuv veden hyödyntämistä on tutkittu laajasti Energiateollisuus ry:n toteuttamassa selvityksessä.

Energiatehokkuuden kannalta paluuv veden lämpötilan tulisi olla siinä lämpötilassa, jossa se voidaan suoraan hyödyntää datakeskuksen jäähdytysjärjestelmässä. Keskimäärin paluuv veden lämpötila on tilastojen mukaan 49 °C. Uusimmissa kohteissa, joissa kiinteistökohtainen lämmönjakokeskus on mitoitettu oikein, paluulämpötila on noin 35–40 °C. Kaukolämmön paluuvettä on siis jäähdytettävä lisää. (Hakulinen 2010, 23.)

Datakeskuskäytössä lämpöpumppuyksiköt on järkevä kytkeä siten, että niillä voidaan samanaikaisesti toteuttaa paluuv veden vaatima lisjäähdytys sekä menoveden lämpötilan nostaminen. Näiden yhteisvaikutuksella saadaan vähennettyä merkittävästi kaukolämpöveden virtaus ja pumppaustehontarvetta.

Paluuv veden jäähtymään voidaan vaikuttaa esimerkiksi mitoittamalla yksittäisten lämmönjakokeskusten lämmönvaihtimet tarkemmin ja talokohtaisesti hyödyntämällä vesikiertoista lattialämmitystä, johon paluuv veden lämpötila on riittävä. (Hakulinen 2010, 33.)

Lämpöpumppuinvestointien takaisinmaksuajat ovat teollisuuden lämmöntalteenottokäytössä pääasiassa aina alle kolme vuotta, jota pidetään yleisesti teollisuudessa maksimina takaisinmaksuaikana. (Calefa 2016.)

4.1.2 Kaukolämpöliityntään vaikuttavat tekijät

Gaia Consulting Oy toteutti vuonna 2014 selvityksen pienimuotoisen ylijäämälämmön hyödyntämisestä kaukolämpötoiminnassa. Selvityksessä keskityttiin lämmönlähteisiin, joiden tehot ovat alle 5 MW ja vuotuinen tuotanto noin 20–30 GWh. Osana selvitystä haastateltiin kaukolämpöyhtiöitä ja kartoitettiin niiden kiinnostusta hyödyntää ylijäämälämpöä. Selvityksen mukaan kaukolämpöyhtiöiltä löytyy kiinnostusta hukkalämmön hyödyntämiseen, kunhan tekniset ja taloudelliset reunaehdot täyttyvät. Myös asenteet hukkalämmön hankintaa kohtaan ovat positiivisia.

Datakeskukset olivat kyselytutkimuksen mukaan metsäteollisuuden jälkeen toiseksi kiinnostavin ylijäämälämmön lähde. Selvitykseen osallistui 43 kaukolämpöyhtiötä. (Bröckl ym. 2014.)

Kaukolämpöyhtiöiden teknisiä reunaehtoja hukkalämmön hankintaan:

- *Lämmöntuotannon tulisi sopia yhteen kaukolämpöyhtiön lämmöntuotantomuotojen kanssa. (CHP-laitos/lämpölaitos)*
- *Ylijäämälämmön ostokustannuksen tulee olla edullisempi kuin oma tuotantokustannus.*
- *Asiakkaan etäisyys lämpöverkosta sekä sijaintikohta verkossa – asiakkaan tulee sijaita sopivassa kohdassa, jotta lämpöä on kannattavaa hyödyntää.*
- *Asiakkaan toimittaman ylijäämälämpötilan ja painelämpötilan tulee olla valmiiksi sopiva ja paineistuksen teknisten spesifikaatioiden mukainen tai lämpötilan priimauksen ja paineistuksen tulee olla taloudellisesti kannattavaa.*
- *Lämpöä tulee olla tarjolla silloin kuin sille on olemassa tarvetta ja lämmön-toimituksen tulisi mielellään olla ennakoitavissa, jotta muun tuotannon suunnittelu olisi mahdollista.*
- *Lämmön talteenoton ja siirron vaatimat investoinnit eivät saa tehdä toimintaa kannattamattomaksi – riittävän lyhyt takaisinmaksuaika.*

Energiayhtiön lämmöntuotantomuodoilla on merkittävä vaikutus hukkalämmön hyödyntämisen kannattavuuteen. Mikäli energiayhtiöllä on tuotantolaitoksia, joissa tuotetaan pelkästään lämpöä, on hukkalämmön hyödyntäminen yleensä aina kannattavaa. Jos taas energiayhtiöllä on käytössä CHP-tuotantoa, hukkalämmön hyödyntäminen voi osoittautua taloudellisesti kannattamattomaksi.

Sähkön ja lämmön yhteistuotannossa pyritään yleensä maksimoimaan sähkön tuotanto. Maksimaalisen sähkötehon kannalta tulisi kaukolämmön paluuv veden olla mahdollisimman kylmää.

Molempipuolisen taloudellisen kannattavuuden saavuttaminen on suurin edellytys kaukolämpöliitynnän toteutumiselle. Myös imagolliset ja ympäristölliset tekijät vaikuttavat, mutta eivät ole päällimmäinen tavoite. Kaukolämpöverkon kapasiteetin tulisi olla riittävän suuri, jotta se kykenisi vastaanottamaan mahdollisimman suuren osan datakeskuksen hukkalämmöstä. (Bröckl ym. 2014, 12.)

4.1.3 Kyselytutkimus kaukolämmön toimittajille.

Osana opinnäytetyötä toteutettiin kyselytutkimus kotimaisille kaukolämmön-toimittajille. Kyselyn tarkoituksena oli kartoittaa yritysten kiinnostusta hyödyntää datakeskuksista saatavaa hukkalämpöä osana liiketoimintaansa. Lisäksi selvitettiin yritysten hukkalämmön vastaanottokapasiteettia. Kysely toteutettiin hyödyntäen google forms -työkalua.

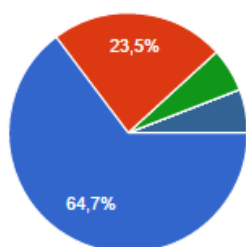
Kysely lähetettiin 78 kaukolämpöyhtiöille eri puolille Suomea. Lista yrityksistä, joille kysely lähetettiin, saatiin Energiategollisuus ry:n tilastoista. Tilastot on lisätty kotimaisten kaukolämmöntoimittajien toimituskapasiteetin mukaan. Vastauksia saatiin yhteensä 17 yritykseltä, mukaan lukien kolme Suomen suurinta kaukolämmöntoimittajaa. Kyselyn lopulliseksi vastausprosentiksi muodostui siis 21,8 %.

Päällimmäisenä havaintona on yritysten kiinnostus hukkalämmön hyödyntämisestä kohtaan. Vastanneista yrityksistä 94,1 % ilmoitti olevansa kiinnostunut hyödyntämään datakeskusten hukkalämpöä osana liiketoimintaansa teknistaloudellisten reunaehtojen täytyessä.

Kaukolämmön tuotantomuotona oli CHP-laitos, 47 % vastanneista, sekä erillinen lämpölaitos, 42 % vastanneista. Tuotantolaitosten ikä painottui pääasiassa 2000- luvulle. Käytetyistä polttoaineista korostui erityisesti puuhake, jota 14 yritystä ilmoitti hyödyntävänsä.

Hukkalämmön vastaanottokapasiteetiksi suurin osa vastanneista ilmoitti 10–50 GWh. Tämä vastaa noin 5 MW tehoisesta datakeskuksesta saatavaa vuotuista hukkalämpömäärää. Kuvasta 13 ilmenee vastanneiden yritysten vastaanottokapasiteetin jakautuminen.

Hukkalämmön vastaanottokapasiteetti



10-50 GWh	11	64,7 %
50-100 GWh	4	23,5 %
100-150 GWh	0	0 %
150-200 GWh	1	5,9 %
200-250 GWh	0	0 %
250-300 GWh	0	0 %
300-350 GWh	0	0 %
350-400 GWh	0	0 %
400-500 GWh	0	0 %
Yli 500 GWh	1	5,9 %

Kuva 13. Kyselytutkimukseen vastanneiden yritysten hukkalämmön vastaanottokapasiteetin jakautuminen. (Merilä 2016.)

Vastaanottokapasiteetti on riippuvainen hukkalämmön määrästä suhteessa kaukolämpöverkon kokoon. Pieniä hukkalämpötehoja on mahdollista hyödyntää ympäri vuoden isossa verkossa, kun taas suuret hukkalämpötehot voivat aiheuttaa ongelmia pienissä kaukolämpöverkoissa.

Vastanneista yrityksistä useat toivat esille kiinnostuksen hyödyntää hukkalämpöä talvisin huippukuormituksen aikana. Kesäaikaan useat ilmoittivat pysyvänsä hyödyntämään hukkalämpöä pienissä määrin tai mikäli sitä on saatavilla niin paljon, että muu lämmöntuotanto voidaan ajaa alas. Joissain tapauksissa CHP-laitosten lämpöä on kesäaikaan tarjolla yli kysynnän, jolloin sitä joudutaan ajamaan vesistöön tai ulkoilmaan. Tällainen tilanne ei kannusta vastaanottamaan hukkalämpöä.

Vastanneista 76,5 % ilmoitti olevansa kiinnostunut vastaanottamaan hukkalämpöä, mikäli se on valmiiksi priimattu kaukolämpöverkkoon sopivaksi. Eli vastuu hukkalämmön priimaamisesta olisi tässä mallissa datakeskuksella.

Esimerkiksi Yandexin datakeskus Mäntsälässä toimittaa hukkalämmön matalassa lämpötilassa paikallisen sähköyhtiön hallinnoimalle lämpöpumppukeskukselle, jossa priimaus tapahtuu ja vastuu on sähköyhtiöllä. Kaksi yritystä ilmoitti voivansa vastaanottaa hukkalämpöä matalassa lämpötilassa. Toisen tapauksessa hukkalämpö olisi mahdollista hyödyntää kaukojäähdytysverkon kautta lämpöpumppujen energialähteenä. (Merilä 2016.)

4.2 Jäähdytys

Globaalisti suuri osa datakeskuksista sijaitsee alueilla, joissa ei ole mahdollisuutta hyödyntää syntyvää hukkalämpöä kaukolämmöksi. Suomessa taas hukkalämmöstä saadaan suurin hyöty, kun se voidaan käyttää kaukolämmöksi kylminä vuodenaikoina. Kesäaikaan kaukolämmöntoimittajien ei ole välttämättä mahdollista vastaanottaa hukkalämpöä kaukolämpöverkon alhaisen käyttöasteen vuoksi.

Yhtenä mahdollisuutena on hyödyntää datakeskusten hukkalämpöä keskusten jäähdytykseen sorptioprosessien avulla. Hukkalämpöä voidaan hyödyntää jäähdytysprosessien käyttöenergiana. Sorptioprosessien etuja ovat alhaiset operointikustannukset sekä pitkä käyttöikä.

4.2.1 Absorptiojäähdytys

Absorptiojäähdytys otettiin ensimmäisen kerran käyttöön 1950-luvulla Yhdysvalloissa. Käyttökohteet ovat sijoittuneet pääasiassa teollisuuteen. Laitteiston suuri koko rajoittaa osaltaan käyttömahdollisuuksia.

Laitteen toiminta perustuu absorptioon eli kaasun imeytymiseen nesteeseen, joka on eksotermisen reaktion (lämpöä vapauttava). Käänteinen prosessi on taas desorptio, jossa kaasu erotetaan nesteestä. Desorptio on endotermisen reaktion (lämpöä sitova).

Prosessissa hyödynnetään tiettyjä ainepareja, joilla on voimakas absorptioominaisuus. Tietyissä lämpötilassa ja paineessa työainepari (kylmä- ja absorptioaine) ovat tasapainotilassa. Kun lämpötilaa tai painetta muutetaan, tasapainotila muuttuu, jolloin kaasua tai höyryä vapautuu tai sitoutuu nesteestä,

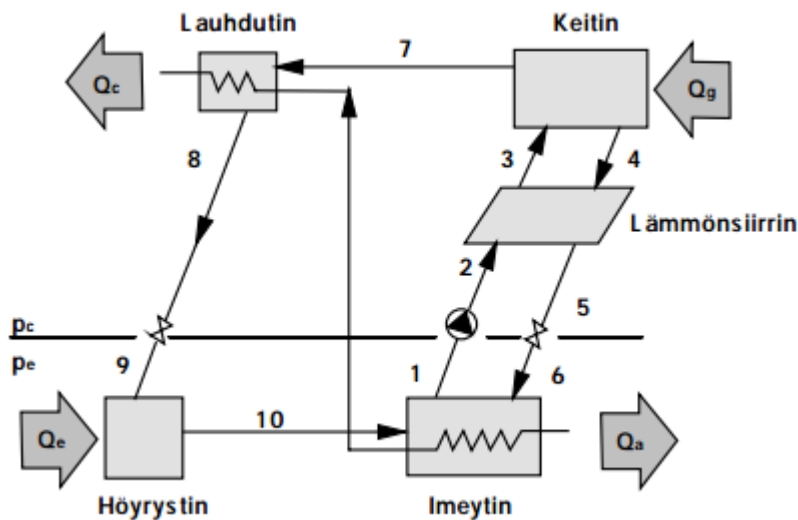
jolloin myös energiaa vapautuu tai sitoutuu. Näin saadaan tuotettua tarpeen mukaan kylmä- tai lämpöenergiaa. Yleisesti käytettyjä prosessiainepareja ovat vesi-litiumbromidiliuos ($\text{H}_2\text{O} - \text{LiBr}$) sekä ammoniakki-vesi ($\text{NH}_3 - \text{H}_2\text{O}$). (Koljonen & Sipilä 1998, 11–23.)

Absorptiojäähdyttimien kylmäkertoimet ovat paljon pienempiä kuin perinteisissä kompressorilla toimivissa järjestelmissä. Tyypillisesti COP on 0,7–1,0. Suurimmat hyödyt tulevat erittäin pienestä sähköenergian kulutuksesta. Yleensä järjestelmissä on vain muutama prosessipumppu, joka vaatii sähköä. Absorptiolaitteita maahantuovan Pemcon mukaan laitteiden vaatima sähköteho on alle 1 % laitteen jäähdytystehosta. (Pemco 2016.)

Prosessi koostuu neljästä pääosasta:

- Lauhdutin
- Höyrystin
- Imeytin
- Keitin

Kuvassa 14 on havainnollistettu yksivaiheisen vesi-litiumbromidi -prosessin toiminta. Kylmäaine kulkee lauhduttimelta paisuntaventtiilin kautta höyrystimelle, jossa kylmäaine (vesi) höyrystyy. Tämän jälkeen vesihöyry kulkee imeyttimeen, jossa se absorboidaan liuottimeen (litiumbromidiliuos). Tämän jälkeen matalapaineisen liuksen painetta nostetaan pumppaamalla se keittimeen, johon tuodaan prosessin käyttöenergia Q_g (hukkalämpö). Keittimessä kylmäaine vapautetaan ja väkevöitynyt liuos palautetaan lämmönsiirtimen ja paisuntaventtiilin kautta takaisin imeyttimeen. Korkeassa lämpötilassa oleva kylmäaine palaa takaisin lauhduttimelle. Prosessin lauhdutinta sekä imeytintä pitää jäähdyttää, jotta lauhtumis- ja liukenemislämmöt saadaan kompensoitua. (Koljonen ym. 1998, 23–29.)



Kuva 14. Absorptiojäähdyttimen prosessikuvaus. (Koljonen ym. 1998, 13.)

Prosessin rakenne riippuu käytettävästä aineparista. Vesi-litiumbromidipohjainen prosessi on mahdollista rakentaa yksi- kaksi- tai kolmi-vaiheisena. Prosessivaiheiden lukumäärää nostamalla saadaan parempi kylmäkerroin. Vaiheiden lisääminen edellyttää tosin korkeamassa lämpötilassa olevaa käyttöenergiaa sekä lisää järjestelmän valmistuskustannuksia. Ammoniakki-vesi prosessi voidaan rakentaa yksi- tai kaksivaiheiseksi. (Ympäristöministeriö 2011.)

Absorptiojäähdyttimien käyttöenergian lähteiksi sopii hyvin teollisuuden hukkalämpö, parhaiten esimerkiksi kuuma prosessihöyry, kuuma vesi tai savukaasu.

Markkinoilla on järjestelmiä, jotka kykenevät hyödyntämään tehokkaasti myös alhaisia lämpötiloja. Tyypillinen käyttöenergian lämpötila on 80–100 °C, mutta osa valmistajista lupaa laitteiden toimivan jo 65–70 °C lämpötiloissa. Datakeskusten yhteyteen jäähdyttimet eivät siis suoraan sovellu, vaan datakeskusten hukkalämmön lämpötilaa tulisi nostaa samalla periaatteella kuin kaukolämmönkin tapauksessa.

Koska järjestelmä hyödyntää korroosiota aiheuttavia yhdisteitä, tarvitsee laitteisto säännöllistä huoltoa. Litiumbromidi -liuosta käytettäessä on myös huomioitava suolan mahdollinen kristallisoituminen. Laitteen sisällä liian alhaiset lämpötilat saattavat johtaa litiumbromidin kiteytymiseen ja aiheuttaa ongelmia prosessilaitteissa.

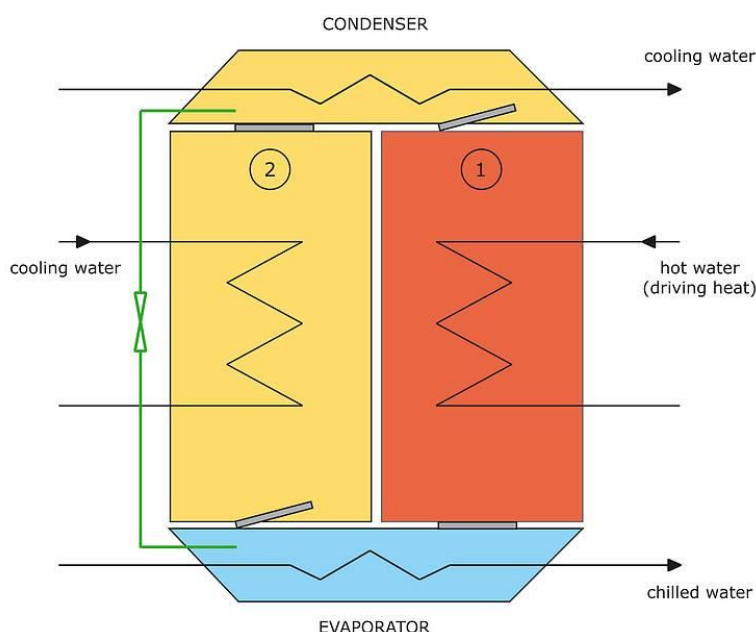
4.2.2 Adsorptiojäähdytys

Adsorptiojäähdyttimien toimintaperiaate on vastaava kuin absorptiojäähdyttimienkin, erona kuitenkin sorptiomateriaali, joka tässä tapauksessa on nestemäisen sijaan kiinteää.

Adsorptio tarkoittaa kaasun imeytymistä kiinteään aineeseen. Prosessissa käytetään kiinteää ainetta, joka on rakenteeltaan huokoista. Näin saavutetaan mahdollisimman suuri pinta-ala, johon kaasun imeytyminen tapahtuu. Yleisesti käytettyjä adsorptiomateriaaleja ovat silikageeli sekä zeoliitit, molemmat myrkyttömiä. Kylmäaineena käytetään yleisesti vettä. (Kwadera & Kupiec 2011, 63–64.)

Adsorptiojäähdytin koostuu neljästä pääosasta: höyrystimestä, lauhduttimesta sekä kahdesta kammioista, jotka ovat täytetty adsorptiomateriaalilla. Kuvassa 15 esitetään yksinkertaistetusti jäähdyttimen rakenne.

Prosessissa vesi höyrystyy matalassa paineessa laitteen alaosassa (evaporator) ja sitoo samalla lämpöä ja näin tuottaa kylmäenergiaa. Vesihöyry kulkee adsorptiokammioon, jossa se imeytyy käytettävään adsorbaattiin (silikageeli) ja vapauttaa samalla lämpöä. Adsorptiosta vapautuvan lämmön takia prosessia on jäähdytettävä. Adsorptiomateriaaliin imeytynyt höyry vapautetaan lämmittämällä sitä ulkoisella käyttöenergialla (hukkalämpö). Materiaalin lämmetessä vesi höyrystyy uudelleen ja nousee lauhduttimeen, jossa se jälleen tiivistyy nesteeksi ja palautuu haihduttimeen.



Kuva 15. Adsorptiojäähdyttimen rakenne. (Solair 2015.)

Jotta prosessi voi toimia yhtäjaksoisesti, siinä pitää olla kaksi adsorptiokammiota. Kun ensimmäinen kammion adsorbaatti on kyllästynyt vesihöyrystä, aletaan adsorbaattia lämmittämään, jolloin höyryä vapautuu ja toinen kammiopuolestaan jatkaa höyryn imeyttämistä. Kammioiden toiminta siis vaihtuu päittäin vuorotellen.

Keskeisimpiä etuja verrattuna absorptiojäähdytysjärjestelmiin on matalampi käyttöenergian lämpötila: adsorptiolaitteisto pystyy hyödyntämään jo 50 °C asteista vettä energialähteenä. Laitteiston elinikä on noin kaksinkertainen absorptiolaitteisiin verrattuna. Prosessissa ei myöskään käytetä myrkyllisiä tai syövyttäviä liuoksia toisin kuin absorptiolaitteistoissa, minkä vuoksi huoltotoimet ovat huomattavasti pienemmät. (Bryair 2016.)

Mahdollisuus matalamman käyttöenergian hyödyntämiseen sekä prosessissa käytettävien aineiden haitattomuus ovat tekijöitä, joiden takia adsorptiojäähdytys soveltuu paremmin käytettäväksi datakeskusten yhteydessä.

Mielenkiintoisena sovellutuksena voidaan pitää adsorptiojäähdytysjärjestelmää, joka on liitetty aurinkokeräinjärjestelmään datakeskuksen katolle. Käytännössä siis datakeskuksen hukkaenergia priimattaisiin adsorptiojäähdyttimen käyttöenergian vaatimalle tasolle aurinkoenergialla. Järjestelmä voisi olla yksinkertaisimmillaan sopivaan teholuokkaan skaalattu tyhjiöputkikeräin datakeskuksen katolla, josta lämmönsiirtimen välityksellä nostettaisiin hukkalämmön lämpötila vaaditulle tasolle. Ratkaisu soveltuisi hyvin myös alueille, joissa vapaajäähdytyksen käyttö on mahdotonta tai hyvin vähäistä. Pohjoisissa olosuhteissa järjestelmä olisi hyödyksi juuri kriittisimmän kesäajan, kun lisäjäähdytykselle on suurin tarve.

Laitteiston hankintahinnat ovat pitkälti riippuvaisia hankittavan laitteiston tehosta. Yleisesti suurempitehoisten järjestelmien yksikkökustannus on alhaisempi. Järjestelmien asennus on tapauskohtaista. Asennuksen hintaan vaikuttavia tekijöitä ovat uusien putkilinjojen rakentaminen, jäähdytyksen järjestäminen sekä näiden pumppulaitteistoista muodostuvat kulut. Tästä syystä asennukselle on vaikea määrittää kiinteää hintaa. Laitetoimittaja PPIway:n nyrkissäännön mukaan asennuskulut ovat noin puolet lisää itse laitekustannukseen.

4.3 Sähköntuotanto

Luvussa perehdytään tekniikoihin joilla on mahdollista hyödyntää hukkalämpö sähköenergian tuotantoon. Datakeskusten hukkalämmön alhaisen lämpötilan vuoksi prosessien hyötysuhteet ovat usein hyvin alhaisia. Alhaiset hyötysuhteet vaikuttavat suoraan investointien kannattavuuteen ja takaisinmaksuaikoihin.

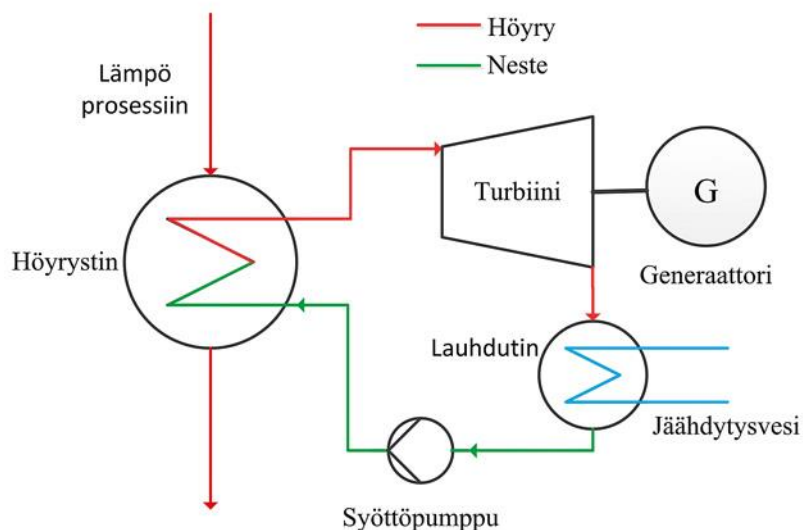
4.3.1 ORC-prosessi

Datakeskuksissa syntyvää hukkalämpöä on mahdollista muuntaa epäsuorasti takasin sähköksi, hyödyntämällä ORC-prosessia. Prosessia voidaan hyödyntää lähinnä datakeskuksissa, joissa servereiden primäärijäähdytys on vesikiertoinen, sillä järjestelmän toimintalämpötila asettuu käytetystä kiertoaineesta riippuen välille 55–300°C. Ilmajäähdytystä hyödyntävissä keskuksissa lämpötilaa pitää ensin nostaa lämpöpumpputekniikalla. (Johansson & Söderström 2014, 9.)

Toimintaperiaate on vastaava kuin normaaleissa höyryturbiinivoimalaitoksissakin. Prosessin kiertoaineena käytetään orgaanisia aineita, joilla on matala höyrystymislämpötila, jolloin päästään hyödyntämään matalassa lämpötilassa olevia energianlähteitä. Tyypillisesti ORC-prosessien hyötysuhteet ovat välillä 5–20 %, riippuen prosessiin tuotavan hukkalämmön lämpötilasta (Uusitalo 2015). Kuvassa 16 on esitetty yksinkertaistettu ORC-prosessikierto.

Prosessin pääosat:

- Syöttöpumppu
- Höyrystin
- Turbiini
- Lauhdutin
- (Regeneraattori, esilämmitin ei kuvassa)



Kuva 16. ORC-prosessikaavio. (Uusitalo 2015.)

Prosessissa käytetyn orgaanisen kiertoaineen paine nostetaan syöttöpumpulla höyrystimen vaatimalle tasolle, jossa kiertoaineen olomuoto muuttuu nestemäisestä höyryksi. Kuuma höyrystynyt kiertoaine ajetaan seuraavaksi turbiinille, jossa höyryn sisältämä energia muutetaan mekaaniseksi työksi, jolla pyöritetään generaattoria. Turbiinin jälkeen höyry on matalassa paineessa ja se lauhdutetaan takaisin nesteeksi jäähdytysvedellä.

Hyötysuhteen parantamiseksi prosesseihin sijoitetaan usein regeneraattori (lämmönvaihdin), jolla turbiinilta palaava höyry esilämmittää höyrystimille pumpattavan kiertoaineen (Maaskola ym. 2014, 40).

Ebrahimi, Jones ja Fleischer tekivät vuonna 2013 kannattavuusanalyysin ORC-prosessin hyödyntämisestä datakeskusten yhteydessä. Alustavien tulosten mukaan investointi olisi kannattava ja takaisinmaksuajaksi muodostui 6-7 vuotta.

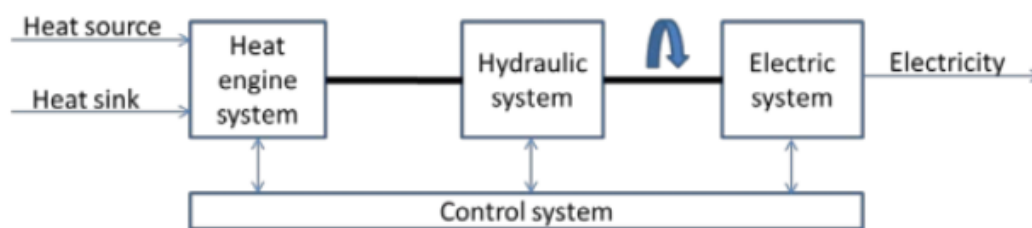
ORC- kannattavuusanalyysin tuloksia: laitteiston asennuskulut ovat lähes yhtä suuret kuin itse laitteen hankintakulutkin. Tyypillinen hankintakustannus laitteistolle on 1800–3000 \$/kW, joten lopullinen kustannus asennettuna vaihtelee välillä 3600–6000 \$/kW. ORC-prosessin lämmöntalteenotto pystyy keräämään noin 90 % hukkalämmöstä ja hyödyntämään sen sähköntuotantoon noin 10 % hyötysuhteella. (Ebrahimi ym. 2013, 633–634).

4.3.2 PCM Engine system

Ruotsalainen Exencotech Ab kehittää uudenlaista prosessia, jolla on mahdollista tuottaa sähköä esimerkiksi merien pinta- ja pohjavesien lämpötilaeron avulla. Tekniikka soveltuu myös hukkalämmön muuntamiseen sähköenergiaksi. Yritys tähtää erittäin alhaisten, alle 50 °C lämpötilojen hyödyntämiseen.

PCM eli Phase Change Material Engine hyödyntää aineen faasimuutoksen yhteydessä tapahtuvaa ominaistilavuudenmuutosta sähköenergian tuotantoon. Järjestelmän keskeisin osa on energiakenno, jossa lämpöenergia muuttetaan mekaaniseksi energiaksi. Kenno sisältää parafiiniseosta, joka muuttaa olomuotoaan kiinteästä nestemäiseksi lämpötilan mukaan. Hukkalämpö absorboituu parafiiniseokseen, jolloin se sulaa ja muuttuu nestemäiseksi korkeassa paineessa (300–400bar). Tämän jälkeen sula parafiiniseos jäädytetään, jolloin sen olomuoto palaa kiinteäksi. Olomuodon muutoksen aiheuttama työ muunnetaan hydraulisen järjestelmän avulla mekaaniseksi energiaksi, jolla pyöritetään generaattoria. Muutos kiinteän ja nestemäisen muodon välillä on erittäin nopea, jolloin saavutetaan suuri järjestelmäteho. (Johansson ym. 2014, 8.)

Järjestelmän keskeisimmät osat on esitetty havainnekuvassa 17.



Kuva 17. PCM Engine järjestelmän prosessikaavio. (Johansson ym. 2014, 8.)

Järjestelmästä saatava teho on suoraan verrannollinen lämmönlähteen sekä lauhdutusveden massavirtoihin. Hukkalämmön ja lauhdutusveden massavirrat ovat yhtäläiset. Yksittäinen järjestelmä on skaalattavissa välille 10 kW-1 MW, kytkemällä useampia järjestelmiä rinnakkain saadaan tehoa kasvatettua.

Järjestelmä pystyy hyödyntämään erittäin alhaisia lämpötiloja. Käyttöenergian lämpötilaksi on ilmoitettu 25–95 °C, joten se soveltuu siis hyödynnettäväksi suoraan datakeskusten yhteydessä. Järjestelmän hyötysuhde on noin 3–3,5 % kun käyttöenergian lämpötila on 50 °C ja jäädytysveden 10 °C. Hyötysuhde

de kasvaa lämpötilaeron kasvaessa (24 °C muutos lämpötilaerossa kasvattaa hyötysuhdetta 2,5 %). (Johansson ym. 2014, 9–10.)

PCM Engine- järjestelmää ei ole vielä kaupallisesti saatavilla. Yrityksen toimitusjohtajan Bengt Östlundin mukaan laitteiston hankintakustannus on asennettuna noin 1900 €/kW, josta asennuksen osuus on noin 15 % (asennuskulut vaihtelevat tapauskohtaisesti). Ensimmäiset teollisen mittakaavan järjestelmä-asennukset on suunniteltu tapahtuvaksi vuoden 2016 aikana.

4.4 Alhaisia lämpöjä hyödyntävä teollisuus

Luvussa tarkastellaan lyhyesti muita mahdollisia käyttökohteita datakeskusten hukkalämmölle. Painopisteenä ovat käyttökohteet, joihin voidaan hyödyntää suoraan matalassa lämpötilassa olevaa käyttöenergiaa.

Datakeskuksen sisäiset käyttökohteet

Datakeskusten omiin lämmitysratkaisuihin on yksinkertaista hyödyntää syntyvää hukkalämpöä. Esimerkiksi keskusten toimistotilojen tuloilman tai käyttöveden esilämmitys ovat helposti toteutettavissa. Muita käyttökohteita on esimerkiksi datakeskuksen varavoimantuotantoon tarkoitettujen dieselmoottorien lohkojen lämmitys. Perinteisesti moottoreita lämmitetään jatkuvasti sähköllä. Lämmitys on tarpeen isoissa moottoreissa, jolloin ne lähtevät jouhevasti käyntiin tarpeen tullen. Suurissa keskuksissa varavoimatuotannon kapasiteetti voi olla kymmeniä megawatteja. Koneiden jatkuvasta ylläpitolämmityksestä muodostuu siis helposti suuri menoerä.

Kasvihuoneet

Datakeskuksista saatava hukkalämpö soveltuu erinomaisesti kasvihuoneiden lämmönlähteeksi. Kasvihuoneissa suotuisin lämpötila on 23–25 °C (Nurmi 2007). Hukkalämpö mahdollistaisi siis ympärivuotisen kasvatuksen ja parantaisi kasvihuoneiden kilpailukykyä. Perinteisesti kasvihuoneet lämmitetään erillisillä lämpökeskuksilla, joissa käytetään usein fossiilisia polttoaineita. Helsingin yliopiston kampuksella Viikissä on käytössä ratkaisu, jossa yliopiston

konesalin hukkalämpö hyödynnetään kasvihuoneiden lämmönlähteenä. (Rakennustekniikka 2015, 33.)

Kalankasvatus

Yhdysvalloissa on suunnitteilla hanke, jonka tavoitteena on muodostaa kestävä ekosysteemi datakeskusten ympärille. The Foundry Project aikoo hyödyntää maanalaisen datakeskuksen hukkalämpöä kalankasvattamossa, joka on keskuksen läheisyydessä (The Foundry Project 2016).

Vastaavanlainen ratkaisu olisi mahdollinen myös Summan paperitehtaan vanhalla tontilla. Alueelle kaavaillaan lohenkasvattamoa, jonka on määrä toimia suljetulla kierrolla, jotta käytetyt ravinteet eivät pääsisi vesistöön. Googlen datakeskus sijaitsee viereisellä tontilla, joten hukkalämpöä olisi periaatteessa mahdollista hyödyntää kalankasvattamossa. (Sillanpää 2015).

Biovoimalaitos

Biovoimalaitosten tai biokaasun tuotannon yhteydessä hukkalämpöä olisi mahdollista hyödyntää biomassan kuivaamiseen. Kuivaamisella voidaan parantaa laitoksen hyötysuhdetta sekä vähentää savukaasupäästöjä. Biokaasun valmistuksessa taas hukkalämpöä olisi mahdollista hyödyntää biomassan käymisreaktion tehostimena. Käymisreaktiot tapahtuvat hapettomassa ympäristössä, joten ne vaativat ulkoisen lämmönlähteen. Biomassojen mädättämiseen soveltuvat suoraan alhaisetkin lämpötilat.

Veden suolanpoisto

Suolanpoisto eli desalinaatio on keino tehdä merivedestä juomakelpoista. Prosessia, jossa voidaan hyödyntää hukkalämpöä kutsutaan monivaihelauhdutukseksi (Multiple Effect Distillation). Prosessin toiminta perustuu tislattavan veden haihuttamiseen vaiheittain. Vaiheita voi olla järjestelmästä riippuen jopa 14. Tislattava vesi väkevöityy sen edetessä prosessissa, koska kussakin vaiheessa osa vedestä haihtuu pois. Lopulta jäljellä on makeaa vettä ja suolaliuos. Prosessin käyttöenergian tulisi olla yli 70 °C, joten ilmajäähdytteisten datakeskusten yhteyteen se ei sovellu. (Veolia 2016.)

5 PÄÄTELMÄT

Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää datakeskusten hukkalämmön hyödyntämiseen soveltuvia tekniikoita sekä minkälaista hyötyä näillä voidaan saavuttaa.

Käytetyin ja kannattavin ratkaisu on hyödyntää syntyvä hukkalämpö lämmitysratkaisuihin. Kaukolämpö on hyvä käyttökohde alueilla, joissa on kaukolämpöverkko sekä tarpeeksi suuri ympärivuotinen verkon kuormitus. Kaukolämmön tuotantoon käytetyillä lämpöpumppuinvestoinneilla on myös työssä käsitellyistä teknologioista lyhyimmät takaisinmaksuajat. Investointien kannattavuuteen tulee kuitenkin kiinnittää huomiota tapauskohtaisesti.

Hukkalämmön hyödyntäminen jäähdytysjärjestelmien energianlähteenä on myös mahdollista. Kahdesta tutkitusta teknologiasta adsorptiojäähdytys vaikutti lupaavammalta. Järjestelmien hyödyntäminen edellyttää kuitenkin suoralla kuumavesijäähdytyksellä toimivia datakeskuksia tai hukkalämmön lämpötilan nostamista.

Hukkalämmön muuntaminen takaisin sähköksi osoittautui ORC- ja PCM -tekniikoilla mahdolliseksi. Ongelmana näissä prosesseissa on kuitenkin erittäin alhainen hyötysuhde. Heikko hyötysuhde pidentää takaisinmaksuajat yleensä aina yli viiteen vuoteen. PCM Engine- tekniikkaa on mahdollista hyödyntää suoraan ilmajäähdytteisissä datakeskuksissa, joka lisää merkittävästi sen käyttömahdollisuuksia.

Hukkalämmön hyödyntämisellä luodaan aina positiivista imagoa sekä parannetaan suoraan datakeskuksen energiatehokkuutta.

Työn aikana toteutettu kyselytutkimus tuotti kiitettävästi tuloksia. Keskeisimmät huomiot ovat yleinen kiinnostus hukkalämmön hyödyntämiseen sekä vastaanotettavan hukkalämmön laatu, joka tulisi olla valmiiksi kaukolämpöverkoon sopivassa lämpötilassa.

Kyselytutkimukseen vastasi 17 kaukolämpöyhtiötä. Kattavampien tulosten saamiseksi kysely olisi ollut järkevämpää toteuttaa esimerkiksi puhelinhaastatteluna. Tähän ei kuitenkaan ollut työn puitteissa resursseja.

Kaiken kaikkiaan aihe oli haastava. Suomessa ja maailmalla on merkittäviä määriä hukkalämpöä tarjolla, joka on huomattavasti korkeammassa lämpötilassa mitä datakeskuksista on saatavilla, ja näin helpommin hyödynnettävissä.

Aihe on kuitenkin tärkeä, kun pitää silmällä datakeskusteollisuuden kehitystä. Arvion mukaan vuonna 2020 datakeskukset kuluttavat noin 7 % koko maailman käyttämästä energiasta. Tulevaisuudessa energian hinta luultavimmin nousee, sekä jäähdytysjärjestelmät kehittyvät ja pystyvät hyödyntämään kuumempaa vettä. Tämän seurauksena heikollakin hyötysuhteella toimivat prosessit muodostunevat kannattaviksi. Oleellista on kiinnittää huomiota energiatehokkuuteen jo datakeskusten suunnitteluvaiheessa.

LÄHTEET

- Anthony, S. 2012. A tour of Google´s top secret data centers. Extreme Tech 17.10.2012. Saatavissa: <http://www.extremetech.com/extreme/138053-a-tour-of-googles-top-secret-data-centers/6> [viitattu 22.3.2016]
- Baltimore Aircoil Company. 2015. Closed circuit cooling towers. Bryair Ltd. 2016. Adsorption chillers white paper. Saatavissa: http://www.bryair.com/uploads/products/pro_image/White%20Paper.pdf [viitattu 4.2.2016]
- Bröckl, M. Immonen, I. & Vanhanen, J. 2014. Gaia Consulting Oy. Lämmön pientuotannon ja pienimuotoisen ylijäämälämmön hyödyntäminen kaukolämpötoiminnassa. Saatavissa: http://energia.fi/sites/default/files/lammon_pientuotannon_ja_ylijaamalammon_hyodyntaminen_kaukolampotoiminnassa20141215_.pdf [viitattu 16.12.2015]
- Calefa. 2015. IT-keskukset. Saatavissa: <http://www.calefa.fi/fi/ratkaisut/it-ala/it-keskukset/> [viitattu 16.12.2015]
- Cushman & Wakefield. 2013. Data Center Risk Index. Saatavissa: <http://global.cushmanwakefield.com/en/research-and-insight/2013/data-centre-risk-index-2013/> [viitattu 26.11.2015]
- Dai, J., Ohadi, M.M., Das, D. & Pecht, M.G. 2014. Optimum Cooling of Data Centers. Application of Risk Assessment and Mitigation Techniques. Draper, D. 2016. Average cost of a Data Center Outage. Saatavissa: <http://datacenterfrontier.com/average-cost-of-a-data-center-outage/> [viitattu 17.3.2016]
- Ebrahimi, K., Jones, G. F. & Fleischer, A. S. 2013. A review of data center cooling technology, operating conditions and the corresponding low-grade waste heat recovery opportunities. Teoksessa Renewable and Sustainable Energy Reviews. Saatavissa: <https://www.deepdyve.com/lp/elsevier/a-review-of-data-center-cooling-technology-operating-conditions-and-QTCNPxB6DY> [viitattu 8.12.2015]
- Energiateollisuus. Kaukolämmön tuotanto ja polttoaineet. 2014. Saatavissa: <http://energia.fi/energia-ja-ymparisto/kaukolampo-ja-kaukojaahdytys/tuotanto-ja-polttoaineet> [viitattu 9.12.2015]
- Eskonen, H. 2015. Miksi Google lämmittää Suomenlahtea? Datakeskusten hukkalämmöllä lämmittäisi ainakin miljoonan ihmisen omakotitalot. Yle 22.10.2015. Saatavissa: http://yle.fi/uutiset/miksi_google_lammittaa_suomenlahtea_datakeskusten_hukkalammolla_lammittaisi_ainakin_miljoonan_ihmisen_omakotitalot/8398301 [viitattu 11.12.2015]

- Fingrid sähköverkon säätöreservilajit. 2015. Saatavissa: <http://www.fingrid.fi/fi/sahkomarkkinat/reservit/reservilajit/Sivut/default.aspx> [viitattu 17.11.2015]
- Geet Otto Van. 2014. Trends in Data Center design. ASHRAE Leads the Way to Large Energy Savings. Saatavissa: <http://www.nrel.gov/docs/fy13osti/58902.pdf> [viitattu 16.11.2015]
- Hakulinen, A. 2010. Pöyry. Kaukolämpöjärjestelmän paluuveden hyväksikäyttö kiinteistöjen lämmityksessä. Saatavissa: http://energia.fi/sites/default/files/paluuvesilammitys_loppuraportti_20100224.pdf [viitattu 16.12.2015]
- Huhtanen, J. 2015. Valtio varasi ison siivun Itämeren kaapelista. Helsingin Sanomat 18.6.2015. Saatavissa: <http://www.hs.fi/kotimaa/a1434514772417> [viitattu 26.11.2015]
- Intel. 2015. 50 Years of Moore's Law. Saatavissa: <http://www.intel.com/content/www/us/en/silicon-innovations/moores-law-technology.html> [viitattu 17.11.2015]
- Johansson, M. T. & Söderström, M. 2014. Electricity generation from low temperature industrial excess heat . Saatavissa: <http://liu.diva-portal.org/smash/get/diva2:633130/fulltext01.pdf> [viitattu 3.3.2016]
- Joshi, Y. & Kumar, P. 2012. Energy Efficient Thermal Management of Data Centers.
- Koljonen, T. & Sipilä, K. 1998. VTT. uudemman absorptiojäähdytystekniikan soveltaminen kaukojäähdytyksessä. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/1998/T1926.pdf> [viitattu 3.2.2016]
- Kwadera, M. & Kupiec, K. 2011. Adsorption cooling as an effective method of waste heat utilization. Saatavissa: http://suw.biblos.pk.edu.pl/resources/i4/i5/i4/i8/r4548/GwaderaM_AdsorptionCooling.pdf [viitattu 4.2.2016]
- Linnake, T. 2012. Academicalta kolmas konesali koteja lämmittämään. IT viikko 30.8.2012. Saatavissa: <http://www.itviikko.fi/uutiset/2012/08/30/academicalta-kolmas-konesali-koteja-lammittamaan/201236739/7?pos=related> [viitattu 11.12.2015]
- Maaskola, I. & Kataikko, M. 2014. Motiva. Ylijäämälämmön taloudellinen hyödyntäminen Lämpöpumppu- ja ORC-sovellukset. Saatavissa: http://www.motiva.fi/files/10217/Ylijaamalammon_taloudellinen_hyodyntaminen_Lampopumppu- ja_ORC-sovellukset.pdf [viitattu 14.12.2015]
- Merilä, M. 2016 Kyamk. Kyselytutkimus datakeskusten hukkalämmön hyödyntämisestä. Saatavissa: <https://docs.google.com/forms/d/1qrqucBO1ou-iUK6idorAmlewwVlvwodNtHp74lypnU/viewanalytics> [viitattu 3.3.2016]

Midwest Cooling Towers. 2012. Cooling tower fundamentals: Cooling tower types. Saatavissa: <http://midwesttowers.com/tag/cooling-tower-fundamentals/> [viitattu 22.3.2016]

Motiva. 2010. Energiatehokas konesali. Saatavissa: http://www.motiva.fi/files/4828/Energiatehokas_konesali.pdf [viitattu 18.11.2015]

Natural Resource Defence Council. 2014. Data Center Efficiency Assessment. Scaling up energy efficiency across the data center Industry. Saatavissa: <http://www.nrdc.org/energy/files/data-center-efficiency-assessment-IP.pdf> [viitattu 8.3.2016]

Nissilä, J., Eho, J. & Kokkonen, V. 2014. Finland's giant data center opportunity. Oxford Research. Saatavissa: http://www.oxfordresearch.no/media/241351/finland_s_giant_data_center_opportunity_final_version.pdf [viitattu 12.11.2015]

Nurmi, L. 2007. Pitkä kesä kasvihuoneessa. Kodin Pellervo 7.6.2007. Saatavissa: http://www.pellervo.fi/kodinpellervo/kp6_07/kasvihuonekesa.htm [viitattu 9.3.2016]

Pemco Oy. 2016. Absorptiokoneet. Saatavissa: <http://www.pemco.fi/index.php/absorptiojaeahdyttimet> [viitattu 3.2.2016]

Rakennustekniikka. 2015. Konesali lämmittää kasvihuoneita. Saatavissa: https://issuu.com/rakennustekniikka/docs/rt1_15_e6f9ed73cd0a6e [viitattu 9.3.2016]

Raunio, H. 2015. Suomesta nopein datayhteys Aasiaan. Tekniikka & Talous 31.3.2015. Saatavissa: http://www.tekniikkatalous.fi/summa_premium/2015-03-31/Suomesta-nopein-datayhteys-Aasiaan---Merikaapeli-Saksasta-houkuttelee-t%C3%A4nne-datakeskuksia-3259789.html [viitattu 26.11.2015]

Baltimore Aircoil Company. 2015. Closed circuit cooling towers. Saatavissa: <http://www.baltimoreaircoil.com/english/products/closed-circuit-cooling-towers> [viitattu 22.3.2016]

Sajari, P. 2015. Yandexin palvelinkeskus Mäntsälässä on otettu käyttöön. Helsingin Sanomat 19.6.2015. Saatavissa: <http://www.hs.fi/talous/a1434677933826> [viitattu 11.12.2015]

Shah, A. 2014. Intel and SGI test full immersion cooling for servers. Saatavissa: <http://www.itworld.com/article/2832125/data-center/intel-and-sgi-test-full-immersion-cooling-for-servers.html> [viitattu 17.11.2015]

Sillanpää, M. 2015. Palvelinkeskus ja kalankasvattamo pian rinnakkain? - Entisestä paperitehtaasta on moneksi. Yle 12.11.2015 Saatavissa: http://yle.fi/uutiset/palvelinkeskus_ja_kalankasvattamo_pian_rinnakkain_entisesta_paperitehtaasta_on_moneksi/8449336 [viitattu 9.3.2016]

- Solair. 2015. Adsorption Chillers. Saatavissa: <http://www.solair-project.eu/142.0.html> [viitattu 22.3.2016]
- The Foundry Project. 2016. Datakeskus kalankasvattamon yhteydessä. Saatavissa: <http://www.thefoundryproject.com/northcoast-fish-farm/> [viitattu 9.3.2016]
- The Green Grid. 2010. ERE: a metric for measuring the benefit of reuse energy from a data center. Saatavissa: http://www.thegreengrid.org/~media/WhitePapers/ERE_WP_101510_v2.pdf [viitattu 19.11.2015]
- Tilastokeskus, Energian hankinta ja kulutus. 2015. Saatavissa: http://www.stat.fi/til/ehk/2014/04/ehk_2014_04_2015-03-23_tie_001_fi.html [viitattu 9.12.2015]
- Tulli. Asiakastiedote. 2014. Sähköveron korjaus veroilmoituksen vähennysmenettelyllä ja konesalien sähköveron alennus voimaan 1.4.2014 alkaen. Saatavissa: http://www.tulli.fi/fi/tiedotteet/asiakastiedotteet/yritykset/as_tiedote_20140321_5/index.html [viitattu 27.11.2015]
- Uptime Institute. 2010. Data Center Site Infrastructure Tier Standard. Saatavissa: <http://www.gpxglobal.net/wp-content/uploads/2012/08/tierstandardtopology.pdf> [viitattu 16.11.2015]
- Uusitalo, A. 2015. LUT. Hukkalämmöstä sähköä. Saatavissa: <http://www.promaintlehti.fi/Turvallisuus-ja-ymparisto/Hukkalammosta-sahkoa> [viitattu 4.2.2016]
- Weatherite Ltd. 2016. Adsorption chiller technology for energy efficient low carbon, sustainable solutions. Saatavissa: <http://www.danway.ae/PDF/POWER/ChillerPlants/Adsorptionchillers.pdf> [viitattu 4.2.2016]
- Veolia. 2016. MED: Multiple Effect Distillation. Saatavissa: <http://technomaps.veoliawatertechnologies.com/multipleeffectdistillation/en/> [viitattu 9.3.2016]
- Ympäristöministeriö. 2011. Jäähdytysjärjestelmien energialaskentaopas. Saatavissa: <http://www.ymp.fi/download/noname/%7BB9D6D2F2-A816-4ECF-BE33-B8D56869253D%7D/30752>. [viitattu 3.2.2016]
- Zimmermann, S., Tiwari, M. K., Meijer, I. Paredes, S., Michel, B. & Poulikakos, D. 2012. Hot water cooled electronics: Exergy analysis and waste heat reuse feasibility. Saatavissa: https://www.deepdyve.com/lp/elsevier/hot-water-cooled-electronics-exergy-analysis-and-waste-heat-reuse-geOSD8MHBd?impressionId=5667f7555e6de&i_medium=mydeepdyve&i_campaign=currentlyReading&i_source=currentlyReading [viitattu 9.12.2015]

42U Data Center Solutions. 2009. Hot aisle containment strategies. Saatavissa: <http://www.42u.com/cooling/hot-aisle-containment.htm> [viitattu 22.3.2016]