

LAPPEENRANNAN–LAHDEN TEKNILLINEN YLIOPISTO LUT
LUT School of Energy Systems
Ympäristötekniikan koulutusohjelma
Kandidaatintyö

KONESALIEN ENERGIATASE JA HIILIJALANJÄLKI
The energy balance and carbon footprint of data centers

Työn tarkastaja: Tutkijaopettaja, TkT Mika Luoranen
Työn ohjaaja: Tutkijatohtori, TkT Kaisa Grönman

Lappeenrannassa 04.05.2020

Joakim Pelto

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT
LUT School of Energy Systems
Ympäristötekniikan koulutusohjelma

Joakim Pelto

Konesalien energiatase ja hiilijalanjälki

Kandidaatintyö

2020

34 sivua, 4 taulukkoa ja 5 kuvaa

Työn tarkastaja: Tutkijaopettaja, TkT Mika Luoranen

Työn ohjaaja: Tutkijatohtori, TkT Kaisa Grönman

Hakusanat: konesali, palvelinhuone, energiatase, hiilijalanjälki

Keywords: data center, server room, energy balance, carbon footprint

Tämän kandidaatintyön tarkoituksena on luoda katsaus konesalien energiataseesta ja selvittää esimerkkikonesalien hiilijalanjälki. Case-tarkastelun avulla tarkastellaan konesalien eroja hiilijalanjäljen osalta. Energiataseen tarkastelun pohjalta on mahdollista selvittää hiilijalanjälki ja toiminnasta syntyvien hiilidioksidipäästöjen määrä. Energiataseen lisäksi tarkastellaan konesalien energiatehokkuutta sekä keinoja parantaa jäähdytysenergian tehokkuutta ja hukkalämmön käyttöä. Jäähdytysenergian pienentämiseksi on useita menetelmiä, joista tehokkain vaikuttaa olevan vapaan ilman hyödyntäminen. Hukkalämmön hyödyntäminen on haastavampaa. Konesalien hiilijalanjälkeä tarkastellaan toiminnasta vuoden aikana. Case -tarkastelun tuloksien perusteella Suomessa sijaitsevan konesalin hiilijalanjälki on merkittävästi pienempi kuin Saksassa sijaitsevan. Suomessa on mahdollista hyödyntää viileää ilmaa jäähdytyksessä energiankulutuksen pienentämiseksi, mitä Saksassa ei voida hyödyntää. Konesalit ovat normaalitilassa samanlaisia, ainoana erona oli sijainti ja sen tuomat mahdollisuudet. Työssä saadun kokonaiskuvan perusteella voidaan sanoa, että tulevaisuudessa konesalien energiatehokkuuden parantamisen rooli on tärkeä kestävä kehityksen ja toiminnan takaamiseksi. Uusien konesalien suunnittelussa tulee ottaa huomioon ympäristö ja sen tarjoamat mahdollisuudet energiatehokkuuden parantamiseksi ja hukkalämmön hyödyntämiseksi.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT
LUT School of Energy Systems
Degree Programme in Environmental Technology

Joakim Pelto

The energy balance and carbon footprint of data centers

Bachelor's thesis

2020

34 pages, 4 charts and 5 pictures

Examiner: Associate Professor, TkT Mika Luoranen
Instructor: Post Doctoral Researcher, TkT Kaisa Grönman

Keywords: data center, server room, energy balance, carbon footprint

The purpose of this bachelor's thesis is to create an overview of the energy balance of data centers and to find out the carbon footprint of data centers. The case study is used to look at the differences between data centers. Based on the review of the energy balance, it is possible to determine the carbon footprint and the amount of CO₂ emissions from operations. In addition to improve the energy efficiency of cooling energy and the use of waste heat are examined. There are several methods for reducing cooling energy and the most effective of which appears to be the utilization of free air. Utilizing the waste heat is more challenging. The carbon footprint of the data centers is reviewed from operations during the year. Based on the results of the case study, the carbon footprint of the data center located in Finland is much smaller than one which is located in Germany. In Finland it is possible to utilize cool sea air, which cannot be utilized in Germany. The data centers were similar in normal conditions and the only difference was the location. Based on the obtained results it can be said that in the future the role of improving the energy efficiency of data centers will be important to ensure sustainable development and operation. In the design of new data centers environment and the opportunities it offers to energy efficiency and waste heat utilization should be taken into account.

SISÄLLYSLUETTELO

SYMBOLILUETTELO	5
JOHDANTO	6
1 KONESALIT	8
1.1 Konesalien rakenne	8
1.2 Konesalien tasot	9
2 KONESALIEN ENERGIATASE.....	10
2.1 Energiankulutus.....	11
2.1.1 Jäähdytys	12
2.1.2 Laitteisto	13
2.2 Energiataseen parantaminen.....	14
2.2.1 Jäähdytysenergian pienentäminen	14
2.2.2 Hukkalämmön hyödyntäminen	16
3 KONESALIEN HIILIJALANJÄLKI	19
3.1 Hiilijalanjäljen määrittäminen.....	19
3.1.1 Kasvihuonekaasut.....	20
3.1.2 Kestävyyden arviointi.....	21
4 CASE: KONESALIN ENERGIATEHOKKUUDEN MERKITYS HIILIJALANJÄLJESSÄ	23
4.1 Lähtötilanne.....	23
4.2 Laskennan tulokset.....	24
4.3 Tuloksien tarkastelu	26
5 JOHTOPÄÄTÖKSET	28
6 YHTEENVETO	30
LÄHTEET	32

SYMBOLILUETTELO

Lyhenteet

CEF	Carbon Emission Factor, Hiilen päästökerroin
CRAC	Computer Room Air Conditioning, Palvelinsalin ilmastointi
CUE	Carbon Usage Effectiveness, Hiilen käytön tehokkuus
DCeP	Data Center energy Productivity, Palvelinsalin energiankäytön tuottavuus
ICT	Information and Communication Technology, Informaatio- ja kommunikaatioteknologia
LVI	Lämmitys-, Vesi- ja Ilmastointi
PUE	Power Usage Effectiveness, Virrankäytön tehokkuus
UPS	Uninterruptible Power Supply, Katkeamaton virran jako
WUE	Water Usage Effectiveness, Veden käytön tehokkuus

Yksiköt

MW	Megawatti
kW	Kilowatti
m ²	Neliometri
°C	Celciusaste
l	Litra
kWh	Kilowattitunti
t	Tonni
g CO ₂ /kWh	Grammaa hiilidioksidia kilowattituntia kohden

Alkuaineet ja yhdisteet

CO ₂	Hiilidioksidi
N ₂ O	Dityppioksidi
CH ₄	Metaani

JOHDANTO

Konesalit ovat rakennettuja tiloja, jotka pitävät sisällään suuren määrän palvelinkaappeja. Palvelinkaapit mahdollistavat useita palveluita, joita arjessa on totuttu käyttämään. Internet, pilvipalvelut, suoratoistopalvelut ja videopelipalvelimet tarvitsevat toimiakseen konesaleja. Palvelinkaapit sisältävät prosessoreja, jotka toteuttavat niille toimitettuja työkäskyjä. Konesalien IT -laitteisto eli palvelinkaapit ovat pääkomponentteja, joiden ympärille luodaan tarvittava infrastruktuuri. Jatkuvan toiminnan vuoksi konesalien mahdollistamat palvelut ovat saatavilla vuorokauden ympäri. (Gómez, 2017, 2.)

Konesalien energiankulutus on noin 1,3 % globaalista energiankulutuksesta. Konesaleissa käytettävä laitteisto on kehittynyt ja hyötysuhde on kasvanut viime vuosien aikana, mutta energiankulutus on siitä huolimatta suuri. Konesalien energiankulutus koostuu useasta systeemin osasta ja esimerkiksi konesalien jäähdyttämiseen käytetään noin 40% koko energiasta. (Song, 2015, 1255.) Hukkaenergia ei häviä konesalista, vaan laitteistojen toiminnasta syntyy lämpöä konesaliin, koska termodynamiikan ensimmäisen lain mukaan energia säilyy eikä häviä (Sekerka, 2015, 15). Konesalin energiataseen määrittämisen avulla on mahdollista tarkastella systeemin energiavirtoja. Konesalien energiankulutuksen pienentäminen ja energiankäytön parantaminen ovat tärkeitä kehityksen ja konesalien kasvun kannalta.

Hiilijalanjälki kertoo palvelusta tai tuotteesta syntyvien CO₂ -päästöjen sekä muiden kasvihuonekaasujen määrän (Wiedmann, Minx, 2007, 3). Toiminnan hiilijalanjäljen laskeminen on osoittautunut hyödylliseksi ja muodostunut yleiseksi tavaksi selvittää toiminnasta aiheutuvat päästöt. Yhä useampi toimija ilmaisee toimintansa hiilijalanjäljen ja pyrkii pienentämään sitä. Konesalien hiilijalanjälki on tärkeä konesalien energiatehokkuuden kehittymisen vuoksi. Hiilijalanjäljen laskemisella voidaan selvittää konesalien kuormitus ympäristöön.

Tässä kandidaatintyössä tarkastellaan konesalien energiatasetta sekä hiilijalanjälkeä. Työn tavoitteena on luoda katsaus energiatehokkuuden parantamisesta ja hiilijalanjäljen pienentämisestä. Tutkimuskysymyksenä on konesalien energiankulutuksen sekä hiilijalanjäljen merkitys kestävästä kehityksestä näkökulmasta. Työssä kiinnitetään huomiota energiankulutukseen

ja parannuskohteisiin. Työ tehdään kirjallisuuskatsauksena sekä case-tarkastelulla. Kirjallisuuskatsauksella selvitetään työhön vaadittava teoria ja case-tarkastelulla selvitetään energiataseesta sekä hiilijalanjäljestä syntyvä kokonaisuus.

Teoriaosassa perehdytään suurten konesalien energiataseeseen ja siihen, mistä energiatase koostuu. Energiataseen tarkastelussa kiinnitetään huomiota jäähdytysenergiaan pienentämiseen sekä hukkalämmön hyötykäyttökohteisiin. Energiatasetarkastelun jälkeen selvitetään, mistä konesalia hyödyntävien palveluiden hiilijalanjälki muodostuu ja mikä on tämän merkitys. Teoriaosan jälkeen tarkastellaan kahden eri konesalin eroja case-tarkastelun avulla. Lopuksi tarkastellaan tuloksia case-tarkastelun pohjalta.

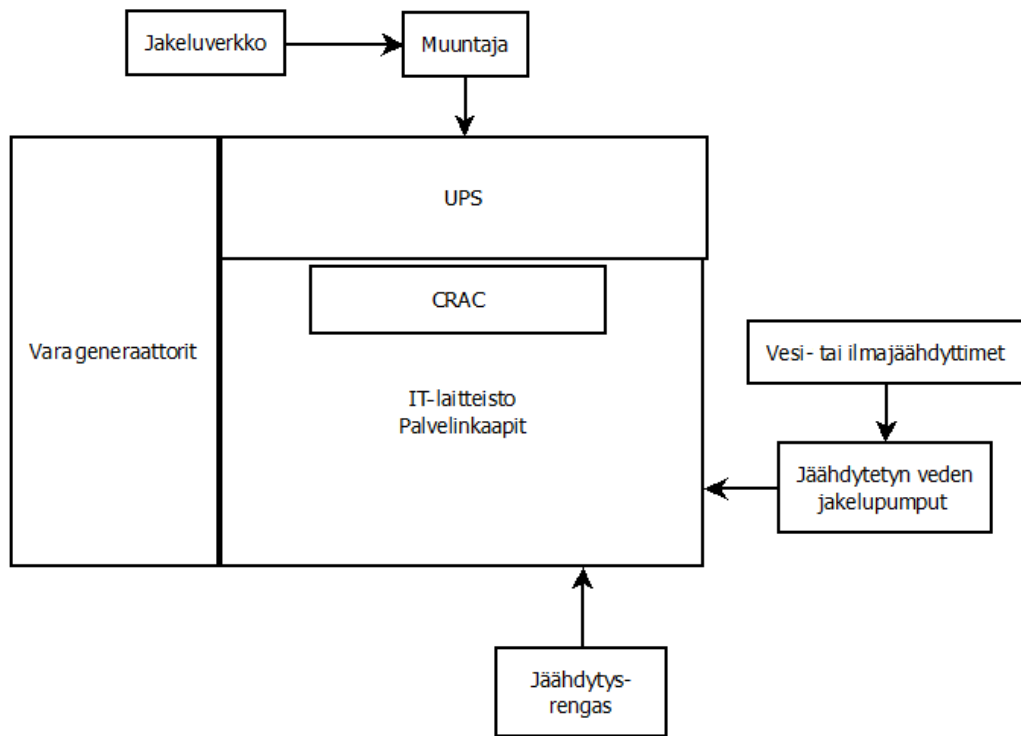
1 KONESALIT

Internet, suuret laskennat, tiedon tallentaminen ja käsittely vaativat laitteistoa. Konesalit ovat rakennettu näitä tehtäviä varten. Suuri määrä rakennetussa tilassa olevia koneita suorittaa tehtäviä, joita koneet on ohjelmoitu toteuttamaan. Konesalien koneet voivat toimia sähköpostipalvelimina, videopelien palvelimina, tietokantoina tai sovellusten palvelimina. Konesalit ovat useasti eri toimintojen perustana, koska tietoa täytyy varastoida ja käsitellä jatkuvasti. (Gómez, 2017, 2.)

Konesalit ovat oleellisin osa tiedon liikkumisessa laajalla alueella. Konesaleissa sijaitsee suuri määrä palvelinkaappeja, joiden tehtävänä on suorittaa saapuvat käskyt. Palvelinkaapit koostuvat pääsääntöisesti useista prosessoreista. Konesalien toiminta on jatkuvaa ja tehtävien suorittamiseen tarvitaan jatkuvasti energiaa. Konesalien tarjoamien palveluiden saataavuus on yleisesti vuorokauden ympäri jokaisena vuoden päivänä. (Gómez, 2017, 2.)

1.1 Konesalien rakenne

Palvelinkaapit ovat konesalien pääkomponentti, jonka ympärille luodaan tarvittavat olosuhteet toiminnan tukemiseksi. Tilaan luodaan kattava jäähdytysjärjestelmä, valaistus, turvajärjestelmät ja keskeytymätön virransyöttöjärjestelmä. Palvelinkaappi sisältää prosessoreita, jotka prosessoivat laitteelle tulevaa dataa eli tietoa. Prosessorien vaatima energia muuttuu tehtävän suorituksessa lämpöenergiaksi ja vapautuu ympäristöön, jossa laitteisto sijaitsee. Laitteisto vaatii viileät olosuhteet toimintaan ja säilyvyyteen, koska liian suuri lämpötila aiheuttaa laitteiston hajoamisen. Tämän vuoksi konesalien jäähdytysjärjestelmä on yksi tärkeimmistä komponenteista systeemissä. Jäähdytys on toteutettu CRAC-laitteiston (Computer Room Air Conditioning) avulla, joka jakaa viileää ilmaa konesaliin. Uninterruptible Power Supply (UPS) eli keskeytymätön virransyöttö varmistaa virransyötön laitteille ja mahdollistaa jatkuvan toiminnan. UPS ja jäähdytysjärjestelmä ovat kaksi komponenttia, jotka mahdollistavat toimivuuden konesaleissa. Kuvassa 1 on havainnollistettu tyypillinen konesalin rakenne. (Gómez, 2017, 166; Joshi, Kumar 2012, 3.)



Kuva 1. Konesalin rakenne. (Joshi, Kumar 2012, 2)

1.2 Konesalien tasot

Konesalien monimuotoisuuden vuoksi on määritetty sertifiointijärjestelmä, jonka avulla konesalit voidaan luokitella eri tasoihin. Konesaleja voidaan luokitella TIA-942 sertifiointin mukaan neljään eri tasoon, I, II, III ja IV. Standardin on määritellyt Uptime Institute. Tasot kertovat saatavuudesta eli ylhäälläoloajasta vuodessa, esimerkiksi tasolla IV konesalin saatavuusprosentti on 99,995 %, kun taas tason I konesalin saatavuusprosentti on 99,671 %. Tämä tarkoittaa, että tason IV konesalin alhaalla olo aika on vuodessa pienempi kuin tason I konesalin. Konesalin tasoon vaikuttavat infrastruktuurin osat, kuten mekaaniset järjestelmät, sähköjärjestelmät, televiestintäjärjestelmät sekä sisäinen arkkitehtuuri. (Gómez, 2017, 4.)

2 KONESALIEN ENERGIATASE

Konesalien energiatehokkuus on noussut puheenaiheeksi CO₂ päästöjen sekä ilmastonmuutoksen vuoksi. Konesalien määrän kasvaessa yhä useampi konesali pyrkii saavuttamaan korkean hyötysuhteen ja käyttämään kaiken energian tehokkaasti. Uusien konesalien rakentaminen suunnitellaan yhä tarkemmin ottaen huomioon sijainnit, jäähdytysmenetelmät, laitteisto sekä muut systeemiin vaikuttavat tekijät. (Cho et al. 2015, 357.)

Konesalien määrä on kasvanut ja maailmalla on arviolta n. 23 000 konesalia yhteensä. Yksi laaja konesali voi kuluttaa n. 10–20 MW sähköä, suuret konesalit voivat olla jopa 40 MW tehoisia. Sisäinen kuorma voi olla konesalissa tyypillisesti yli 3 kW/m². Konesaleissa energiantarve on kiinteä ja kulutus ei vaihtelee esimerkiksi vuorokauden ajasta, jatkuva toiminta tarkoittaa myös jatkuvaa kulutusta. (Cho et al. 2015, 357-358.)

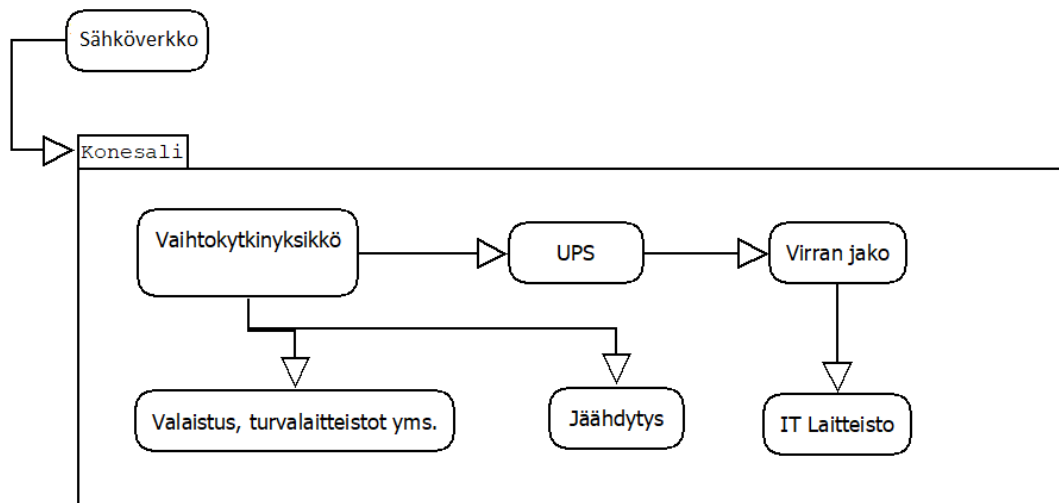
Konesalien energiatehokkuuden määrittämiseksi on kehitetty PUE (Power Usage Effectiveness) arvo, joka vertaa systeemiin tuotua energiaa ICT (Information and Communication Technology) laitteiston kuluttamaan energiaan (yhtälö 1) (Gómez, 2017, 167). PUE-arvo kertoo koko energiankulutuksen ja ICT laitteiston kuluttaman energian suhteen. PUE arvon avulla on mahdollista tarkastella konesalin energiatehokkuutta.

$$PUE = \frac{\text{Konesalin teho}}{\text{ICT laitteiston teho}} \quad (1)$$

PUE arvoa voidaan käyttää hyvin konesalikohtaiseen tarkasteluun, mutta heikosti vertailuun konesalien välillä. Vertailuun vaikuttavat systeemin infrastruktuuri sekä laitteisto, joita PUE arvossa ei huomioida. PUE-arvo on pienimmillään 1,0 ja yläraja-arvoa ei ole. PUE-arvo 1,0 tarkoittaisi, että kaikki systeemiin tuotu energia kuluisi ICT laitteiston toimintaan. (Avelar et al. 2012, 7, 28.)

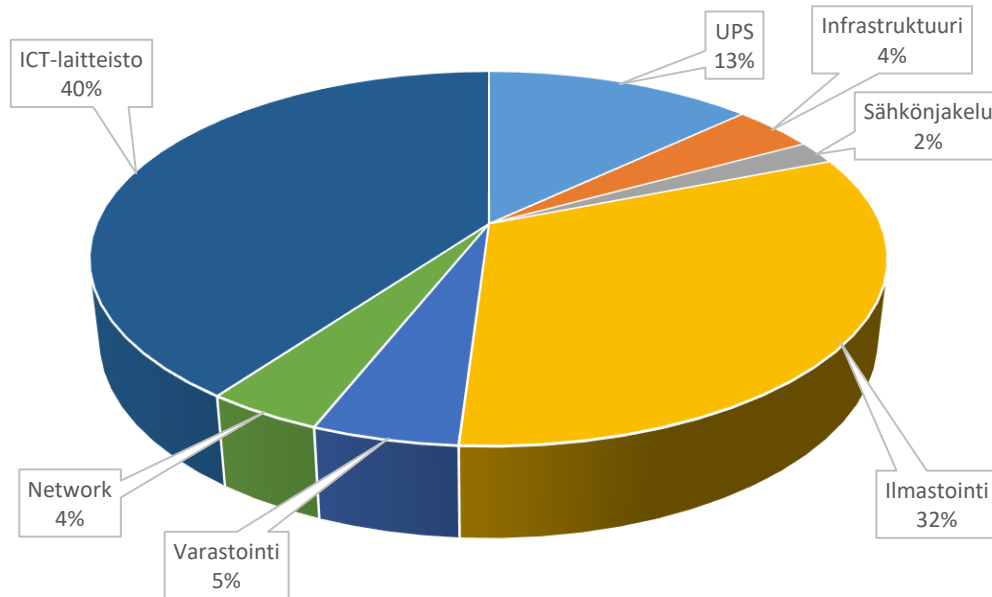
2.1 Energiankulutus

Energiankulutus on kasvanut viimevuosikymmenenä runsaasti, minkä voidaan olettaa johtuvan teknologian jatkuvasta ja nopeasta kehityksestä. Viimevuosien aikana teknologian kehittyminen on mahdollistanut tehokkaampien laitteiden käytön konesaleissa. Teknologian kehityksellä on myös vaikutusta energiankulutukseen, koska laitteiston jäähdytys on myös kehittynyt. (Song et al, 2015, 1255.) Energiankulutuksen pienentämiseksi on pyritty kehittämään useita menetelmiä laitteiston toiminnassa sekä jäähdytysjärjestelmissä. Kuvassa 2 on esitetty energiankäyttö konesaleissa.



Kuva 2. Energiankäyttö konesalissa. (Cho et al, 2015, 358)

Energiaa kulutetaan epätasaisesti konesaleissa. Kuvassa 3 on esitetty keskiarvo konesalin energianjakautuminen. Kuten kuvasta 3 nähdään ICT-laitteisto (Information and Communication Technology) sekä jäähdytysjärjestelmä ja ilmastointi kuluttavat merkittävän määrän kokonaisenergiasta. Nämä kaksi systeemin osaa kuluttavat yli 70 % prosenttia konesalien kokonaisenergiasta. 10–20 MW konesaleissa tämä tarkoittaisi 7-14MW kulutusta kahden pääkomponentin osalta vuodessa. Trendiksi on noussut rakentaa laajempia konesaleja, joiden teho voi olla jopa 40 MW. (Song et al. 2015, 1255.)



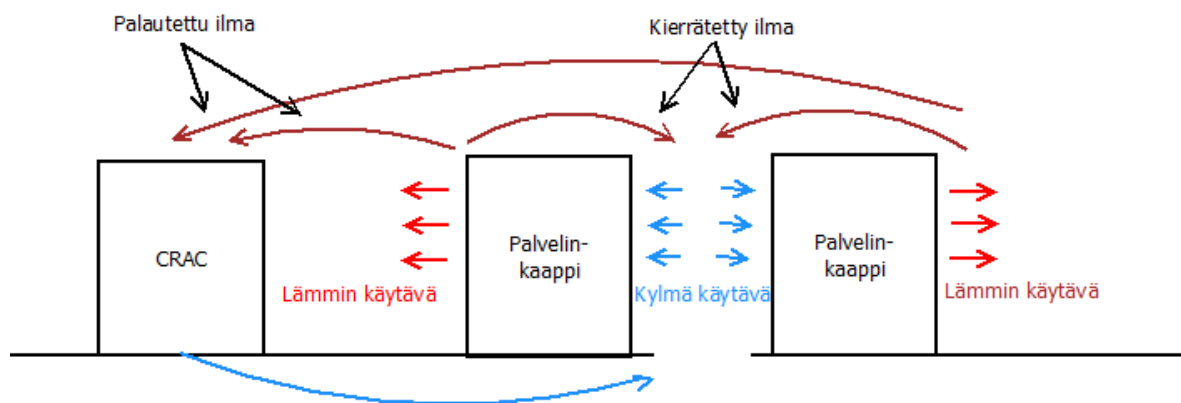
Kuva 3. Energian kulutus alueittain prosentteina. (Gómez, 2017, 166)

2.1.1 Jäähdytys

Jäähdytys on IT-laitteistolle tärkein komponentti, jonka avulla laitteiston toimintaa ja kestävyyttä pidetään yllä. Termodynamiikan ensimmäisen lain mukaan energia säilyy eikä häviä (Sekerka, 2015, 15). Kaikki laitteistossa tehty työ muuttuu lämpöenergiaksi, joka siirtyy ympäristöön. Konesali on suljettu systeemi, joten lämpöenergia jää konesaliin ja tämän vuoksi huoneen lämpötila kasvaa huomattavasti koneiden tehdessä työtä. Konesaleissa pyritään säilyttämään n. 22 °C asteen lämpötila. (Cho et al. 2015, 369.) Laadukasta ja tehokasta jäähdyttämistä varten käytetään tyypillisesti jäähdytysjärjestelmää. Jäähdytysjärjestelmistä yleisimpiä ovat nestejäähdytys ja ilmajäähdytys.

Nestejäähdytystä voidaan soveltaa usealla eri tasolla konesaleissa. Palvelinkaappeihin voidaan suoraan kytkeä nestejäähdytys, modulaarinen jäähdytys, systeemitason jäähdytys tai neste voidaan suoraan johtaa prosessoreihin. Palvelinkaappeihin johdetussa nestejäähdytyksessä kaapissa kulkevat putket sisältävät viileää nestettä, joka sitoo lämpöä. Neste kiertää jatkuvasti, jotta nesteeseen sitoutunut lämpöenergia saadaan poistettua. Jokaiseen nestejäähdytykseen sisältyy sama periaate. (Joshi, Kumar 2012, 589-599.)

Ilmajäähdytystä voidaan nestejäähdytyksen tavoin soveltaa useilla eri tasoilla. Tyypillisin ja merkittävin jäähdytys tapahtuu kuitenkin palvelinsalissa, jossa ilmaa täytyy kierrättää tehokkaasti. Ilmajäähdytyksessä tilan lattiaa on korotettu ja salissa on tasaisin välein asennettuja levyjä, joista ilma voi nousta saliin. Viileä ilma kiertää tason alla nousten saliin ja leviten ympäristöön. Samaan aikaan lämmin ilma kiertää CRAC laitteelle, jossa ilmaa viilennetään. Ilmajäähdytys on yleisin tapa jäähdyttää konesaleja. Kuvassa 4 on esitettyä salitason ilmajäähdytys. (Li et al. 2014, 251.)



Kuva 4. Konesalin ilmankierto. (Li et al. 2014, 252)

Ilmajäähdytys on energiatehokkaampi ratkaisu verrattuna nestejäähdytykseen, koska nestejäähdytys vaatii nesteen jäähdyttämistä jatkuvasti. Ilman jäähdyttäminen sekä kierrättäminen ovat vähemmän energiaa tarvitseva prosessi. Pääsääntöisesti jäähdytys vie n. 40 % systeemiin tuodusta energiasta. Tehokkailla systeemeillä kulutus voi olla alle 30 % ja huonoilla systeemeillä noin 60 %. (Avgerinou et al. 2017, 2.)

2.1.2 Laitteisto

Laitteistolle syötetään noin 40 % konesalin kokonaisenergiasta. Laitteisto käyttää energian työhön, jolla tietoa käsitellään palvelinkaapeissa. Kaikki tehtäviin kulutettava energia muuttuu lämpöenergiaksi konesaliin. Palvelinkaapit tekevät jatkuvasti työtä, joten energiankulu-

tus ja lämmöntuotto ovat jatkuvaa. Lämmöntuottoa on pyritty alentamaan laskentatehon pyyessä samassa. Prosessorien tehon kasvaessa lämmöntuotto nousee kuitenkin korkeammaksi, mikä lisää jäähdytykseen kuluvan energian määrää. (Joshi, Kumar 2012, 3-5.)

Palvelinkaappityyppejä on useita. Laskentapalvelimet ovat perusta konesaleille ja kattavat suurimman osan salin palvelimista. Blade-palvelin on kompakti verrattuna yleiseen laskentapalvelimeen ja toimii samalla tavalla. Laskentapalvelin on noin puolet suurempi kuin Blade-palvelin, mutta kompaktin koon vuoksi Blade-palvelimessa muodostuva lämpökuorma on suurempi. Palvelinkaappityyppejä on Laskentapalvelimien lisäksi tiedon säilyttämistä varten rakennettuja palvelimia. Nauhaohjaimet ja tallennuspalvelimet eivät suorita laskentaa, vaan tallentavat tietoa ja säilyttävät sitä. Lämpökuormassa on suuria eroja palvelinkaappien välillä. Vuonna 2014 laskentapalvelimen lämpökuorma oli keskimäärin 23 kW palvelinkaappia kohden, kun taas tallennuspalvelimien ja nauhaohjaimien lämpökuormat olivat alle 10 kW palvelinkaappia kohden. Blade-palvelimien lämpökuorma palvelinkaappia kohden oli noin 37 kW, joka on muihin palvelinkaappeihin verrattuna suuri. (Joshi, Kumar 2012, 4; Smith et al, 2008, 3.)

2.2 Energiataseen parantaminen

Konesaleissa käytetyn energian pienentäminen on yksi tärkeimpiä kehityskohteita konesaleissa. Jatkuvan tarpeen vuoksi konesalien määrän arvioidaan lisääntyvän ja tämän myötä myös sähkönkulutuksen. Konesaleissa käytettävän energian tulisi olla uusiutuvista energianlähteistä, mutta suuria parannuksia voidaan tehdä konesalien sisällä. Hukkalämmön hyödyntäminen tehokkaasti sekä jäähdytyksen energiatehokkuuden lisääminen ovat kriittisimpiä kehityskohteita konesaleissa. (Huang et al, 2019, 2)

2.2.1 Jäähdytysenergian pienentäminen

Jäähdytyksen pääsääntöinen tarkoitus on viilentää tilaa, jotta IT-laitteiston toiminta voidaan turvata. Suuren energiankulutuksen vuoksi jäähdytysenergiaa tulisi pyrkiä pienentämään tehokkaasti. Jäähdytysenergian pienentämiseksi täytyy pääsääntöisesti muokata konesalin rakennetta ja ilmavirtojen kulkureittejä, koska ilmaa on vaikea kontrolloida. Ilman jakelun suunnittelu konesaleissa edistää energiatehokkuutta parhaiten. (Cho, Woo, 2020. 3-4.)

Palvelimille tulevien tehtävien järjestäminen ja sijoittaminen tietyille palvelimille säästää mahdollisesti energiaa. Erätöiden eli yksittäisten tehtävien sijoittaminen palvelimille, joissa on tehokkain viilennys, voi vähentää lämpökuorman määrää salissa. Tyhjäkäynnillä olevien koneiden sammuttaminen tuo myös energiasäästöjä. Palvelimet eivät suorita tehtäviä jatkuvasti vuorokauden ympäri, vaan vain silloin kun palvelimen tarvitsee suorittaa työ. Hewlett-Packard:n (HP) suorittamassa testiajossa käytettiin edellä mainittuja menetelmiä ja niillä saavutettiin 32 % energiasäästöt konesalissa. (Bash, Forman, 2007, 1-7.)

Ulkona vallitsevan ilman tuominen konesaliin ja sen hyödyntäminen jäähdytyksessä on todettu toimivaksi ratkaisuksi energian säästämiseksi. Intel on suorittanut 10 MW konesalille 10 kuukauden pituisen testin, jossa käytettiin hyväksi vapaata jäähdytystä. Intel sai tulokseksi 2,87 miljoonan Yhdysvallan dollarin rahallisen säästön. Ongelmana vapaan ilman hyödyntämisessä on sääolot, jotka rajoittavat ilman lämpötilaa. Konesalien optimaalinen lämpötila vaihtelee, mutta tyypillisesti palvelinsalissa vallitsevan lämpötilan tulee olla alle 25 °C. Konesalit tulisi sijoittaa kuivan ja viileän ilmaston alueille. Esimerkiksi Melbournessa Etelä-Australiassa olisi mahdollista hyödyntää ulkoilmaa noin 5500 tunnin verran vuodessa, joka on erittäin hyvä. (Zhang et al. 2014, 173.)

Viileän veden hyödyntäminen jäähdytyksessä on mahdollista. Vesi pystyy sitomaan suuria määriä lämpöä lämmönjohtokyvyn vuoksi, joten sitä on mahdollista hyödyntää konesalin viilentämisessä. Veden käyttäminen suoraan on kuitenkin riskialtista, koska vauriot laitteistossa voi päästää veden virtaamaan laitteistoon. Laitteisto ei kestä vettä, vaan vaurioituu ja toimintakyky heikkenee tai lakkaa. Viileän veden jatkuva saanti luonnosta on myös haasteellista. Vettä voidaan kuitenkin hyödyntämään epäsuorasti esimerkiksi ilmajäähdytysjärjestelmissä. Ilmajäähdytyksessä vettä voidaan hyödyntää jäähdytystornissa tai ns. Dry cooler:ssa. Näiden kahden menetelmän avulla on mahdollista hyödyntää luonnon vettä ja pienentää konesalin energiankulutusta. (Zhang et al. 2014, 174-175.)

2.2.2 Hukkalämmön hyödyntäminen

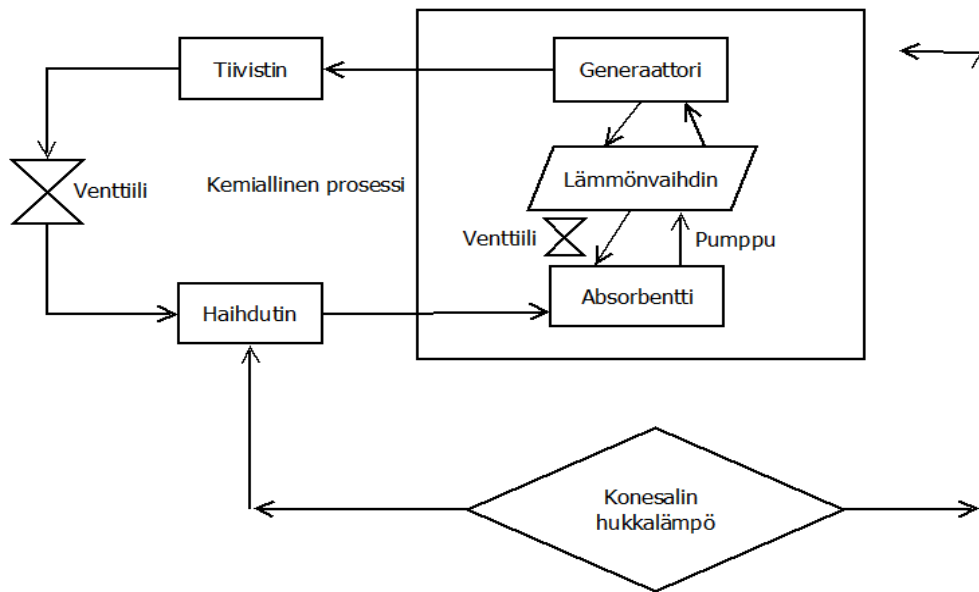
Konesaleissa tiedetään syntyvän suuria määriä lämpöenergiaa, IT-laitteiden tekemän työn vuoksi. Hukkalämpöä voidaan hyödyntää veden lämmittämisessä, voimalaitoksen tukemisessa, pietsosähköisessä ilmiössä, veden puhdistamisessa ja biomassan tukemisessa. (Ebrahimi et al. 2013, 628.) Jokainen hyödyntämisen menetelmä vaatii infrastruktuurin, joka mahdollistaa lämmön hyödyntämisen. Hukkalämmön hyödyntämiseen vaikuttavat sijainti ja ympärillä oleva infrastruktuuri.

Yksi parhaimmista tavoista hyödyntää hukkalämpöä on kasvien tarvitseman lämmön tarjoaminen, kaukolämmön tuottaminen tai veden lämmitys. Konesaleista saatava hukkalämpö on noin 35–45 °C, joka soveltuu hyvin lämmittämiseen. Konesalin koko vaikuttaa hukkalämmön määrään ja tämän vuoksi hyötykäytön soveltuvuus vaihtelee. Lämmitys-, vesi- ja ilmastointi (LVI) tarpeet voidaan täyttää konesaleissa, mutta hukkalämmön määrä voi myös olla soveltuva omakotitalolle tai pienelle naapurustolle. Lämmön jakaminen on mahdollista usealla pienellä konesalilla ympäri asuinalueita ja tällä pystyttäisiin Yhdysvaltojen alueella saavuttamaan noin 300 \$ säästöt palvelinta kohden. Hukkalämmön hyödyntäminen kaukolämmön tukemiseksi on myös mahdollista. (Ebrahimi et al. 2013, 629.) Hukkalämmön määrän tulee kuitenkin olla hyvin suuri, jotta voidaan kokonainen asuinalue kattaa. Pienien konesalien sijoittaminen asuinalueelle mahdollistaa kaukolämmön tukemisen, mutta konesalien määrän ja kuormituksen tulisi olla suurta, jotta kaukolämpöä ei tarvitsisi.

Kaukolämmön tiedetään olevan yleisempää Euroopassa, kuin Yhdysvalloissa. Helsingissä toisen maailmansodan aikaiseen bunkkeriin asennettu 2 MW:n konesali tuotti tarpeeksi hukkalämpöä, jolla pystyttiin lämmittämään vettä, jolla lämmitettiin noin 500 omakotitaloa tai 1000 asuntoa. Hukkalämpöä voidaan siis hyödyntää myös veden lämmitykseen, jolla voidaan lämmittää esimerkiksi asuntoja. (Ebrahimi et al. 2013, 630.)

Hukkalämpöä voidaan myös hyödyntää, jos konesalissa toimii ilmajäähdytys. Tavallisesti ilmaa poistetaan tilasta kompressorin avulla, mutta konesaleissa olisi mahdollista hyödyntää kompressorin sijasta absorboivaa ainetta. Aineeseen sitoutuisi hukkalämpöä, joka kul-

kisi aineen mukana lämmönvaihtimeen ja sitä kautta generaattoriin. Generaattorista voidaan mukaan palata aikaisempiin vaiheisiin, jolloin syntyy jatkuva sykli. Tällä menetelmällä on potentiaalia laajaan hukkalämmön hyötykäyttöön. Kuvassa 5 on esitettyä absorptiogeneraattorin toiminta.



Kuva 5. Absorptio generaattorin toiminta hukkalämpöä hyödyntäen. (Ebrahimi et al. 2013, 632)

Hukkalämpöä voidaan hyödyntää puhtaan veden valmistuksessa merivedestä. Lämpöä käytetään suolaveden kuumentamiseen sekä höyrystämiseen. Höyrystämiseen käytettävää kattilaa voitaisiin mahdollisesti lämmittää hukkalämmöllä. Tämä hukkalämmön hyödyntäminen menetelmä olisi hyvä, koska energiakulut vähenisivät ja puhdasta vettä pystyttäisiin tuottamaan alhaisella energiankulutuksella. Kattila vaatii kuitenkin n. 75 °C asteen lämpötilan ja tämän lämpötilan saavuttamiseksi konosalissa täytyy syntyä lämpöä kattava määrä riittävällä ajalla. Tarvittavan lämpötilan lisäksi sijainti on ongelmallinen tälle menetelmälle, koska veden puhdistus ei ole priorisoitua konosalien läheisyydessä. Konesalin tulisi sijaita alueella, jossa puhtaan veden valmistamiselle olisi tarve. (Ebrahimi et al. 2013, 635.)

Jäähdytyksen tehostamisella pienennetään konesaleissa syntyvän lämpökuorman määrää. Lämpötila ei pääse konesalissa kasvamaan, vaan tila on jatkuvasti optimaalisessa lämpöti-

lassa. Jäähdytyksen tehostaminen heikentää kuitenkin hukkalämmön hyödyntämisen mahdollisuuksia, koska riittävää määrää lämpöä hyödyntämiseen ei ole tarjolla. Hukkalämmön hyödyntämiseksi on siis mahdollistettava lämpötilan nouseminen konesaleissa. Konesaleissa voidaan tehostaa jäähdytystä tai hyödyntää hukkalämpöä ulkoisien tekijöiden perusteella. Viileässä ilmassa sijaitsevan konesalin on todennäköisesti parempi tehostaa jäähdyttämistä, kun taas asuinalueella sijaitseva konesali voisi hyödyntää hukkalämpöä asuinalueen lämmityksen tukemiseksi.

3 KONESALIEN HIILIJALANJÄLKI

Hiilijalanjälki toimii mittarina, joka kertoo toiminnasta syntyvien kasvihuonekaasujen määrästä. Hiilijalanjäljen avulla on mahdollista tehdä tarkkoja havaintoja erilaisista kasvihuonekaasupäästöistä ja niiden lähteistä. Havaintoihin pohjautuen palveluntarjoaja tai henkilö kykenee tekemään muutoksia, joiden avulla hiilijalanjälki pienenee. Yhä useampi toimija, yritys ja henkilö välittää hiilijalanjäljestä ja sen tuominen esille julkisuuteen koetaan tärkeäksi. (Pandey al. 2010.)

Hiilijalanjäljen merkityksen kasvaessa siihen kiinnitetään yhä enemmän huomiota. Suurin osa konesalin energiankulutuksesta on elinkaaren vaiheessa, jossa konesali on toiminnassa. Tämän vuoksi tässä kandidaatintyössä keskitytään tarkastelemaan toiminnan hiilijalanjälkeä, rajaten pois konesalin infrastruktuurin rakentamisesta syntyvän hiilijalanjäljen.

3.1 Hiilijalanjäljen määrittäminen

Hiilijalanjäljen määrittämisessä tarkastellaan tyypillisesti tuotteen, henkilön, palvelun tai toiminnan kokonaisuutta sen elinkaarinäkökulmasta. Hiilijalanjälki kertoo ilmaan päästettyjen tai ilmasta poistettujen kasvihuonekaasujen määrästä. Elinkaaritarkastelussa pyritään tarkastelemaan tuotteen elinkaaren eri vaiheita ja näiden vaikutuksia. (Pandey et al. 2010.) Hiilijalanjälki on yksi osa elinkaaritarkastelua. Tässä työssä kiinnitetään huomiota vain konesalin elinkaaren käyttövaiheeseen, jossa konesali on toiminnassa ja tarjoaa palvelua. Konesalien elinkaari koostuu pääsääntöisesti toiminnan vaiheesta. Jatkuvan veden- sekä energiankulutuksen vuoksi useiden vuosien ajan toiminnallinen vaihe tuottaa suuren osan koko hiilijalanjäljestä.

Konesalien hiilijalanjälkeen vaikuttavat kaksi tekijää, joita ovat sijainti, IT-laitteiston kuormitus ja energiatehokkuus. Sijainnin merkitys on erittäin tärkeä ja vaikuttaa energiankulutukseen. Ulkona vallitseva lämpötila vaikuttaa positiivisesti tai negatiivisesti konesalin energian kulutukseen. Viileä ulkoilma mahdollistaa pienemmän energian kulutuksen, kun taas lämmin ulkoilma nostaa jäähdytyksen tarvetta salissa. Konesalin käyttämä energia on riippuvainen sijainnista, koska energia saadaan lähimmästä jakeluverkosta. Sijainnin lisäksi IT-

laitteiston kuormituksella ja energiankulutuksella on suuri merkitys. Suuri kuormitus laitteistolle vaatii tehokkaampaa jäähdytystä salissa. Jäähdytyksen lisääminen nostaa energiankulutusta, mikäli jäähdytys toteutetaan ilmanvaihtolaitteiston avulla. Jakeluverkosta tarvittavan energian määrä pienenee laitteiston energiatehokkuuden kasvaessa, jolloin myös hiilijalanjälki pienenee. (Bouley, 2011, 7-9.)

3.1.1 Kasvihuonekaasut

Kasvihuonekaasut ovat suurin syy ilmastonmuutokseen. Suurin osa kasvihuonekaasuista on peräisin ihmisen toiminnasta maapallolla. Kasvihuonekaasut eivät estä auringon valon pääsyä ilmakehään, mutta estävät sen heijastumisen pois ilmakehästä. Tämän vuoksi globaali lämpötila on jatkuvassa kasvussa. Merkittävimmät kasvihuonekaasut ovat hiilidioksidi (CO_2), dityppioksidi (N_2O) sekä metaani (CH_4). Merkittävin kasvihuonekaasujen lähde on energiantuotanto fossiililla polttoaineilla. (Doll, Baranski, 2011.)

Konesali kuluttaa suuren määrän energiaa vuodessa, eikä itse tuota kasvihuonekaasuja suoraan. Konesalin kasvihuonekaasupäästöiksi voidaan lukea energiantuotosta syntyvät päästöt. Fossiilissa polttoaineiden tuotannosta ja käytöstä syntyy kasvihuonekaasuja, kun taas uusiutuvat energianlähteet ovat päästöttömiä. Konesalien kasvihuonekaasupäästöt ovat siis suoraan riippuvaisia konesalin energialähteestä. European Environment Agencyn hiilidioksidipäästökertoimien perusteella on mahdollista tarkastella sähkönkulutuksesta syntyviä hiilidioksidipäästöjä. Kertoimet ovat laskettu julkisen sähköntuotannon hiilidioksidipäästöistä ja sähkön bruttotuotannon suhteesta. Kertoimen yksikkönä on gramma CO_2 kilowattituntia kohden ($\text{g CO}_2/\text{kWh}$). Vuonna 2016 EU:n jäsenmaiden keskiarvo kerroin oli 295,6 $\text{g CO}_2/\text{kWh}$. (European Environment Agency, 2018.) Kerroin vaihtelee alueittain välillä 150 – 300 $\text{g CO}_2/\text{kWh}$.

Yhden konesalin kasvihuonekaasupäästöt ovat erittäin suuria. Konesalien kokoluokkien ja lukumäärän kasvun vuoksi hiilijalanjälkeä tulisi pienentää mahdollisin keinoin. Konesalien hiilijalanjäljen pienentäminen voisi onnistua energiatehokkuuden parantamisen avulla. Infrastruktuurin kehittämisen vaikutus on pieni kokonaisuuteen nähden. Konesali voi toimia kymmeniä vuosia ja joka vuosi tuottaa tuhansien tonnien hiilidioksidipäästöt.

3.1.2 Kestävyyden arviointi

The Green Grid (TGG) on useiden toimijoiden yhdistys, joka on pyrkinyt kehittämään konesalien energiatehokkuutta. TGG on kehittänyt useita arvoja, jotka kuvastavat konesalin tehokkuutta eri osa-alueilla. Power Usage Effectiveness (PUE), Data Center Energy Productivity (DCeP), Carbon Usage Effectiveness (CUE) ja Water Usage Effectiveness (WUE) ovat konesalien toiminnan tarkasteluun laskettavia arvoja. Arvoja voidaan hyödyntää muiden konesalien vertailuun sekä kestävä kehityksen tarkasteluun ja kehittämiseen. (Azevedo et al. 2011, 3-6; Patterson et al. 2010, 3-6.)

WUE-arvo kertoo, kuinka hyvin konesali käyttää vettä suhteessa IT-laitteiston kuluttamaan energiaan. WUE-arvossa vuodessa käytetty vesimäärä jaetaan IT-laitteiston kuluttamalla energialla. Vuodessa käytettävään vesimäärään sisällytetään kaikki jäähdytykseen ja laitteiston toiminnan tukemiseksi käytetty vesimäärä. IT-laitteiston kuluttamaan energiaan sisällytetään kaikki laskentaan, tallentamiseen, jakamiseen kuuluvien komponenttien energia sekä laitteiden valvomiseen kuluva energia. WUE-arvon yksikkö on litraa kilowattituntia kohden (l/kWh). WUE-arvon laskemiseen tarvittava kaava on esitetty yhtälössä 2. (Azevedo et al. 2011, 3-7.)

$$WUE = \frac{\text{Vuotuinen vedenkäyttö}}{\text{IT laitteiston energiankulutus}} \quad (2)$$

CUE -arvo kertoo konesalin toiminnasta syntyvien hiilidioksidipäästöjen suhteen IT-laitteiston kuluttamaan energiaan. CUE -arvon tulisi olla mahdollisimman lähellä arvoa nolla, koska se kertoisi konesalin toimivan ilman hiilidioksidipäästöjä ja hiilijalanjälki olisi tällöin pienin mahdollinen. Laskennassa hiilidioksidipäästöihin luetaan energiantuotosta ja jakelusta syntyvät päästöt. Käytännössä arvon suuruus on riippuvainen konesalin kuluttaman energian tuotantotavasta. Uusiutuvalla energialla arvo on lähellä nollaa. CUE-arvon yksikkö on kilogrammaa CO₂ ekvivalenttia kilowattituntia kohden (kg CO₂-e/kWh). CUE -arvon laskenta kaava on esitetty yhtälössä 3. (Azevedo et al. 2010, 3-6.)

$$CUE = \frac{\text{Kokonaismäärä CO}_2\text{-e päästöjä konesalin toiminnasta}}{\text{IT laitteiston energiankulutus}} \quad (3)$$

CUE-arvo voidaan myös esittää toisen yhtälön avulla. Konesalin PUE-arvo kertoo kokonaisenergian suhteen IT-laitteiston kuluttamaan energiaan. Kun tämä arvo kerrotaan CEF-arvolla (Carbon Emission Factor) saadaan tulokseksi CUE -arvo. CEF-arvo on aluekohtainen kerroin, joka kertoo edeltävän vuoden hiilidioksidipäästöt alueelta. CEF-arvo saadaan tyypillisesti hallituksen julkaisemana. (Azevedo et al. 2010, 3-6.)

$$CUE = CEF \times PUE \quad (4)$$

$$CUE = \frac{\text{CO}_2\text{-e päästöt (kgCO}_2\text{eq)}}{\text{Energian yksikkö (kWh)}} \times \frac{\text{Konesalin kokonais energiankulutus}}{\text{IT laitteiston energiankulutus}} \quad (4)$$

CUE -arvolla on WUE -arvon tavoin mahdollista edistää konesalin toimintaa kestävämmäksi ja ympäristöystävällisemmäksi. CUE -arvo kertoo suoraan päästöjen määrän energiankulutukseen verrattuna, joten arvon pienentäminen on mahdollista energiantuotantoratkaisuilla. Esimerkiksi aurinkopaneelit konesalien katolla voivat toimia ratkaisuna. (Azevedo et al. 2010, 7.)

WUE-, PUE- ja CUE-arvot kertovat hyvin paljon konesalien kestävydestä ympäristönäkökulmasta. Arvojen avulla konesaleja voidaan vertailla ja tutkia, mitkä konesalit toimivat hyvin ja mitkä eivät. Konesalia voidaan analysoida arvojen avulla ja niiden perusteella löytää kehityskohteita. Arvojen avulla konesalin suunnittelussa voidaan pyrkiä lopputulokseen, jossa ympäristövaikutukset pienenevät.

4 CASE: KONESALIN ENERGIATEHOKKUUDEN MERKITYS HIILIJALANJÄLJESSÄ

Tässä kappaleessa käsitellään konosalien energiatehokkuuden merkitystä case-esimerkin avulla. Kahden konosalin vertailussa on tavoitteena selvittää energiatehokkaiden menetelmien hyödyntämisen vaikutus hiilijalanjälkeen. Tarkoituksena on vertailla kahta konesalia, joiden IT-laitteiston energiankulutus on sama. Salien IT-laitteiston kulutus on 10 MW. Konesaleissa IT-laitteiston kulutus on ainoa yhteinen tekijä, jotta tuloksia voidaan verrata realistisesti. Case-tarkastelussa hiilijalanjälki lasketaan koskemaan yhden vuoden toimintaa ja konosalin muut elinkaaren vaiheet ovat rajattu pois. Konesalien toiminnan oletetaan olevan tasaista ja kuormitus on molemmissa saleissa samantasoista. Lopputulokseksi case-tarkastelussa on tavoitteena saada kokonaiskuva vuodessa syntyvästä hiilijalanjäljestä salia kohden. Hiilijalanjäljen lisäksi arvioidaan myös PUE-arvoja sekä niiden vaikutusta hiilijalanjälkeen.

4.1 Lähtötilanne

Ensimmäisen konosalin IT-laitteisto kuluttaa 10 MW. Konesali sijaitsee Suomessa, Haminaassa meren äärellä. Energiatehokkuuden parantamiseksi konesali voi käyttää vapaata ulkoilmaa jäähdytyksessä. Ulkoilmaa voidaan hyödyntää 6680 tuntia vuodessa. Tuntimäärän oletetaan olevan samaa tasoa Amsterdamissa käytössä olevien tuntien kanssa (Daraghmeh, 2017, 1228). Konesalin jäähdytyksen energiankulutus on normaalioloissa 7,5 MW. Muuhun laitteistoon konesalissa kuluu 7,5 MW, jolloin kokonaiskulutus on normaalitilassa 25 MW. Ulkoilmaa hyödyntäessä konesali ei tarvitse energiaa jäähdytykseen. Ilman vapaata jäähdytystä konosalin jäähdytysenergia saadaan voimalaitokselta, jonka päästökertoimena pidetään valtion energiantuotanto päästökertoimen mukaisesti. Vapaata ilmaa ei voida hyödyntää jäähdytyksessä tehokkaasti esimerkiksi kesällä. European Environment Agencyn mukaan Suomessa vuonna 2016 hiilidioksidipäästökerroin oli 112,8 g CO₂-e/kWh.

Toinen konesali sijaitsee Saksassa, Berliinissä. Konesalin kokonaisenergiankulutus on 25 MW ja energian jakautuminen komponenttien välillä on sama kuin ensimmäisessä konesalissa normaalitilassa. Konesalin täytyy käyttää jatkuvasti saliin rakennettua jäähdytysjärjes-

telmää, koska sen sijainnin vuoksi on mahdotonta saavuttaa hyötyä vapaasta ilmasta. Jäähdytysjärjestelmän CRAC-laite käyttää energiaa kierrätettävän ilman viilentämiseen. Saksassa vuonna 2016 päästökerroin oli European Environment Agencyn mukaan 440,8 g CO₂-e/kWh.

4.2 Laskennan tulokset

Suomessa sijaitsevan konesalin jäähdytysenergiaan kuluva energia on tavalliseen konesaliin verrattuna alhaisempi. Vuodessa on mahdollista hyödyntää 6680 tuntia viileää ilmaa jäähdytyksessä, joka laskee energiankulutusta. Yhden päivän aikana energiankulutus normaalitilassa on noin 27,4 kW. Vapaa jäähdytys vähentää jäähdytysenergian tarvetta vuodessa noin 278 päivän verran, jolloin kulutus pienenee 7,6 MW:lla. Konesali käyttää jäähdytykseen vuodessa 2,4 MW, joka on normaalitilannetta 76 % pienempi kulutus.

Taulukossa 1 on esitetty energiankulutus konesalissa 1. Vapaa-ilma vähentää vuodessa -7,6 MW tehontarvetta, joka pienentää kokonaisenergiankulutusta. Konesalille jää kokonaiskulutukseksi 17,4 MW. Tämän arvon avulla voidaan selvittää energiankulutuksesta syntyvät hiilidioksidipäästöt ja tarkastella hiilijalanjälkeä.

Taulukko 1. Konesalin 1 energiankulutus.

	Konesali 1 kulutus [MW]
IT Laitteisto	10
Jäähdytys	7,5
Vapaa ilma	-7,6
Muu	7,5
Kokonaisenergiankulutus	17,4

Konesalin hiilijalanjälki lasketaan energiankulutuksen perusteella. Taulukosta 1 selviää, että konesalin 1 kokonaisenergiankulutus vuodessa on 17,4 MW. Konesalin oletetaan olevan tason IV konesali, jolloin ylhäällä olo aika olisi vuodessa noin 8 736 h. Kun konesalin

energiankulutus kerrotaan ylhäällä olo ajalla sekä päästökertoimella, saadaan tulokseksi 17 t CO₂-e.

Konesalin kokonaiskulutuksesta voidaan laskea myös CUE -ja PUE -arvot. Yhtälöt arvojen laskentaa on esitettyinä kaavassa 1 ja 3. Taulukossa 2 on esitettyinä laskennasta saadut tulokset.

Taulukko 2. Konesalin 1 hiilijalanjälki.

	t CO ₂ -e / vuosi	PUE	CUE [t CO ₂ -e]
Konesali 1	17,1	1,74	1,7

Konesali 2 on täysin voimalaitoksen energialla toimiva sali, joka käyttää jäähdytykseen energiaa. Lähtötiedot konesaliin 1 verrattuna ovat samanlaiset, energiankulutus osa-alueittain, konesalin taso on IV ja kulutus on tasaista ympäri vuoden. Konesalille 2 saadaan laskettua kokonaisenergian kulutus, hiilidioksidipäästöt sekä PUE-ja CUE-arvot. Taulukossa 3 ja 4 on esitettyinä laskennasta saadut arvot konesalille 2.

Taulukko 3. Konesalin 2 energiankulutus.

	Konesali 2 kulutus [MW]
IT Laitteisto	10
Jäähdytys	7,5
Vapaa ilma	0
Muu	7,5
Kokonaisenergiankulutus	25

Taulukko 4. Konesalin 2 hiilijalanjälki.

	t CO ₂ -e / vuosi	PUE	CUE [t CO ₂ -e]
Konesali 2	96,3	2,5	9,6

4.3 Tuloksien tarkastelu

Tulokset esittävät kahden jäähdytystavaltaan erilaisen konosalin vuotuiset hiilidioksidipäästöt. PUE- ja CUE-arvot ovat tarkoitettu tukemaan tarkastelua. Hiilidioksidipäästöt ovat vuoden ajalta ja voidaan olettaa, että päästöt ovat vuosittain yhtä suuria. Konesali voi toimia jopa 10 vuotta, joten hiilidioksidipäästöjen määrä toiminnasta on hyvin suuri ja merkittävä. Konesalin 1 energiankulutus on 7,6 MW pienempi kuin konosalin 2 ja tämä ero näkyy 79 t CO₂-e päästöinä. Konesalin 2 hiilidioksidipäästöt vuodessa olivat 96,3 t CO₂-e. Konesalin käyttämällä energialla on siis erittäin suuri merkitys, koska konesali 2 vastaa hiilidioksidipäästöiltään 5 kokonaista konesali 1:stä. Ainoa ero konesaleissa on vapaan ilman hyödyntäminen ja se muodostaa merkittävän eron.

Hiilidioksidipäästöihin laskennassa vaikuttavat suuresti päästökertoimet, koska niiden ero on 328 g CO₂-e/kWh. Sijainnin merkityksessä tulee huomioida päästökertoimien ero, mutta päästökerroin on laaja ja voi vaihdella huomattavasti alueittain. Todellisuudessa päästökerroin voi olla eri, koska case-tarkastelussa käytetty päästökerroin on valtion kattava ja keskiarvon avulla laskettu. Päästökertoimeen on otettu huomioon useat eri voimalaitokset, joissa sähköä tuotetaan ja näiden päästöt voivat vaihdella. Vuonna 2016 Suomessa sähköstä 45 % tuotettiin uusiutuvalla energialla (Statistic Finland, 2017). Saksassa uusiutuvalla energianlähteillä tuotettiin 33,5 % sähköstä (Fraunhofer ISE, 2020).

Nettoenergiankulutukseen sijainti vaikuttaa hyvin vahvasti. Konesaleja voi sijaita missä vain, mutta esimerkiksi Keski-Euroopassa ei ole mahdollista hyödyntää energiatehokkaita menetelmiä, kuten vapaan ilman jäähdytystä. Sijainnin merkitys konosalin hiilijalanjäljessä on yksi tärkeimmistä tekijöistä energiatehokkuuden kannalta. Case-tarkastelussa konosalin 1 jäähdytykseen kului noin 75 % vähemmän energiaa kuin konesalissa 2. Tämä energiankulutuksen ero perustuu täysin sijainnin mahdollistamaan vapaaseen jäähdytykseen.

PUE-arvojen erot kertovat konesaleissa energiankäytöstä. Konesalin 1 PUE-arvo on alle 2,0, joka kertoo IT-laitteiston kuluttavan enemmän energiaa kuin muu laitteisto konesalissa. Konesalissa 2 PUE -arvo on 2,5, jonka avulla tiedetään IT-laitteiston kuluttavan noin 40 % koko

konesalin energiasta. Konesalissa 2 energiatehokkuus on huomattavasti heikompi kuin konesalissa 1, koska konesalissa 1 IT-laitteisto on pääsääntöinen energiankuluttaja. Konesalissa olisi tärkeää päästä PUE -arvoon, joka olisi mahdollisimman lähellä arvoa 1,0. Arvo 1,0 kertoisi, että konesalissa energiaa kuluisi ainoastaan IT-laitteistoon. Tämä on lähestulkoon mahdotonta, mutta teoriassa konesalin on mahdollista päästä lähelle arvoa 1,0. Konesalin sijoittaminen ympäristöön, jossa voi hyödyntää vapaata ilmaa jäähdytykseen ja vuodessa tehokkaasti aurinkopaneeleja on paras ratkaisu PUE-arvon pienentämiseen.

CUE-arvot kertovat kuinka, paljon hiilidioksidipäästöjä syntyy toiminnasta IT-laitteiston kuluttaman energian suhteen. Alhainen CUE-arvo kertoo toiminnan olevan kestävä ja arvo nollla kertoisi toiminnan olevan päästötöntä. Taulukoista 2 ja 4 voidaan lukea konesalien CUE-arvot. Konesalin 1. CUE-arvo on huomattavasti pienempi kuin konesalin 2. CUE-arvon tarkastelu on vaikeaa konesalien välillä, koska 10 MW laitteisto vaikuttaa laskennassa vain hiilidioksidipäästöjen pienenemiseen. Erilaisilla laitteiston arvoilla CUE-arvon tarkastelu olisi hyödyllisempää. CUE-arvojen vertailu ei poikkea hiilidioksidipäästöjen vertailusta tässä case-tarkastelussa.

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Konesalien hiilidioksidipäästöjen osuus maailman kokonaishiilidioksidipäästöistä on suuri, joten päästöjen pienentäminen on tärkeää. Konesalien määrän lisääntyminen maapallolla on todennäköistä, koska palveluita tuodaan verkkoon jatkuvasti lisää ja uusien konesalien kehittäminen korostuu. Konesalien energiankulutus sekä hiilidioksidipäästöt ovat jo merkittävä osa kokonaisuutta ja on tärkeää pitää päästötaso nykyisellä tasolla tai laskea. Olemassa olevien konesalien energiatehokkuutta tulisi kehittää energiatehokkaammaksi tai vaihtoehtoisesti energiantuotanto tulisi olla uusiutuvilla energianlähteillä.

Sijainnilla on suurin merkitys energiatehokkuuden parantamiseksi. Konesali, joka rakennetaan esimerkiksi meren äärelle on mahdollisesti parempi ratkaisu kuin rakentaa konesali sisämaahan, koska meren äärellä jäähdytys ratkaisut sekä hukkalämmön hyödyntäminen ovat molemmat mahdollisia. Meren läheisyydessä sijaitseva konesali voi hyödyntää viileää ilmaa tai käyttää hukkalämpöä meriveden puhdistamiseen käyttövedeksi. Case-tutkimuksessa osoitettiin ympäristön merkitys kahden konesalin välillä. Case-tarkastelussa valtion energiantuotannon päästökertoimella on merkittävä osuus, mutta ero on silti huomattava. Tulevaisuuden konesalien suunnittelussa tulisi keskittyä sijaintiin, energiantuotantoon ja hukkalämmön hyödyntämiseen. Konesalit ovat pinta-alaltaan laajoja rakennuksia, joihin on mahdollista lisätä esimerkiksi aurinkopaneeleja. Alue, joka mahdollistaa energiatehokkaiden ratkaisujen toteuttamisen on tärkein tekijä kestäväen konesalin rakentamisessa.

Olemassa olevaa laitteistoa on mahdollista kehittää energiatehokkaammaksi. Laitteiston optimoinnilla ja kuormituksen jakamisella on mahdollista pienentää energiankulutusta. Optimoinnin merkitys laitteiston energiankulutukselle on suuri, koska sen avulla nykyisiä konesaleja voidaan parantaa. Keskittyminen vain uusiin konesaleihin ei ole hyvä ratkaisu, koska olemassa olevan laitteiston elinikä on korkea.

Konesalien jatkuvan energiankulutuksen vuoksi toiminnasta seuraa hiilidioksidipäästöjä, vaikka konesalin laitteisto ei kuormittuisi jatkuvasti. Yksi keino globaalin energiankulutuksen pienentämiseksi konesalien osalta on kartoittaa, mitkä konesalit tuottavat kannattavaa

palvelua. Esimerkiksi pilvipalvelu, joka on käytössä yrityksissä tai oppilaitoksessa, todennäköisesti kuormittuu jatkuvasti. Pilvipalvelu on myös palvelu, jonka toiminta perustuu vuorokauden ympäri olevaan saatavuuteen. Tällainen konesali, jonka palvelua hyödynnetään jatkuvasti antaa vastikkeen energiankulutukselle. Toinen pilvipalvelu voi olla jatkuvasti ylhäällä ja saatavissa, mutta käyttäjämäärän ollessa hyvin alhainen konesali ei kuluta energiaa ilman vastiketta.

6 YHTEENVETO

Monet verkossa tapahtuvat toiminnot, laskennat, tiedon tallentamiset ja käsittelyt vaativat laitteiston suorittamaan edellä mainitut työt. Konesalit ovat rakennettuja tiloja, joissa sijaitsevat palvelinkoneet ovat suunniteltuja toteuttamaan nämä työt. Palvelinkoneita on erilaisia ja jokainen soveltuu tiettyyn työhön. Konesalit ovat jatkuvasti toiminnassa, jotta palvelut olisivat saatavilla ympäri vuorokauden vuoden jokaisena päivänä. Infrastruktuuri on rakennettu niin, että toiminta on taattua ja häiriöiden määrä olisi minimaalinen. Yksi merkittävimmistä tekijöistä on UPS, joka takaa IT-laitteistolle jatkuvan energian. Konesalien saatavuuden eli toiminnassa olo ajan vuodessa perusteella konesali voidaan luokitella tasoihin I, II, III tai IV. Luokat kertovat konesalin saatavuuden vuodessa ja kuinka lyhyen ajan konesali on alhaalla maksimissaan.

Konesaleissa energiankulutus koostuu pääsääntöisesti kahdesta komponentista, jäähdytyksestä ja IT-laitteistosta. Nämä kaksi komponenttia kuluttavat noin 70 % koko konesaliin tulevasta energiasta. Loput 30 % energiasta kuluvat ilmastointiin, sähköjakeluun, infrastruktuuriin sekä muihin tilan toimintaan ja ylläpitoon vaativiin toimiin. IT-laitteiston energiankulutus on suuri, koska laitteisto suorittaa jatkuvasti tehtäviä. Laitteiston suorittaessa tehtäviä saapuva energia muuttuu työn aikana lämmöksi, kun suuri energia työssä muuttuu lämmöksi konesalin lämpötila nousee korkeaksi. Konesalien optimaalinen lämpötila on n. 23°C eli tavallisen huoneenlämpötilan kaltainen. Konesalien tilan jäähdyttämistä varten on rakennettu tyypillisesti ilmalla toimiva jäähdytyssystemi. Jäähdytys toimii jatkuvasti IT-laitteiston lailla, jotta lämpötila ei kohoaisi yli optimaalisen rajan.

Tiloihin syntyvää hukkalämpöä on mahdollista hyödyntää, mutta hyödyntäminen vaatii tutkimusta ja infrastruktuurin kehittämistä. Hukkalämpöä on vaikea hyödyntää, koska lämpötila vaihtelee ja lämpöä hyödyntäviä kohteita ei ole valmiina konesaliin kytkettynä. Hukkalämpöä voidaan käyttää esimerkiksi kaukolämpönä, kasvihuoneiden lämmittämiseen tai veden lämmittämiseen. Näiden käyttökohteiden hyödyntäminen vaatisi infrastruktuurin muutoksia ja ratkaisujen käytännön toimivuudesta ei ole täyttä varmuutta.

Konesalien hiilijalanjälki selvitettiin case-tarkastelussa. Konesalien hiilijalanjälki laskettiin kahdelle konesalille, joiden energiankulutus oli sama, mutta konesalit sijaitsivat eri maantieteellisissä suhteissa. Hiilijalanjälki laskettiin vuotuisen energiankulutuksen pohjalta. Hiilijalanjäljen suuruuksissa oli merkittävän suuri ero. Hiilidioksidipäästöjen välillä on 79 t CO₂-e ero vuodessa, joka johtuu kahdesta tekijästä, energiatehokkuudesta ja valtiokohtaisesta päästökertoimesta. Suomessa sijaitsevan konesalin hiilijalanjälki oli huomattavasti pienempi kuin Saksassa sijaitsevan konesalin. Suomessa sijaitseva konesali käytti vapaata ilmaa jäähdytykseen eli meren läheisyydessä olevaa viileää ilmaa hyödynnettiin konesalin jäähdyttämisessä. Suomen päästökerroin oli myös pienempi kuin Saksan European Environment Agencyn mukaan.

Konesalien energiankulutus on noin 1.3 % globaalista energiankulutuksesta. Energiatehokkuuden parantaminen on tehokkain ratkaisu konesalien hiilijalanjäljen pienentämiseksi. Energiatehokkuuden parantamiseksi on olemassa monia ratkaisuja, mutta valtaosa on teoreettisia. Käytännön ratkaisu on esimerkiksi vapaan ilman käyttäminen, joka mahdollistaa jäähdytykseen kuluvan energian vähenemisen huomattavasti. Case-tarkastelussa Suomessa sijaitsevan konesalin jäähdytykseen kuluva energiamäärä oli 75 % pienempi kuin Saksassa sijaitsevan.

Konesalien energiatehokkuuden parantaminen tulee todennäköisesti olemaan merkittävässä roolissa tulevaisuudessa. Suoratoistopalveluiden, tiedon tallentamisen ja laskennan tarpeen kasvaessa nykyisessä yhteiskunnassa on kehitettävä ratkaisuja energiankulutuksen pienentämiseksi. Tässä kandidaatintyössä tarkasteltiin hyvin suppeasti konesalia ja tulokseksi syntyi peruskäsitys konesalin energiataseesta ja hiilijalanjäljestä.

LÄHTEET

Avelar Victor, Dan Azevedo, Alan French. PUE: a comprehensive examination of the metric. [verkkodokumentti]. [viitattu 10.02.2020]. Saatavissa: 2nikom.in/Downloads/0a58778d-fc96-4482-8c46-13abe76b015c.pdf

Avgerinou Maria, Paolo Bertoldi, Luca Castellazzi. Trends in Data Centre Energy Consumption under the European Code of Conduct for Data Centre Energy Efficiency. [verkkodokumentti]. [viitattu 11.02.2020]. Saatavissa: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=2ahU-KEwjQxPPPyennAhUEkMMKHVBdCBsQFjA-BegQIARAB&url=https%3A%2F%2Fwww.mdpi.com%2F1996-1073%2F10%2F10%2F1470%2Fpdf&usg=AOvVaw2p-9jiX_RapwoJis2vCh7i

Azevedo Dan, Christian Belady, Jack Pouchet. Carbon usage effectiveness (CUE): A Green Grid Data Center Sustainability Metric. [verkkodokumentti]. [viitattu 21.02.2020]. Saatavissa: https://www.netalis.fr/wp-content/uploads/2016/04/Carbon-Usage-Effectiveness-White-Paper_v3.pdf

Azevedo Dan, Christian Belady, Jack Pouchet. Water usage effectiveness (WUETM): A green grid data center sustainability metric. [verkkodokumentti]. [viitattu 21.02.2020]. Saatavissa: <https://airatwork.com/wp-content/uploads/The-Green-Grid-White-Paper-35-WUE-Usage-Guidelines.pdf>

Bash Cullen, George Forman. Cool Job Allocation. Measuring the Power Savings of Placing Jobs at Cooling-Efficient Locations in the Data Center. [verkkodokumentti]. [viitattu 14.02.2020]. Saatavissa: <https://www.hpl.hp.com/techreports/2007/HPL-2007-62.pdf>

Bouley Dennis. Estimating a Data Center's Electrical Carbon Footprint. [verkkodokumentti]. [viitattu 26.02.2020]. Saatavissa: https://sg.insight.com/content/dam/insight/en_US/pdfs/apc/apc-estimating-data-centers-carbon-footprint.pdf

Cho Jinkyun, Jesang Woo. 2020. Applied Thermal Engineering. Development and experimental study of an independent row-based cooling system for improving thermal performance of a data center. vol 169. [verkkodokumentti]. [viitattu 13.02.2020]. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359431119321064>

Daraghmeh, Hafiz M. & Wang, Chi-Chuan. 2017. A review of current status of free cooling in datacenters. Applied Thermal Engineering, vol 114. 1224-1239. [verkkodokumentti]. [viitattu 11.03.2020]. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S135943111632405X>

Doll Julie E., Marci Baranski. Greenhouse Gas Basics. [verkkodokumentti]. [viitattu 25.02.2020]. Saatavissa: https://www.swmpc.org/downloads/e3148_climate_change_1.pdf

Ebrahimi Khosrow, Gerard F. Jones, Amy S. Fleischer. 2014. Renewable and Sustainable Energy Reviews. A review of data center cooling technology, operating conditions and the corresponding low-grade waste heat recovery opportunities, vol 31. 622-638. ISSN 1364-0321. [verkkodokumentti]. [viitattu 13.02.2020]. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032113008216>

European Environment Agency. CO₂ emission intensity. [internet-sivu] [viitattu 25.02.2020]. Saatavissa: [https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/co2-emission-intensity-5#tab-googlechartid_chart_11_filters=%7B%22rowFilters%22%3A%7B%7D%3B%22columnFilters%22%3A%7B%22pre_config_ugeo%22%3A%5B%22European%20Union%20\(current%20composition\)%22%5D%7D%7D](https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/co2-emission-intensity-5#tab-googlechartid_chart_11_filters=%7B%22rowFilters%22%3A%7B%7D%3B%22columnFilters%22%3A%7B%22pre_config_ugeo%22%3A%5B%22European%20Union%20(current%20composition)%22%5D%7D%7D)

Fraunhofer ISE. Net public electricity generation in Germany in 2016. [verkkodokumentti]. [viitattu 02.04.2020]. Saatavissa: https://www.energy-charts.de/energy_pie.htm?year=2016

Gómez Jorge Marx, Manuel Mora, Mahesh S. Raisinghanim Wolfgang Nebel, Rory V. O'Connor. Engineering and Management of Data Centers: An IT Service Management Approach. [verkkodokumentti]. [viitattu 10.02.2020]. Saatavissa: <https://www.springer.com/gp/book/9783319650814>

Huang Pei, Benedetta Copertaro, Xingxing Zhang, Jingchun Shen, Isabelle Löfgren, Mats Rönnelid, Jan Fahlen, Dan Andersson, Mikael Svanfeldt. 2020. Applied Energy. A review of data centers as prosumers in district energy systems: Renewable energy integration and waste heat reuse for district heating, vol 258. ISSN 0306-2619 [verkkodokumentti]. [viitattu 12.02.2020]. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261919317969>

Joshi Yogendra, Kumar Pramod. Energy Efficient Thermal Management of Data Centers. [verkkodokumentti]. [viitattu 05.04.2022]. Saatavissa: https://books.google.fi/books?hl=fi&lr=&id=f0FSp3MmqTwC&oi=fnd&pg=PR5&dq=Joshi,+Kumar+2012&ots=Mo5aeeSfkK&sig=c5sLTiIRI4cZ3Hx3ZJgNS7KuH-4&redir_esc=y#v=onepage&q=Joshi%2C%20Kumar%202012&f=false

Li Li, Wenli Zheng, Xiaodong Wang, Xiaorui Wang. Coordinating Luquid and Free Air Cooling with Workload Allocation for Data Center Power Minimization. USENIX. [verkkodokumentti]. [viitattu 04.02.2020]. Saatavissa: https://www.usenix.org/system/files/conference/icac14/icac14-paper-li_li.pdf

Pandey Divya, Madhoolika Agrawal, jai Shanker Pandey. Carbon footprint: current methods of estimation. [verkkodokumentti]. [viitattu 19.02.2020]. Saatavissa: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10661-010-1678-y>

Sekerka Robert F.. Thermal Physics. Thermodynamics and Statistical Mechanics for Scientists and Engineers. [verkkodokumentti]. [viitattu 11.02.2020]. Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/283836915_Thermal_Physics_Thermodynamics_and_Statistical_Mechanics_for_Scientists_and_Engineers

Smith W. E., K. S: Trivedi, L. A. Tomek, J. Ackaret. Availability Analysis of Blade Server Systems. [verkkodokumentti]. [viitattu 12.02.2020]. Saatavissa: <https://pdfs.semanticscholar.org/67e1/52222568591f98199d482f5172412ff8a6cb.pdf>

Song Z., X Zhang, C. Eriksson. 2015. Energy Procedia. Data Center Energy and Cost Saving Evaluation, vol 75. 1255-1260. ISSN 1876-6102. [verkkodokumentti]. Päivitetty 28.08.2015. [viitattu 26.01.2020]. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610215009467>

Statistic Finland. Renewable energy sources produced 45 per cent of electricity and 57 per cent of heat. [internet-sivu]. [viitattu 02.04.2020]. Saatavissa: https://www.stat.fi/til/salatuo/2016/salatuo_2016_2017-11-02_tie_001_en.html

Wiedmann Thomas, Jan Minx. A Definition of 'Carbon Footprint'. ISA^{UK} Research & Consulting. [verkkodokumentti]. [viitattu 27.1.2020]. Saatavissa: <http://citeserx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.467.6821&rep=rep1&type=pdf>

Zhang Hainan, Shuangquan Shao, Hongbo Xu, Hiuming Zou, Changqing Tian. 2014. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Free cooling of data centers: A review, vol 35. 171-182. ISSN 1364-0321. [verkkodokumentti]. [viitattu 14.02.2020]. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032114002445>