

Heli Joensuu

Ekotehokkaan konesalin rakentaminen ja energiatehokkuuden mittaaminen

Tradenomi
Tietojenkäsittely
Syksy 2021



**KAMK • University
of Applied Sciences**

Tiivistelmä

Tekijä(t): Joensuu Heli

Työn nimi: Ekotehokkaan konesalin rakentaminen ja energiatehokkuuden mittaaminen

Tutkintonimike: Tradenomi, tietojenkäsittely

Asiasanat: Energiatehokkuus, konesali

Tämä opinnäytetyö käsittelee konesalien energiankulutusta ja ratkaisuja, joiden avulla pystytään tukemaan ympäristöystävällisempää toimintaa tietotekniikan kasvavan kulutuksen alla. Työ koostuu yleiskatsauksen konesalialan nykytilanteesta kuin myös syvällisemmin kartoittaa negatiivisia sekä positiivisia vaikuttajia, joiden käsittelemisellä saavutetaan parempi ymmärrys energiatehokkuuden parantamisen tärkeydestä.

Teorialukuja varten tutkittiin saatavilla olevaa tietoa energiatehokkaista konesaliratkaisuista sekä mittausteknologioiden hyödyntämisestä energiankulutuksen seurannassa. Työn tuloksena saatiin selville, että ekotehokkaiden ratkaisujen noudattaminen tuottaa konesalille taloudellisia sekä sosiaalisia hyötyjä ja vähemmän haittaa ympäristölle. Mittausteknologioiden todettiin auttavan energiankulutuksen ja konesalin toiminnan hallinnassa. Lisäksi havaittiin, että tietoisuuden ja kysynnän lisääntyessä useammat konesalit siirtyvät noudattamaan ympäristöystävällisempiä ratkaisuja.

Käytännön osuuteen suunniteltiin maailman teoreettisesti energiatehokkain konesali hyödyntäen teorialuvuissa todettuja suositeltavia ratkaisuja. Tämän lisäksi tutkittiin Kajaanin Ammattikorkeakoululle sijoittuvan konesalin rakennusprosessia eritoten ympäristöystävällisestä näkökulmasta. Havaintojen avulla pystyttiin päättämään, että työn aikana konesali noudatti energiatehokkaita ratkaisuja ja suunnitelmissa oli seurata samaa periaatetta.

Abstract

Author(s): Joensuu Heli

Title of the Publication: Building an Eco-Efficient Data Center and Measuring Energy Efficiency

Degree Title: Bachelor of Business Administration, Business Information Technology

Keywords: Energy efficiency, data center

This Bachelor's thesis addresses the energy consumption of data centers and solutions that can be used to support environmentally friendly operations under the growing consumption of information technology. The paper provides an overview of the current situation of the data center industry and goes more in-depth about the negative and positive influences. Going over these influences will lead to a better understanding of the importance of improving energy efficiency.

For the chapters comprised of theory, available information about energy efficient data center solutions and the use of surveying technologies for monitoring energy consumption were examined. As a result of the research, it was found that following eco-efficient solutions brings economic and social benefits for the data center as well as less harm for the environment. Surveying technologies were established to help control energy consumption and data center operations. In addition, it was discovered that as awareness and demand increase, more data centers proceed to follow environmentally friendly solutions.

For the practical portion of the thesis, a design of the world's theoretically most energy efficient data center was created using information acquired earlier in the chapters covering theory. Additionally, the construction process of a data center located at Kajaani University of Applied Sciences was studied especially from an environmentally friendly point of view. Based on the observations, it was possible to conclude that the data center followed energy efficient solutions during the study and was planned to follow the same principle in the future.

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Konesali.....	2
2.1	Konesalit ja energiatehokkuus	2
2.2	Energiatehokkuus tavoiteltavana ominaisuutena konesalille.....	3
2.3	Energiatehokkuus ja konesalit maailmalla	3
2.3.1	Konesalit Euroopassa	4
2.3.2	Konesalit Suomessa.....	5
2.3.3	Konesalit Amerikassa	5
2.3.4	Konesalit Aasiassa	6
2.3.5	Konesalit muualla.....	7
3	Energiatehokkaan konesalin rakentaminen	8
3.1	Sijainti	8
3.2	Laitetilat.....	9
3.3	Sähkönsyöttö.....	9
3.4	Laitteet	10
3.5	Jäähdytys	11
3.5.1	Jäähdytysratkaisut.....	11
3.5.2	Jäähdytysjärjestelmän hallinta.....	12
3.5.3	Optimaalinen jäähdyttäminen	13
3.5.4	Hukkalämmön hyötykäyttö.....	13
3.6	Muita rakentamiseen vaikuttavia muuttujia.....	14
4	Energiatehokkuuden mittaaminen.....	15
4.1	Mittaus- ja seurantajärjestelmät.....	15
4.2	Mittaamisessa käytettäviä laskukaavoja.....	16
4.2.1	Sähkönkulutuksen mittaaminen	18
4.2.2	Vedenkulutuksen mittaaminen.....	18
4.3	Mittaaminen käytännössä.....	19
5	”Maailman ekotehokkain konesali”	21
6	Energiatehokkaan konesalin rakentaminen Kajaanin ammattikorkeakoululle.....	23

6.1	Jäähdytys ja hukkalämmön hyödyntäminen	23
6.2	Energiankulutuksen seuraaminen	24
7	Pohdinta	25
7.1	Opinnäytetyön luotettavuus ja pätevyys	27
7.2	Jatkotutkimustarpeet ja -ideat	29
	Lähteet	30

Symboliluettelo

CSC	Center for Scientific Computing. Valtion ja korkeakoulujen omistama voittoa tavoittelematon osakeyhtiö, jota hallinnoi opetus- ja kulttuuriministeriö. Tarjoaa monipuolisia tietoteknisiä palveluja.
DCiE	Data Center infrastructure Efficiency. Laskentamenetelmä, jonka arvo kertoo, kuinka paljon konesalin energiasta menee tietotekniikan laitteille. Tulos ilmaistaan prosentteina.
PUE	Power Usage Effectiveness. Laskentamenetelmä, jonka arvo kuvastaa konesalin energiatehokkuutta mittaamalla, kuinka paljon energiasta menee tietotekniikan laitteille. Ihanteellinen arvo on 1.0.
UPS	Uninterrupted Power Supply. Virtalähteen ja tietotekniikan laitteiden välissä sijaitseva järjestelmä, joka takaa katkeamattoman virransaannin myös sähkökatkosten aikana.
WUE	Water Usage Effectiveness. Laskentamenetelmä, jonka arvo kertoo, kuinka paljon vettä konesali kuluttaa.
WUEsource	Water Usage Effectiveness source. Laskentamenetelmä, jonka arvo kertoo, kuinka paljon vettä konesali sekä ulkoiset energiantuottajat kuluttavat yhteensä.

1 Johdanto

Tietotekniikka on leviämässä maailman kattavaksi verkoksi. Tulevaisuudessa vielä useammalle, mutta jo nyt huomattavalle osalle ihmisistä internet on jokapäiväinen väline, ja ne fyysiset laitteet, jotka ovat päivittäisessä käytössä, ovat digitalisoituja. Pilvipalveluiden suosio on kasvussa, videoita saa katsottua suorälähetyksenä milloin tahansa ja esineiden internet houkuttelee käyttäjiä aina enemmän puoleensa. Ylläpitämään tätä kaikkea tarvitaan fyysinen sijainti, sillä mikään ei varsinaisesti ole materiaalitonta. Tätä varten ympäri maailmaa on pystytetty konesaleja; isoja rakennuksia täynnä tieto- ja viestintäteknikan laitteita, joiden tarkoituksena on ylläpitää tietoverkkoa.

Samaan aikaan ollaan ottamassa isompia askelia ja antamassa enemmän huomiota vihreille aatteille, minkä tarkoituksena on jakaa tietoa tuotettujen päästöjen haitoista ympäristöä ja ihmisiä kohtaan. Varsinkin valtavat määrät energiaa kuluttavat sekä päästöjä tuottavat konesalit tarvitsevat linjauksia, joiden mukaan pystytään säätelemään, miten ne vaikuttavat muuhun maailmaan. Tämä työ kuvaa, miten ympäristöystävällinen toiminta ja energiatehokkaiden ratkaisujen noudattaminen vaikuttavat konesalin toimintaan sekä millä tavoin konesali pystyy toteuttamaan kyseisiä ratkaisuja ekotehokkaan toiminnan puolesta.

Energiatehokkaiden ratkaisujen lisäksi käyttöön kuuluisi ottaa tilan sekä laitteiden jatkuva monitoroiminen sitä varten tuotetulla järjestelmällä, jonka avulla voidaan seurata energiankulutusta. Konesali tarvitsee toimiakseen keskeytymättömän virran resursseja, sillä ilman niitä konesali lopettaa toimintansa, mutta kuten voidaan päätellä, loputon resurssien edellyttäminen voidaan toteuttaa hyvin tai huonosti. Miten mittaaminen toimii ja mitä eri asioita on otettava huomioon, kun eri elementtejä käytetään resursseina, joita konesali vaatii toimiakseen? Mittaamisen avulla seurataan ratkaisujen vaikutusta ja täten konesalin vaikutuksesta ylläpidetään selkeämpää kuvaa. Jotta voidaan tietää, miten konesalit vaikuttavat ympäristöön, asiaa täytyy pohtia monelta eri kannalta, minkä takia tämä työ ottaa energiankulutuksen mittaamisen keskeisenä aiheena esille.

Teknologiaa pohdittaessa tulee mieleen Yhdysvallat tai Keski-Euroopan maat ja niiden pitkään jatkunut alan osaaminen. Isot yritykset, jotka kannattelevat suuria osuuksia markkinoilla ja etsivät uusia kohteita rakentaa seuraava datakeskuksena. Kyseessä on kuitenkin tarkka, mutta useimmille tiedostamaton prosessi, jonka vaikutus on suurempi kuin voitaisiin luulla eikä päätöksiä tehdä miten sattuu. Mikä vaikuttaa maiden väliseen suosioon, ja onko Suomella mahdollisuus kilpailla huippuyritysten suosioista maailmanlaajuisilla konesalimarkkinoilla?

2 Konesali

Koosta ja käytöstä riippuen konehuone, konesali tai datakeskus on tietotekniikan laitteille varustettu tekninen tila, joka voi palvella yhtä toimijaa tai useampaa yritystä. Konesalilla tarkoitetaan täten melkein mitä tahansa laitetilaa, joka sisältää muun muassa palvelimia, tiedon siirron eli tietoliikenteen koneita, datan tallentamiseen ja varmentamiseen tarkoitettuja laitteita. Kyseinen tila sekä sen sisältämät laitteet toimivat sähköllä ja vaativat toimiakseen usealla tavalla ympäristöltään tasaiset olosuhteet. [1, s. 4.] Tasaisilla olosuhteilla voidaan viitata alueen poliittiseen ja geologiseen rauhallisuuteen muiden ympäristömuuttujien lisäksi, mutta myös jatkuvaan resurssien saamiseen. Suurin osa kulutuksesta johtuukin sähkölaitteiden määrästä, ja kestävän kehityksen yhtiö Motiva kertoo konesalin investointikustannuksista 60 % menevän sähkötekniikkaa kohden samalla, kun 75 % käyttökustannuksista menee sähkönkulutukseen [1, s. 7].

2.1 Konesalit ja energiatehokkuus

Energiatehokkuudella viitataan prosessiin, jonka avulla pyritään vähentämään palveluiden ja tuotteiden tekemiseen tarvittua energiamäärää tai pyritään tekemään ja tukemaan ratkaisuja, jotka tuottavat mahdollisimman pienen määrän päästöjä [2]. Energiatehokkuustoimet ovat taloudellisia ratkaisuja kasvihuonepäästöjen vähentämiseksi muiden tärkeiden syiden lisäksi. Muihin syihin kuuluvat esimerkiksi resurssikäytön maksimoiminen, energiakustannusten minimointi, energian saatavuuden varmistaminen ja tuontitarpeen alentaminen sekä muut ympäristönsuojeluun liittyvät seikat. [3.] Vaikka samoja hyötyjä voidaankin saavuttaa myös käyttämällä enemmän uusiutuvia energianlähteitä, fossiilisten polttoaineiden vähentäminen energiatehokkuuden parantamisen kautta on usein halvempi ja nopeampi ratkaisu [2].

Energiatehokas konesali pyrkii kuluttamaan vain tarvitsemansa määrän energiaa ja täten tuottaa vähemmän hukkaan menevää energiaa. Konesalien raportoidaan kuluttavan noin 1–3 % maailman energiasta, ja kulutusmäärien voidaan olettaa nousevan vielä entisestään tietotekniikan kasvavien trendien, kuten esineiden internetin ja tekoälyn mukana [4]. Uudet konesalit ovat useammin energiatehokkaampia kuin vanhat, sillä ne hyödyntävät modernia teknologiaa ja niiden rakentamisessa on todennäköisemmin otettu huomioon ekotehokkaat ratkaisut. Vaikka vanhoja konesaleja ei voidakaan rakentaa alusta asti uudelleen, niiden käytänteitä ja kulutusratkaisuja

voidaan kuitenkin päivittää ekotehokkaammiksi esimerkiksi hyödyntämällä energiatehokkuuden mittaamista.

2.2 Energiatehokkuus tavoiteltavana ominaisuutena konesalille

Energiatehokkaat ratkaisut tuottavat energian säästämisen ohella useita muita oheishyötyjä, joista ilmeisin on hiilidioksidipäästöjen väheneminen ja hukkaan menevän energiamäärän laskeminen [5]. Yksi huomattavimmista oheishyödyistä yritykselle on taloudellisten ja tuotannollisten kustannusten aleneminen johtaen rahallisiin säästöihin. Tuotannollisiin etuihin kuuluvat laitteiden ja muiden järjestelmien huoltovälin ja käyttöiän piteneminen samalla, kun tehokkaampi energiankäyttö sallii tuotantokapasiteetin nostamisen [5].

Markkinoinnin suhteen energiatehokkaita ratkaisuja voidaan hyödyntää luomaan positiivinen kuva yrityksestä kuin myös houkuttelemaan asiakkaita, joille kyseiset ratkaisut ovat tärkeitä. Asiakkaiden tietoisuuden kasvaessa useampia konesaleja tuodaan esille sekä pidetään vastuullisena toiminnastaan. Täten ekotehokkaat konesaliyritykset saavat enemmän suosiota. Asianmukainen energiankäyttö antaa vastuullisen kuvan yrityksestä, mikä vaikuttaa sidosryhmien sekä asiakkaiden tyytyväisyyteen [5].

2.3 Energiatehokkuus ja konesalit maailmalla

Konesaleja on kaikkialla maailmassa tuottamassa yhtä paljon hiilidioksidipäästöjä kuin koko lentoliikenne, ja suurimmat näistä infrastruktuureista ovat kulutukseltaan verrattavissa jopa miljoonan hengen kaupunkiin. Tietotekniikan väitetään muuttuvan enemmän ja enemmän materiaallittomaksi, mutta konesalit eivät kuitenkaan kuluta vähemmän energiaa, eikä kuluttajille kerrota, sijaitseeko heidän käyttämiään palveluja tarjoava konesali keskeytymättömästi lämpimällä alueella tai toimiiko se kivihiehellä. [6.] Kuluttajat voivat saada tietoa esimerkiksi konesalin verkkosivuilta tai vuosiraporteista, mutta etsiminen voi käydä hankalaksi varsinkin, jos konesali ei noudata ekotehokkaita ratkaisuja ja tällöin luultavammin jättää kertomatta toimintansa tilanteen. Vain yksi Google-haku tuottaa noin 0,2 g hiilidioksidia ja tietotekniikan yritys Cisco on arvioinut, että vuonna 2021 jo 82 % internetliikenteestä saattaa koostua videoistosta, mikä kasvattaa käsiteltävän datan määrää [6].

Hiilidioksidipäästöiltään alhaisten energianlähteiden käyttäminen ja energiatehokkuuden nostaminen ovat kaksi tapaa vähentää jatkuvasti kasvavaa energiankulutusta. Uusiutuvan energian saatavuus on syy sille, että muun muassa Google on rakennuttanut konesalin Suomeen ja Facebook Tanskaan sekä Ruotsiin. [6.] Vuonna 2019 Google kertoi uusiutuvan energian muodostavan noin 40 % yrityksen kokonaiskulutuksesta [4]. Muun muassa Microsoft on pyrkinyt kompensoimaan hiilidioksidipäästöjään sijoittamalla varojaan metsiin. Energiatehokkuuden parantaminen on johtanut alentuviin mittausarvoihin ja kasvavan kapasiteetin tuottaman energian kompensoimiseen. Vuonna 2006 konesalit käyttivät keskimääräisesti kaksi ja puoli kertaa enemmän energiaa kokonaisuudessaan tietotekniikan laitteisiin verrattuna, kun vuonna 2016 keskimääräinen arvo oli laskenut alle kahteen. [6.]

2.3.1 Konesalit Euroopassa

Eurooppa on suosittu kohde konesaleille muun muassa sen keskeisen sijainnin, tietotekniikan laadun ja pidempään jatkuneen teknologisen kehittyneisyyden vuoksi. Satoja konesaleja sijaitsee Keski-Euroopan maissa, kuten Saksassa, Alankomaissa ja Ranskassa sekä hieman ulompana Isossa-Britanniassa [7]. Kaikissa Euroopan maissa on konesaleja, mutta ei tasaväkisesti jaoteltuna, mikä voi johtua esimerkiksi syrjäisemmästä sijainnista, taloudellisesta tilanteesta, vaikutusarvosta tai epäsuotuisammasta asemasta kilpaileviin maihin verrattuna.

Euroopassa on voimassa energiatehokkuusdirektiivi, jonka avulla asetetaan tavoitteita ja velvoitteita julkiselle sektorille energiatehokkuuteen liittyen [8]. Brittiläinen yritys Information Handling Services Markit suoritti tutkimuksen Euroopan konesalien tämänhetkisistä ja tulevaisuuden tilanteista energiatehokkuuden suhteen, minkä mukaan laitetoimittajat ja ylläpitäjät kertovat säästävänsä 21–30 % energiaa parantamalla konesalissa käytettäviä ratkaisuja. Kyselyyn vastanneiden tahojen kesken konesalin jäähdytys todettiin suosituimmaksi kehityksen kohteeksi ja teknologian käytön tehostaminen toiseksi hyväksi ratkaisuksi. Analyysin mukaan taloudelliset säästöt ovat johtava syy energiatehokkaiden ratkaisujen toteuttamiselle, kun toisaalta huomattavimpien esteiden kerrotaan olevan kykenemättömyys ja varattomuus vanhojen laitteiden uusimiselle. [9.]

2.3.2 Konesalit Suomessa

Suomen geologisesti ja poliittisesti suotuisat olosuhteet tarjoavat konesaleille hyvän sijoituskohteen [10, s. 2]. Viileä ilmasto vähentää konesalin jäähdyttämisen tarvetta, ja konesali pystyy käyttämään jäähdytysratkaisuja, jotka hyödyntävät vesistöjen tai ilman kylmyyttä. Suomi on otollinen alue vesistöjen paljouden suhteen, ja veden saaminen läheltä onkin taloudellisesti ja ekologisesti voitollista. Esimerkiksi Mäntsälässä sijaitseva tietotekniikan yrityksen Yandexin konesali on muotoiltu lentokoneen siiven mukaan, jotta se saa otettua mahdollisimman paljon kylmää ilmaa sisäänsä samalla, kun rakennuksen sisällä tuotettu ylimääräinen lämpö otetaan talteen sen mahdollistavan teknologian avulla. Tämä ylimääräinen lämpö siirretään osaksi Mäntsälän lämpöverkkoa. [11.] Kajaanissa rakenteilla oleva supertietokone Large Unified Modern Infrastructure tulee tuottamaan viidesosan kaupungin kaukolämmöstä; supertietokoneelle omatusta datakeskuksesta vapautuvaa lämpöä siirretään Kajaanin kaukolämpöverkkoon lämmittämään koteja ja toimistoja [12; 13].

Suomella on koko maan kattava kantaverkko, joka toimii sähkönsiirron runkoverkkona ja mahdollistaa kuluttajille ja tuottajille toimivat sähkömarkkinat maan sisällä sekä rajojen yli. Suomen sähköverkko toimii osana yhdistettyä voimajärjestelmää Itä-Tanskan, Norjan ja Ruotsin kanssa. Näiden lisäksi Suomen sähköverkollisella järjestelmällä on yhteydet Venäjälle ja Viroon. [14, s. 18.] Hyvät yhteydet lähimaiden kanssa ovat yksi esimerkki Suomen poliittisesta rauhallisuudesta. Syrjäisen sijaintinsa takia Suomi ei kuitenkaan saa yhtä paljon suosiota konesaliyrityksiltä kuin esimerkiksi Keski-Euroopan maat. Kuitenkin Suomeen on jo rantautunut isoja tietotekniikan alan yrityksiä, kuten Google ja Yandex, jotka mahdollistavat suosion kasvamisen.

2.3.3 Konesalit Amerikassa

Pohjois-Amerikassa sijaitsee huomattava määrä konesaleja, sillä samalla tavoin kuin monissa Euroopan maissa alueen teknologinen osaaminen ja varallisuus ovat ehtineet kehittyä kauemmin sekä nopeammin. Kanada tarjoaa kattavat olosuhteet konesaleille sen rauhallisen poliittisen tilanteen ja viileän ilmaston takia. Yhdysvalloissa Pohjois-Virginiassa on maailman suurin konesalien ryhmittymä, mutta ympäristöjärjestö Greenpeace kertoo, että Virginia saa alle 3 % sähköstään uusiutuvista energianlähteistä ja noin 33 % sähköstään ydinvoimasta [6]. Yhdysvaltojen suu-

rimalla energiankuluttajalla liittohallituksella on oma energianhallintaohjelma, joka tarjoaa virastoille ohjeita sekä avustusta energian ja veden vähentämiseen liittyvien lakien ja vaatimusten noudattamisessa [15].

Pohjois-Amerikan suosio ei kuitenkaan tarkoita, etteikö Latinalaisessa Amerikassa olisi teknologisesti kehittyneitä maita, ja muun muassa Brasiliassa sijaitsee yli sata konesalia [16]. Alueen huonoon suosioon energiatehokkuuden kannalta luultavimmin vaikuttavat jatkuva lämmin ilmasto ja taloudellinen tilanne. Useissa maissa varat ekotehokkaiden ratkaisujen edistämiseksi tulevat valtiolta, mikä voi huomattavasti rajoittaa kehitystä, mikäli maalle ei ole asetettu kattavaa energiatehokkuussuunnitelmaa. Varoja voi myös saada ulkopuolisten organisaatioiden kautta, jotka tarjoavat tukea lainojen tai yhteistyön muodossa. [17, s. 7.] Latinalaisen Amerikan maiden lailliset säädökset energiatehokkuuden suhteen vaihtelevat huomattavasti; monissa maissa ovat jo pidemmän aikaa voimassa olleet energiatehokkuuslait, kun toisissa maissa ne ovat kohtuullisen uusi käsite [18, s. 3–4]. Vaikka Latinalaisessa Amerikassa ollaan jäljessä verrattuna Pohjois-Amerikkaan, askeleita ollaan ottamassa oikeaan suuntaan.

2.3.4 Konesalit Aasiassa

Kiina on yksi maailman isoimpia teknologian keskuksia. Konesalien keskittymät ovat maan itäpuolella suurissa kaupungeissa tai niiden läheisyydessä, ja niiden sähkönsaanti koostuu suhteellisen vähän uusiutuvasta energiasta. Vaikka konesaliyritykset ovat toteuttaneet energiatehokkaita uudistuksia, niin tutkijoiden mukaan vuonna 2018 noin 73 % Kiinan konesalien käyttämästä sähköstä tuotettiin kivihieillä. [19, s. 5–6.] Konesaliyritykset Kiinassa voivat hankkia uusiutuvaa energiaa muun muassa rakentamalla tai sijoittamalla uusiutuvan energian hankkeisiin ja ostamalla sähköä tuottajilta, jotka käyttävät uusiutuvaa energiaa sen tuottamiseen [19, s. 7].

Konesalimarkkinat kehittyvät jatkuvasti Tyynenmeren ja Aasian alueella, missä aktiviteetin odotetaan keskittyvän Singaporeen, sillä alue tunnetaan lähimaiden, kuten Indonesian ja Malesian, keskuudessa finanssikeskuksena [20]. Aasian huonona puolena, kuten useissa muissakin sijainneissa, on alueen kapasiteettirajojen umpeutuminen; tietotekniikan prosessien siirtäminen toisille alueille tapahtuu hitaasti eikä ole yhtä kehittyneitä kuin muilla alueilla [21]. Kuitenkin useiden valtioiden kasvava tuki ja palvelujen kysyntä houkuttavat toiminnan edistämiseen, mikä on myös hyvä mahdollisuus uusien energiatehokkaiden ratkaisujen tekemiselle.

2.3.5 Konesalit muualla

Kaikki paikat eivät ole yhtä suosittuja konesalien sijoituskohteita, ja muun muassa luonnonkatastrofeille alttiit alueet tai alueet, joilla ei ole valmiiksi rakennettua laajaa tietotekniikan verkkoa, eivät houkuttele konesaliyrityksiä puoleensa. Esimerkiksi Afrikka, joka on päässyt myöhemmin alan kehitykseen kiinni, ei ole vielä asettunut vakaaksi sijainniksi. Myös valittavan alueen sisäinen poliittinen ja taloudellinen tilanne vaikuttavat suuresti, sillä konesalit vaativat paljon resursseja eikä näiden resurssien vaarantaminen ole järkevä päätös sijoittajille. Resursseilla tarkoitetaan fyysisten materiaalien lisäksi myös henkilöstöä. Vaikka alan osaajia voidaankin tuoda muista maista rakentamaan ja ylläpitämään konesalia, usein alueella jo oleva tietotaito vaikuttaa konesalin sijoittamiseen, sillä työvoimaa halutaan saada helpommin läheltä kuin kuljettaa kaukaa.

3 Energiatehokkaan konesalin rakentaminen

Konesalin energiatehokkuus koostuu monista muuttujista, joita pitää alkaa käsitellä jo suunnitteluvaiheessa ja joiden käsitteleminen jatkuu niin kauan kuin konesalista on mitään jäljellä, on se aktiivinen tai ei. Huomioon pitää ottaa ulkopuoliset muuttujat, kuten ilmasto, samoin kuin sisäiset muuttujat, kuten laitteisto ja henkilöstö. Ekotehokkaiden ratkaisujen noudattaminen heti alusta alkaen vähentää suurten muutosten tarvetta tulevaisuudessa; uudet ratkaisut luultavimmin saavat pohjansa jo käytössä olevasta teknologiasta, joten näitä ratkaisuja noudattavat konesalit pysyvät sopeutumaan nopeammin kuin muut alan toimijat.

3.1 Sijainti

Sijainnin valitsemista rajoittavat tekniset ja toiminnalliset vaatimukset, jotka vaikuttavat konesalin toimintaan. Kun halutaan rakentaa mahdollisimman energiatehokas konesali, kaikkien sijaintiin liittyvien tekijöiden optimoiminen tulee olla ensisijainen prioriteetti. Yritykset painottavat alueen ominaisuuksia eri tavoin ja asettavat omat tarpeensa kohteen toiminnallisuudelle. Keskeisiä kriittisiä tekijöitä ovat muun muassa viestintäinfrastruktuuri, sähkönsaanti ja alueen turvallisuus.

Luonnonkatastrofeille alttiita alueita ei suositella konesalien sijoituskohteiksi, sillä jatkuva altistuminen tuhoille voi johtaa tietojen sekä tekniikan, mutta myös pahimmassa tapauksessa ihmishengen menetykseen [22, s. 14614]. Ympäröivän luonnon osalta huomioitavana on myös alueen yleinen sää; konesalin sijoittaminen kuumalle alueelle ei ole suositeltua, sillä laitteiden jäähtymykseen käytetty energiamäärä nousee huomattavasti [22, s. 14613]. Muita harvinaisempia, mutta kuitenkin huomioitavia ongelmia ovat mahdolliset sotatilanteet ja ilkivalta [22, s. 14615].

Konesalin etäisyys loppukäyttäjään verrattuna voi myös muodostua ongelmaksi; mikäli alueella ei ole koulutusinstituutteja, yrityskeskuksia tai muita samankaltaisia paljon dataa käyttäviä keskittymiä, on harkittava, kuinka hyödyllistä konesalin rakentaminen kyseiselle alueelle lopulta tulee olemaan [22, s. 14614]. Tämä koskee myös jatkuvaa energiansaantia, mitä ilman konesali ei pysty toimimaan; jos alueella ei ole useita luotettavia mieluiten energiatehokkaita energianlähteitä, kuten tuuli- tai vesivoimaa, konesali joutuu luottamaan yhden energianlähteen toimintaan.

3.2 Laitetilat

Tilojen suunnitteluun kannattaa käyttää huomattava määrä aikaa ja resursseja, sillä tässä vaiheessa määritellään jo jäähdytysratkaisut, sähkönsaanti, laitteiden sijoittaminen ja muita tärkeitä myöhemmin vaikeasti korjattavia asioita. Konesalin tehokkuus koostuu suunnittelusta, hallinnasta ja toiminnasta, jotka voidaan saavuttaa eri keinoin. Konesali, joka voi kasvattaa kapasiteettiaan nostamatta toimintakuluja, on yhtä tehokas kuin konesali, joka pystyy leikkaamaan kustannuksiaan. [23.] Nämä ovat asioita, joita suunnitteluvaiheessa pitää ottaa jo huomioon, jotta konesalin suorituskyky ja energiatehokkuus pystytään pitämään aina korkeimmillaan.

Energiatehokas konesali huomioi myös vähemmän energiaa vievät järjestelmät, jotka usein pääsevät toimimaan taustalla ilman isompaa huomiota, mutta silti tuhlaavat enemmän energiaa kuin olisi tarpeen. Pieni määrä konesalien energiasta menee valaistukseen, joten laitetilat tulee suunnitella niin, että vain tärkeät operoitavat alueet saavat valoa. Myös energiaa säästävien valaistusratkaisujen, kuten energiansäästölamppujen ja liiketunnistimien käyttö on suositeltavaa. [1, s. 13.]

3.3 Sähkönsyöttö

Konesalin sähkönsyöttöjärjestelmät voivat vaihdella laajasti, mutta usein ne sisältävät samoja elementtejä, joten tämän työn yhteydessä voidaan keskittyä yleisimpiin ratkaisuihin. Kun puhutaan sähköverkosta tai sen rakenteesta, konesali jakautuu tasoihin eri toimintojen mukaisesti alkaen sähkönsyötöstä ja tuotannosta aina yksittäisten palvelimien sisäisiin komponentteihin asti [24, s. 39]. Mitä syvemmälle konesalissa mennään, sitä tarkemmin valvottua virransaannin täytyy olla herkkien tietoteknisten laitteiden takia. Hyvin suunniteltu sähkönsyöttöjärjestelmä sisältää energiatehokkuuden mittareita reaaliaikaisen kulutuksen katselmointia varten [1, s. 12].

Konesalin energianlähteenä toimii rakennuksen yhteydessä oleva pääkeskus tai ongelmatilanteissa jatkuvan sähkönsaannin takaava varavoimakeskus. Ulkopuolinen virtalähde voi olla suoraan vastuussa konesalin sisäisistä toiminnoista, mutta usein välissä on Uninterrupted Power Supply (UPS) -järjestelmä, joka virransaannin katketessa kytkeytyy päälle ja valmiiksi ladatuilla akuilla ylläpitää muiden laitteiden toimintaa, kunnes virtaa aletaan saamaan varavoimakeskuksetta. Toimivat varavirtalähteet kytkeytyvät päälle välittömästi sähkökatkojen aikana, jotta konesalin herkemmat laitteet eivät vaurioidu tai mene rikki [1, s. 12]. UPS-järjestelmä voi olla aina

päällä ja osana konosalin toimintaa, tai se voi toimia passiivisesti, jolloin se on valmiustilassa, mutta sähkövirtaa ei johdeta sen kautta [24, s. 41].

Konesalissa laitteille usein kuljetetaan liian paljon sähköä, jolloin järjestelmän hyötysuhde laskee, sillä vain osa syötetystä virrasta hyödynnetään sen varsinaista tarkoitusta varten. Paremman hyötysuhteen virtalähteet parantavat virransyötön tehokkuutta ja vähentävät jäähdyttämisen tarvetta, koska virtalähteet tuottavat vähemmän hukkaan menevää lämpöenergiaa. Sähkönsyötön energiatehokkuutta voidaan muun muassa parantaa vaihtamalla vaihtosähköstä tasasähköön, sillä tasasähköllä toimivaan järjestelmään perustuvat komponentit ovat hyötysuhteeltaan kannattavampia, mutta laitteiden kuuluu myös tukea tätä ratkaisua. [1, s. 12.]

3.4 Laitteet

Laitteita ostettaessa otetaan huomioon tarvittujen laitteiden määrä, käyttöikä, energiankulutus, tehokkuus muiden muuttujien lisäksi, mutta energiatehokas konesali ottaa huomioon myös laitteen käytön ulkopuoliset kustannukset. Ulkopuolisiin kustannuksiin mukaan lukeutuvat laitteen tuotanto ja hävitys, joista kertyy ekologisia kuin myös sosiaalisia seurauksia [25, s. 10]. Tietotekniikan laitteiden ja komponenttien valmistamiseen käytetään paljon kemikaaleja ja mineraaleja, joiden louhiminen aiheuttaa ympäristövahinkoja, kuten vesien ja maaperän saastumista, ja tuotannossa käytetään myös myrkyllisiä aineita, jotka ovat uhka työntekijöiden ja ympäristön lisäksi myös lähialueen asukkaille. Laitteiden uusiminen aiheuttaa lisää ongelmia, sillä sähkö- ja elektronikaaromu usein kuljetetaan kehitysmaitiin, joissa ne puretaan käsityönä takaisin osiksi aiheuttaen jälleen haittaa ihmisille ja ympäristölle. [25, s. 11.] Tämä nostattaakin kysymyksiä tietotekniikan alan laitekäytännöistä ja jatkuvan uusimisen hyödyistä.

Laitteita suositellaan päivittämään useammin kuin kolmen vuoden välein, sillä näin varmistetaan organisaation mahdollisuus ottaa käyttöön uudempaa teknologiaa nopeammin [26, s. 10]. Teknologian nopea kehitys asettaa vanhemmat laitteet epäedulliseen asemaan uusien, nopeampien ja tehokkaampien laitteiden rinnalla [26, s. 2]. Uudet laitteet vaikuttavat suotuisasti liiketoimintaan, sillä ne palvelevat asiakkaita nopeammin [26, s. 10]. Täten suhteellisen usein tehty uudistaminen tuottaa yritykselle hyötyjä, mutta se samalla edistää tuotannosta ja poistamisesta aiheutuvia haittoja sekä vähentää energiatehokkuutta, sillä laitteita olisi voitu käyttää vielä pidemmän aikaa.

Uusien laitteiden otollisena osto hetkenä voitaisiin pitää tilannetta, jolloin vanhat laitteet osoittavat laskevansa konesalin suorituskykyä ja energiatehokkuutta. Mikäli vain laitteessa oleva komponentti on vanhentumassa, olisi se hyvä mahdollisuuksien mukaan uusien koko laitteen vaihtamista. Toimivan laitteen voi myydä tai lahjoittaa eteenpäin, ja toimimattomasta laitteesta olisi hyvä tarkistaa kaikki osat, sillä ne voivat olla vielä käytettävissä. Tavoitteena on välttää jätteiden kertymistä valitsemalla ympäristöystävällisempiä ratkaisuja, mutta loppujen lopuksi päätökset perustuvat yrityksen tavoitteisiin.

3.5 Jäähdytys

Jäähdytys on yksi konesalin energiaa kuluttavimmista komponenteista, ja sen optimoimisesta löytyy usein huomattava paikka energiankäytön tehostamiselle. Niin kauan kuin laitteet ovat päällä, ne tuottavat lämpöenergiaa, jonka kompensoimiseksi tarvitaan jäähdytystä estämään laitteiden kuumeneminen. Liian lämpimät laitteet hidastuvat, menettävät käyttöikänsä ja voivat rikkoutua. Tämä tarkoittaa, että jäähdytys on päätoimisesti käytössä ja kuluttaa jatkuvasti energiaa, minkä takia pienetkin muutokset kyseisessä järjestelmässä voivat muuntua isoiksi säästöiksi.

3.5.1 Jäähdytysratkaisut

Jäähdytysratkaisuja on monenlaisia, ja niitä voi muokata sekä yhdistellä konesalin omien tarpeiden mukaan. Täten tämän työn yhteydessä käsitellään yleisimpiä ratkaisuja. Sopivan jäähdytysratkaisun valitsemiseen vaikuttavat konesalin avainominaisuudet, kuten sijainti, laitteiden käyttökapasiteetti ja tilamäärä [27, s. 2]. Jäähdytysjärjestelmällä on kaksi päätarkoitusta: tarjota mahdollisimman paljon kylmää ilmaa ja jakaa se tietotekniikan laitteille niiden yksilöllisten tarpeiden mukaisesti. Kylmän ilman tarjoaminen tapahtuu konesalin sisällä usein samalla tavoin jäähdytysratkaisusta riippumatta, ja isommat erot tulevat esiin jakelun yhteydessä. [28, s. 2.] Ilmajäähdytyksen tilalla voidaan käyttää nestejäähdytystä, jolloin laitteita viilentävänä elementtinä toimii putkia pitkin kulkeutuva vesi tai jäähdytysneste. Tällöin toteutus on suunniteltava lähemmäksi laitteita. Jäähdytyksessä käytettävän elementin viilentäminen voi tapahtua ulkoilman avulla ilmaston sen salliessa tai käyttämällä koneistoa, joka tekee saman työn.

Huonekohtaisessa jäähdytyksessä jäähdytysjärjestelmä on liitetty osaksi huonetta, jolloin kaikki tilan sisältämät komponentit käsitellään yhtenä kokonaisuutena. Huonekohtainen jäähdytys voi koostua useammastakin ilmastointilaitteesta, mutta ilmaa puhalletaan vapaasti huoneeseen ilman minkäänlaisia rajoituksia, kuten peltejä, kanavia tai tuuletusaukkoja. Ilmavirtauksiin voidaan kiinnittää enemmän huomiota muokkaamalla huoneen asettelua rajoittamaan ilmavirran holtitonta kulkua ja ohjaamalla sitä paremmin laitteita kohden. Tämän jäähdytysjärjestelmän toimintaan vaikuttavat huoneen omat rajoitukset, kuten huoneen muoto, katon korkeus ja laitteiden sijoittelu, mutta loppujen lopuksi tuloksena on suorituskyvyltään ja tehokkuudeltaan ennustamaton ratkaisu. [28, s. 3.]

Rivikohtaisessa ratkaisussa jäähdytysjärjestelmä liitetään osaksi laitekaapeista eli räkeistä muodostettuja rivejä [28, s. 4]. Räkeistä muodostuvat käytävät jaotellaan kuuma- ja kylmäkäytäviksi riippuen ilmavirran suuntauksesta. Kylmäkäytäviä ovat ne, joilla jäähdytys toimii, ja kuumakäytäviä ovat ne, joita päin laitteista pusketaan lämpöenergiaa. Rivikohtainen jäähdytys on energiatehokkaampi ratkaisu kuin huonekohtainen jäähdytys, sillä koko tilaa ei pyritä viilentämään. Verrattuna huonekohtaiseen jäähdytykseen rivikohtainen jäähdytys takaa ilmavirran lyhyemmän ja selkeämmän suuntaamisen sekä näin varmistaa jäähdytystehon kohdistamisen tietyille riveille tarpeen mukaisesti [28, s. 4]. Tämä ratkaisu on myös suhteellisen immuuni huoneen rajoituksille ja sen suorituskyky on ennakoitavissa ennalta määritetyn geometrian vuoksi [28, s. 5].

Räkkikohtaisessa jäähdytyksessä jäähdytysyksiköt liitetään suoraan laitteita kannattelevaan runkoon tai sen sisälle kiinni. Kyseisen jäähdytyksen avulla ilmavirta on vielä lähempänä laitteita, joten huoneen rakenne ei vaikuta ollenkaan jäähdytyksen laatuun. Usein kuitenkin tarkoituksena on muodostaa kylmä- ja kuumakäytävät paremman ilmavirran saamiseksi samalla tavoin kuin rivikohtaisessa ratkaisussa. Jäähdytysjärjestelmän sijoittaminen kiinni räkkiin mahdollistaa kylmän ilmavirran kohdentamisen suoraan sitä tarvitseville laitteille, kun rivikohtainen jäähdytys nimensä mukaan toimii vain rivitasolla ja huonekohtainen jäähdytys vain huonetasolla. [28, s. 5.] Räkkikohtainen jäähdytys takaa ennustettavissa olevan suorituskyvyn mahdollistaen jäähdytyksen tehokkuuden suunnittelemisen ja määrittelyn paremman tuloksen saavuttamiseksi [28, s. 6].

3.5.2 Jäähdytysjärjestelmän hallinta

Konesalin jäähdytysjärjestelmän kontrollointia vaikeuttavat jatkuvasti muuttuvat olosuhteet, kuten laitteiden vaihtaminen ja ulkoilman lämpötila, joihin järjestelmän pitää sopeutua. Kyseinen

järjestelmä ei välttämättä pysty toimimaan yhtenä yhtäläisenä yksikkönä, jos se on koottu useamman valmistajan laitteista, jolloin komponentit voivat toimia toisiaan vastaan kuluttaen tarpeettomasti energiaa. Mikäli järjestelmän operointi tapahtuu manuaalisesti, on huomioitava myös ihmisten tekemät mahdollisesti huonolaatuiset ratkaisut. [27, s. 4.]

Tehokas jäähdytysjärjestelmän ohjaus lukee jäähdytyksen toimintaa kokonaisuutena sen energiankulutuksen optimoimiseksi ja kompensoi aikaisemmin mainittuja ongelmia. Järjestelmän pitää pystyä automaattisesti muokkaamaan toimintaansa aiheuttamatta käyttökatkoksia. [27, s. 5.] Hyvän järjestelmän tarkoituksena on taata joustavat käyttömahdollisuudet ja avustaa henkilökuntaa esimerkiksi varoittamalla epänormaalista toiminnasta ja ongelmakohtien sijainnista [27, s. 6].

3.5.3 Optimaalinen jäähdyttäminen

Jotta jäähdytyksestä saataisiin mahdollisimman paljon hyötyä, kylmä ilmavirta pitää huolellisesti kohdentaa laitteille samalla estäen sen kulkeutuminen muualle tai sekoittuminen lämpimän ilman kanssa. Tavoitteena on estää kuumen poistoilman pääsy laitteen ilmanottoaukkoihin [29, s. 6]. Tietotekniikan laitteilla täytetyt kaapit luovat parhaimmassa tapauksessa tiiviin raottoman seinämän, joka estää ilmavirtojen sekoittumisen. Hyvin toteutettu jäähdytysjärjestelmä automaattisesti kohdennetaan enemmän kuumenevia komponentteja kohden, jotta kylmää ilmaa ei ohjata jo suhteellisen viileille alueille.

Jäähdytystä tehdään usein myös liikaa, koska alhaisemman lämpötilan luullaan pidentävän laitteiden käyttöikä, kun todellisuudessa käyttöikä tulee päätökseensä noin samaan aikaan, vaikka lämpötilaa nostettaisiin [10, s. 6]. Ilma pyritään usein pitämään 21–24 °C:ssa ja jäähdytysvesi 10 °C:ssa, kun ilman lämpötilan voisi korottaa 27 °C:seen ja jäähdytysveden lämpötilan 20 °C:seen [10, s. 6–7]. Jäähdytystehokkuutta parantaa myös kaiken ylimääräisen materian poistaminen; huolimattomasti sijoitetut piuhat, tarpeettomat muovipalat ja logot laitteiden sivussa voivat estää ilmavirran mahdollisimman esteettömän kulkemisen.

3.5.4 Hukkalämmön hyötykäyttö

Jäähdytyksen voimakkuudesta huolimatta tietotekniikan laitteet tuottavat paljon lämpöenergiaa eli hukkalämpöä, joka usein johdetaan konesalista ulos, kun sitä voitaisiin hyödyntää esimerkiksi

konesalin omien tilojen, toimistojen ja käytävien lämmittämiseen. Mikäli konesali on osana kaukolämpöverkkoa, energiayhtiö voi ostaa tuotetun hukkalämmön omaan käyttöönsä. [10, s. 12.] Hukkalämmön käyttäminen on kuitenkin kannattavimmillaan ja kustannustehokkaimmillaan, kun käyttökohde on lähellä, sillä kauemmaksi siirrettynä lämmöstä jää vähemmän hyödynnettäväksi [30].

Hukkalämmön hyötykäytön mahdollisuudet vaihtelevat muun muassa konesalin sijainnin ja jäähdytysratkaisun mukaan [10, s. 12]. Tämän takia mahdolliset ratkaisut pitäisi ottaa huomioon jo konesalia suunniteltaessa; esimerkiksi uuden konesalin liittäminen jo olemassa olevaan lämpöverkkoon voi osoittautua haasteelliseksi. Onkin tärkeää käydä läpi eri toteutustapojen kannattavuustaso, sillä jotkin ratkaisut voivat osoittautua investointien, käytön, kunnossapidon ja huollon jälkeen nollaavansa mahdolliset hyödyt [30].

3.6 Muita rakentamiseen vaikuttavia muuttujia

Muihin muuttujiin kuuluvat muun muassa työntekijät, joiden käyttäytyminen voi huomattavasti vaikuttaa energiankulutukseen. Oikeaoppinen kouluttaminen on välttämätöntä, mikäli konesalin kulutus halutaan pitää mahdollisimman alhaisena ja työntekijöiden halutaan työskentelevän parhaimmaksi tavaksi todettujen käytänteiden mukaisesti. Tähän voivat kuulua esimerkiksi valojen pois päältä laittaminen aina tilasta poistuttaessa tai liikkumisen rajoittaminen konesalin tietyillä alueilla inhimillisten virheiden ja erehdysten välttämiseksi. Yksikin raolleen jätetty ovi tai paikoiltaan liikutettu laite voi aiheuttaa laajemman skaalan energiakustannuksia.

Konesalissa pitää myös huolehtia ilmankosteudesta, sillä liian kostea tai kuiva ilma vaikuttavat suoraan laitteiden toimivuuteen. Yksi isoimmista riskeistä on kuivasta ilmasta johtuva staattisen sähkön varaus, joka voi johtaa sähköpurkaukseen ja vahingoittaa lähellä olevia tietotekniikan laitteita. Kuitenkaan ilmaa ei voi päästää liian kosteaksi laitteiden metalliosien mahdollisen korroosion ja vesivahinkojen takia. [31, s. 3.] Yksi parhaimmista tavoista hallita ilmankosteutta on löytää muutosta aiheuttavat tekijät ja minimoida niiden ympäristövaikutukset [31, s. 6]. Energiatehokkuuden kannalta on myös tärkeä varmistaa, että ilmankosteutta ei pyritä samaan aikaan nostamaan ja alentamaan tilassa, koska järjestelmät kuluttaisivat turhaan energiaa.

4 Energiatehokkuuden mittaaminen

Yritys, joka tavoittelee tehokasta energiankäyttöä, on tietoinen energian jakautumisesta eri sektoreille, kuten myös energiankulutukseen vaikuttavista tekijöistä. Useat yritykset seuraavat energiankulutusta vain kuukausitasolla, mikä johtaa vääristyneisiin tuloksiin, sillä hetkellisiin poikkeamiin on vaikea puuttua, eivätkä ne tule esille raporteissa. [32, s. 2.] Yritykselle olisi optimaalista mitata energiankulutusta tasaisin väliajoin ja kohtuullisen usein, jotta saataisiin jatkuvasti tuloksia kulutuksen analysointia varten. Muun muassa vanhoissa konesaleissa voi olla vielä käytössä täysin manuaalinen mittausjärjestelmä, jolloin luotetaan työntekijän aktiivisuuteen ja tarkkuuteen mittausten suhteen. Tilojen yksityiskohtainen katselmoiminen auttaa arvioimaan energiatehokkuuden tason sekä paljastaa mahdolliset prosessit, jotka eivät ole asetettujen vaatimusten mukaisia [33]. Tarkimmat mittaukset olisi paras sijoittaa energiankulutukseltaan suurimpien komponenttien, kuten vettä tai sähköä kuluttavien laitteiden keskuuteen [32, s. 2]. Veden- ja sähkökulutuksen mittaamista käydään syvällisemmin läpi luvuissa 4.2.1 ja 4.2.2.

4.1 Mittaus- ja seurantajärjestelmät

Mittaus- ja seurantajärjestelmien tarkoituksena on todentaa prosessien aikana tapahtuvien muutosten vaikutusta energiatehokkuuteen [32, s. 8]. Ennen järjestelmän asentamista on tehtävä selvitystyötä eri ratkaisujen soveltuvuudesta konesalille, miten ja mihin kohtaan mittauslaitteet kuuluisi asentaa sekä mitä reunaehtoja konesalia operoiva yhtiö on asettanut mittauksille [32, s. 3]. Järjestelmän kokoaminen vaatii muun muassa asennustyötä, kaapelointia, sähkönsyötön muunnoksia ja näiden lisäksi myös raportointijärjestelmän, jonka avulla tietoa käsitellään [32, s. 7]. Nykyisin useat alalla toimivat yritykset tarjoavat omia ratkaisujaan, mikä tarkoittaa, että laitteiden mukana voi tulla jo valmiiksi asennettu sovellus, jonka kautta tuloksia voi katsella ja seurata. Toiset laitteet eivät tarjoa ratkaisua mukanaan, jolloin tietoa pitää siirtää katseltavaksi muualle. Eri valmistajien järjestelmien yhdistäminen on mahdollista, mutta voi joskus toteutuksen kannalta osoittautua työlääksi ja kalliiksi [32, s. 8].

Mittaukset jaetaan vähintään kahtia koko rakennuksen ja tietotekniikan laitteiden välillä, ellei erottelua voi viedä vielä pidemmälle, jolloin tilastot luodaan laitekohtaisesti. Yksinkertaisimmillaan energiatehokkuuden mittaaminen sisältää kenttämittareita, joita seurataan manuaalisesti [32, s. 4]. Karkeampaa menettelyä käytetään useammin suunnitteluvaiheessa tai optimoidessa,

sillä mukaan usein luetaan myös passiiviset komponentit eikä keskitytä vain aktiivisiin osiin. Saatut tulokset voivat vähän erota tarkemmista arvoista, mutta ovat enemmän kuin tarpeeksi perustason ymmärryksen luomiseksi. [34, s. 2.]

Kehittyneempi järjestelmä yhdistää paikalliset mittaukset, reaaliaikaisen mittaustiedon seurannan ja mittaustietojen raportoimisen saadakseen mahdollisimman paljon käytettävää materiaalia energiatehokkuuden tehostamiseksi [32, s. 4]. Yksityiskohtaisessa mittaamisessa otetaan huomioon jokainen kohta, missä energiaa voidaan hukata tai ohjataan muille kuin tietotekniikan laitteille [35, s. 40]. Ihanteellisesti mittaukseen otettaisiin mukaan vain ne laitteet, jotka luokitellaan aktiivisiksi kuluttajiksi konesalissa [35, s. 42]. Jotta uuden järjestelmän käyttöönotto tapahtuu hallitusti koko organisaatiossa, pitää henkilökunta kouluttaa huolellisesti [32, s. 9].

4.2 Mittaamisessa käytettäviä laskukaavoja

Suosituin laskukaava konesalin energiatehokkuuden mittaamiselle on Power Usage Effectiveness (PUE), joka pyrkii kertomaan, kuinka paljon energiasta on mennyt tietotekniikan prosesseille laskemalla kokonaisenergiankulutuksen ja tietotekniikan laitteiden energiankulutuksen jaotuksen, jonka mallinnus on esitetty kaavassa 1 [36]. Laitteet, joita ei luokitella tietotekniikaksi, kuten valaistus ja jäähdytys, lasketaan osaksi kokonaisenergiankulutusta. Esimerkiksi mikäli konesali kokonaisuudessaan kuluttaa 100,000 kilowattia sähköenergiaa ja sen sisältämät tietotekniikan laitteet kuluttavat 80,000 kilowattia sähköenergiaa, laskemalla lukujen jaotuksen PUE-laskukaavan avulla saadaan tulokseksi 1.25 [37]. Tämä tarkoittaa, että konesali on korkea tehokkuudeltaan, sillä se käyttää kokonaisuudessaan yksi ja yksineljäsosa kertaa enemmän energiaa kuin energiaa pelkästään tietotekniikkaa varten. Mitä lähempänä energiankulutukset ovat toisiaan, sitä paremman tuloksen konesali saa PUE-arvoasteikolla. Teoriassa konesali voi saada jopa lukua 1.0 alemman tuloksen, mikäli se käyttää kaiken saamansa energian sekä tuottaa ylimääräistä käyttöönotettavaa energiaa. Tietotekniikan palvelujen tarjoaja Center for Scientific Computing (CSC) on raportoinut Kajaanissa sijaitsevan konesalinsa saavuttaneen PUE-arvon 1.03, joka on melkein täydellinen tulos [38].

$$PUE = \frac{\text{Kokonaisenergiankulutus}}{\text{Tietotekniikan laitteiden energiankulutus}}$$

(1)

Toinen laskukaava, jonka prosentteina ilmaistu tulos kertoo, kuinka paljon konesalin energiasta on mennyt tietotekniikan laitteille, on Data Center infrastructure Efficiency (DCiE), mallinnus kaavassa 2. Aikaisemman esimerkin konesali mittaa noin 80 % DCiE-arvoasteikolla. [37.] Mitä korkeampi prosentti, sitä tehokkaampi konesali on kyseessä, kuten taulukon 1 avulla pystytään päättämään.

$$\text{DCiE} = \frac{\text{Tietotekniikan laitteiden energiankulutus}}{\text{Kokonaisenergiankulutus}} \times 100$$

(2)

PUE	DCiE	Level of Efficiency
3.0	33%	Very Inefficient
2.5	40%	Inefficient
2.0	50%	Average
1.5	67%	Efficient
1.2	83%	Very Efficient

Taulukko 1. Laskukaavojen PUE ja DCiE tulosten arvoasteikko konesalille [37].

Osa laskukaavoista on luotu, jotta energiatehokkuutta voitaisiin tutkailla laitetasolla [36]. Vähäisessä käytössä oleva laite ei toimi täydellä tehoilla, mikä voi näkyä tulosten vääristymänä. Tähän tarkoitukseen suunnitellut laskentamenetelmät, kuten Corporate Average Datacenter Efficiency ja Power to Performance Effectiveness määrittävät, kuinka tehokkaasti laitteita käytetään ottamalla huomioon niiden kulutuksen ja hyötysuhteen [36]. Näiden laskukaavojen tarkoituksena on kompensoida suositumpien kaavojen poisjättämää laitteiden suhteellista kuluttamista ja laitekohtaisia muutoksia.

Erilaisia menetelmiä energiatehokkuuden mittaamiseen on kehitetty, mutta kaikissa niissä on omat hyvät ja huonot puolensa. Väittelyä menetelmien käytöstä tulee niiden tulkitsemisen ja rajoittamattomuuden kanssa, eli mikään taho ei määritä, miten halutut lukemat kuuluisi saada aikaan. Tämä voi johtaa tahallisesti parempaan tulkintaan, mikä tekee konesalista tehokkaamman kuin mitä se muiden arvioimana olisi. Myös PUE on saanut aikaan vaihtelevia mielipiteitä muun

muassa sen takia, että pienemmän PUE-arvon kuin 1.0 saaminen on kyseenalaista. Jatkossa kuitenkin PUE tulee pysymään käytetyimpänä mittausmenetelmänä, ellei selkeästi parempaa menetelmää kehitetä. [36.]

4.2.1 Sähkönkulutuksen mittaaminen

Konesalin laitteet, ylläpito ja usein myös jäähdytyskomponentit vaativat sähköä toimiakseen. Sähköverkon energiankulutuksen mittaa vähintäänkin sähköyhtiö tai sähkönsiirtäjä, mutta myös konesalin olisi hyvä mitata käyttämänsä energiamäärää. Mittaamisella saadaan selville mahdollisia sähköverkossa tapahtuvia piikkejä sekä tipahduksia, jotka vaikuttavat herkkiin tietotekniikan laitteisiin. Mittaamisessa tulee erityisesti huomioida sähköverkon rakenne, jotta lukemat otetaan oleellisimmista kohdista, sillä tulokset voivat vaihdella laitteelta laitteelle. Muun muassa UPS-järjestelmä saattaa hukata osan energiasta siirron aikana.

Konesalille kuljetettava sähkö menee ensin tehoelektronikalle ja vasta tämän jälkeen herkemille tietotekniikan laitteille [24, s. 40]. Tehoelektronikka voi muun muassa huolehtia jännitemuutoksista tai vaihtosähkön muuntamisesta tasasähköksi. Sähkönmuunnon aikana hukattu energia lasketaan joskus tietotekniikan energiankulutukseen ja toisinaan kokonaisenergiankulutukseen riippuen yrityksen tavasta luokitella laitteet [24, s. 40]. Laitteiden luokittelu muuttaa esimerkiksi PUE-arvoa, joko konesalille parempaan tai huonompaan suuntaan.

Laitteet harvoin saavuttavat täyttä toimintakapasiteettiaan ja niille usein syötetään liikaa sähköä. Käyttämätön sähkö menee hukkaan ja laskee energiatehokkuutta. Tämän takia on tärkeä asettaa mittareita sekä laitekaapeille, että yksittäisille komponenteille. Toiminnan kasvattaminen mahdollisimman lähelle maksimikapasiteettiaan tai sen alentaminen lähelle nolaa auttavat myös energiatehokkuuden kanssa, sillä täten vältetään vajaata toimintaa täydellä energiamäärällä.

4.2.2 Vedenkulutuksen mittaaminen

Jäähdytys voi tuottaa jopa puolet konesalin energiankulutuksesta, minkä takia jäähdytyksen optimoiminen ja hukkalämmön hyötykäyttö ovat usein ensimmäisiä tehokkuuden parantamisen kohteita. Kaikki konesalit eivät kuitenkaan käytä vettä jäähdyttämiseen, vaan ilmaa tai jäähdytys-

nestettä, joten näiden konesalien vedenkulutus on alempana kuin konesalin, joka tukeutuu voimakkaasti veden käyttöön. Ilmankosteus on yksi pienimmistä kuluttajista konesalissa, mutta liiallinen tai liian vähäinen kosteus vaikuttaa laitteiden toimintaan, joten ilmankosteuden säätely tulee myös ottaa huomioon. Konesalit käyttävät täten paljon vettä, minkä takia on kehitetty laskukaava Water Usage Effectiveness (WUE), joka mittaa vedenkulutuksen jakamalla rakennuksessa käytetyn veden määrän tietotekniikan laitteiden kuluttamalla energiamäärällä [39, s. 11264].

WUE jakaantuu kahteen käytettävään mallinnukseen, jotka ovat esitettyinä kaavoissa 3 ja 4. WUE keskittyy käyttöpaikan eli tässä tapauksessa konesalin vedenkulutukseen, kun toinen laskukaava Water Usage Effectiveness source (WUEsource) ottaa huomioon myös ulkoisten energiantuottajien vedenkulutuksen [39, s. 11264]. Molemmilla on omat hyötynsä konesalille, joka voi käyttää kaavoja mittaamaan vedenkulutusta kapeammassa tai laajemmassa skaalassa. WUE-arvo heittelee paljon eri konesalien välillä riippuen käytössä olevista ratkaisuista.

$$WUE = \frac{\text{Käyttöpaikan vedenkulutus}}{\text{Tietotekniikan laitteiden energiankulutus}} \quad (3)$$

$$WUE_{\text{source}} = \frac{\text{Käyttöpaikan + ulkoisten energiantuottajien vedenkulutus}}{\text{Tietotekniikan laitteiden energiankulutus}} \quad (4)$$

4.3 Mittaaminen käytännössä

Käytännössä mittaamisen voi tehdä manuaalisesti keräämällä luvut yksitellen laitteista tai automatisoidulla järjestelmällä, joka toimii osana konesalin infrastruktuuria. Manuaalinen mittaaminen toimii erillisellä, usein kannettavalla laitteella, kun automatisoitu mittaaminen toimii jatkuvana, jolloin määritellyin väliajoin saadaan lukemat järjestelmään yhdistetylle sovellukselle. Mittaustulosten tulkitseminen vaihtelee yrityksen sisäisten käyttäjäryhmien välillä. Konesalitasolla tämä tarkoittaa tarkkaan kalibroituja, reaaliaikaisia ja luotettavia lukuja laitteiden kanssa työskenteleville työntekijöille, kun taas fyysisistä laitteista kauempana toimiva henkilöstö haluaa luultavammin vain huomautuksia poikkeustilanteista ja kulutuksesta. [32, s. 6.]

Energiatehokkuuden mittaaminen ei aina ole niin helppoa kuin voisi luulla. Yksittäisen elementin tehokkuuden mittaaminen on paljon yksinkertaisempaa kuin kokonaisen konesalin tehokkuuden mittaaminen. Tämä johtuu muun muassa laittilan olosuhteiden ja komponenttien vaihtumisesta sekä laitteilta vaaditun työkapasiteetin jatkuvasta muuttumisesta. Vaikka vaihtelut saattavat tuottaa heilahtelevia tuloksia, saatujen lukemien ylösottaminen kertoo esimerkiksi kausittaisista muutoksista, minkä mukaan konesalin pystyy mukauttamaan toimintaansa.

Pelkkä mittaaminen ei kuitenkaan vielä auta energiatehokkuuden parantamisessa, vaan mittaus-tuloksia kuuluu käyttää hyödyksi konesalia koskevissa ratkaisuissa. Tuloksia voidaan esimerkiksi käyttää apuna määrittämään investointien tai laitteiden vaihtoajan tärkeyttä. Säästetty energia voidaan valjastaa muuhun käyttöön. Mittaamisen pitkäaikainen dokumentointi sisältää tietoa konesalin toiminnasta useiden vuosien ajalta, ja sen avulla pystytään tutkimaan kehityskaarta sekä ongelmakohtia. Mittaaminen ja tulosten seuranta osana jokapäiväistä työtä takaa pääsyn kiinni energiatehokkuuden hallitsemiseen [32, s. 11].

5 ”Maailman ekotehokkain konesali”

Mikäli teorian perusteella pyrittäisiin rakentamaan mahdollisimman ekotehokas konesali, se sijaitsisi suurimman osan vuodesta kylmän ilmaston omaavalla alueella, kuten Pohjoismaissa tai Kanadassa, missä on myös laajalle kehittynyt tietotekniikan verkko. Alueella olisi myös toimiva lämpöverkko, jotta konesalista irtautuvaa lämpöenergiaa pystyttäisiin hyödyntämään. Sijainti ei asettaisi konesalia merkittävään vaaraan esimerkiksi luonnonkatastrofien takia eikä konesalin toiminta vahingoittaisi ympäristöä, sillä suunnitteluvaiheessa olisi otettu huomioon, miten konesalin sijoittaminen, rakentaminen ja yleistyvä liikenne vaikuttaisivat ympäröivään luontoon. Lähellä olisi useita hiilijalanjäljeltään alhaisia energianlähteitä, jotka käyttäisivät esimerkiksi vesi- tai ilmavoimaa, ja mikäli konesalin ratkaisut tukeutuisivat paljon veden käyttämiseen, veden saataavuus muun muassa joesta tai järvestä olisi otettu huomioon. Konesali rakennettaisiin tarpeeksi lähelle isoa kommuunia, jotta se hyödyntäisi lähialueen työvoimaa, mutta ei kuitenkaan niin lähelle, että konesali altistuisi ilkeille.

Konesalin sisälle pääsisi vain henkilöstölle jaetuilla tunnuksilla, tietyinä aikoina sekä valvonnan alaisena, ja mitä tärkeämmille alueille rakennuksessa mentäisiin, sitä vähemmän henkilöstöä sinne pääsisi datan turvaamisen takia. Laitteita käytettäisiin tehokkaasti mahdollisen tilan säästämiseksi ja huomioon otettaisiin heti alusta lähtien energiatehokkaat ratkaisut, jotta niitä ei tarvitsisi lisätä myöhemmin. Täten minimoitaisiin tulevaisuuden lisäkustannukset. Huomioon olisi otettu myös energiankulutukseltaan alhaisimmatkin muuttajat, kuten valaistus, joka suunniteltaisiin toimimaan vain alueella liikuttaessa.

Konesalin laitteiden ei tarvitsisi olla upouusia, mutta ne eivät saisi vaikuttaa energiatehokkuuteen negatiivisesti, ja järjestelmää suunniteltaessa huomioitaisiin yhteensopivuus laitteiden kesken, jotta välttyttäisiin laitteiden toimimiselta toisiaan vastaan. Laitteisto olisi valittu myös toimimaan tasasähköllä sen paremman hyötysuhteen takia. Sähkönsyöttö tapahtuisi konesalin yhteydessä olevan pääkeskuksen kautta, jota tukisivat ongelmatilanteissa varakeskus sekä ennen herkkiä tietotekniikan laitteita sijoitettu UPS-järjestelmä. Jotta laitteille ei vietäisi liikaa sähköä ja täten tuotettaisiin lisää hävikkiä, laitteiden toimintakapasiteettia pidettäisiin silmällä ja työkuorma pidettäisiin mahdollisimman korkealla tai laite poistettaisiin kokonaan käytöstä. Energian tuhlaamista pyrittäisiin rajoittamaan seuraamalla laitteiden energiankulutusta ja liikuttamalla energiaa mahdollisimman suoralla yhteydellä laitteelta laitteelle, jotta väliin ei jäisi turhia komponentteja, mutta ottaen silti huomioon turvalliset käytänteet. Tämä kaikki suunniteltaisiin jo ennen konesalin ra-

kentamista, jotta välttyttäisiin myöhemmiltä muutoksilta. Mikäli myöhemmin tajuttaisiin, että jokin kohta konosalissa kuluttaa huomattavasti enemmän energiaa kuin mitä haluttaisiin, niin tilanne kuuluisi ottaa haltuun mahdollisimman nopeasti, mitä varten olisi jo etukäteen suunniteltu varasuunnitelma.

Jäähdytysratkaisuna käytettäisiin räkkikohtaista jäähdytystä sen energiatehokkuuden takia, minkä vuoksi laitetilat olisi suunniteltu mahdollisimman tiiviiksi ja räkkikaapit muodostaisivat seinämät, jotta ilmavirtaukset eivät pääsisi sekoittumaan toisiinsa. Jäähdytyksestä saataisiin mahdollisimman paljon irti, mikäli konosalissa kiertävä ilma, vesi tai jäähdytysneste viilennettäisiin mahdollisimman suuren osan aikaa vuodesta kylmän ulkoilman eikä toisen energiaa kuluttavan laitteen avulla. Jäähdytyksestä otettaisiin talteen kaikki mahdollinen hukkalämpö, jota käytettäisiin konosalin omien tilojen lisäksi myös alueen lämpöverkon kautta muiden rakennusten lämmittämiseen.

Mittaus- ja seurantajärjestelmien toiminta pyrittäisiin saamaan mahdollisimman nopeasti jalkeille ja ne olisivat toiminnassa jo rakennusvaiheen aikana, jotta kulutusta päästäisiin mittaamaan heti alusta alkaen. Kyseessä olisi konosalin infrastruktuuria osana oleva automaattinen järjestelmä, joka palauttaisi asetetuina väliajoin arvoja, jotka otettaisiin talteen myöhempää havainnollistamista varten. Järjestelmä valittaisiin jo ennen konosalin rakentamisen aloittamista, jotta kaikki osat kuuluisivat yhteen mukaan lukien käytettävät sovellukset ja järjestelmä olisi suunniteltu kattamaan koko konesali yksittäisten laitteiden kulutukseen asti. Mittaaminen tapahtuisi monesta eri kohtaan ja varsinkin laitteiden välistä, missä energiaa voi mennä hukkaan. Konesalin energiatehokkuutta tarkisteltaessa voitaisiin yleisemmällä tasolla käyttää PUE-arvoasteikkoa, mutta olisi myös tärkeä ottaa huomioon laitteiden työmäärä ja mitata energiatehokkuutta usealla eri tavalla sekä verrata laskutuloksia, jotta saataisiin mahdollisimman laaja käsitys kulutuksesta ja täten pystyttäisiin soveltamaan parhaimpia ratkaisuja.

6 Energiatehokkaan konesalin rakentaminen Kajaanin ammattikorkeakoululle

Kajaanin ammattikorkeakoululla on jo ennestään opiskelijoiden käytössä oleva konesali, mutta kyseisen vanhemman salin rajoitukset motivoivat uuden konesalin rakentamista. Fyysisellä tasolla vanha konesali ei kestäisi sähkönsyötön tai jäähdytyksen kannalta enempää käyttökuormaa, eikä sinne olisi enää mahtunut CSC:ltä lahjoituksena saadut rakkikaapit [40]. Uuden salin tarkoituksena on toimia sijaintina saaduille laitteistolle kuin myös insinööriopiskelijoille tarkoitettulle oppimisympäristölle tai infrastruktuurille, joka tulee sisältämään muun muassa tietokantoja, palomuurin, virtualisointiympäristön yms. [41]. Insinööri- ja tradenomiopetuksen erottaminen toisistaan tarkoittaa, että käyttöön saadaan kahden konesalin väliset ratkaisut, mutta muuta opetusta ei haittaa, vaikka vanhassa konesalissa toteutettaisiin käytännön harjoituksia tai tehtäisiin raskaampia muutoksia [40].

Uuden konesalin koko on 16,1 m² ja se tulee sisältämään kolme rakkikaappia, joista kahdessa tullaan pääasiassa säilyttämään noin 4–5 vuotta vanhoja palvelimia eli tietotekniikan laitteita, jotka tarjoavat erilaisia palveluja paikallisesti tai tietoverkon välityksellä [41]. Vanhempien palvelimien käyttö on ekologisesti parempi vaihtoehto kuin uusien ostaminen, eivätkä korkeakoulut kilpaile samalla tavoin kuin yritykset, joten käytettävän laitteiston ei tarvitse olla täysin uusista komponenteista koottu. Kolmas kaappi jää tyhjilleen, ja opiskelijat pääsevät käyttämään sitä laiteasennusharjoituksissa [41].

6.1 Jäähdytys ja hukkalämmön hyödyntäminen

Konesalin jäähdytykseen käytetään vakioilmastointikonetta, joka ylläpitää ilmavirtausta vetämällä lämmintä ilmaa sisäänsä, jäähdyttämällä sen ja puhaltamalla takaisin kylmää ilmaa. Jotta lämmin ilma saadaan jäähdytettyä, siirretään se ensin vakioilmastointikoneen avulla konesalin ja kylmävesiaseman väliseen nestekiertoon. Konesalissa kiertävä neste pitää olla tarpeeksi kylmää, jotta vakioilmastointikone saa jäähdytettyä laitteita tehokkaasti, minkä takia konesalin ja kylmävesiaseman välinen nestekierto on noin 7 °C ennen kuin se nousee noin 12 °C:seen laitteiden tuottaman lämmön seurauksena. Kylmävesiasemasta lämpö siirtyy toiseen nesteeseen, todennäköisesti glykoliin, joka lämpenee korkeimmillaan 43 °C:seen ennen kuin se kierrätetään rakennuksen katolla olevaan lauhduttimeen jäähdytettäväksi ulkoilman avulla takaisin noin 35 °C:seen. Katolle kiertävä glykoli saa lämmetä paljon enemmän kuin konesalin nestekierto, jotta sitä voidaan

jäähdyttää vuoden ympäri myös kovalla helteellä. [42.] Jäähdytysratkaisun valintaan vaikuttivat hinta, tehokkuus ja käyttöön otettava laitteisto, minkä vuoksi muun muassa räkkikohtaista jäähdytystä ei valittu [41].

Konesalin tuottamaa lämpöenergiaa on tarkoitus hyötykäyttää kiinteistön kasvihuonekontin lämmittämiseen, mihin lämmintä ilmaa saadaan suoraan katolla sijaitsevasta lauhduttimesta. Tulevaisuudessa on myös tarkoitus käyttää hukkalämpöä rakennuksen käyttöveden lämmitystä varten, mikä otetaan huomioon rakennusvaiheessa tekemällä liityntäpiste valmiiksi. Käyttöveden lämmitystä ei kuitenkaan toteuteta vielä konesalin rakennusvaiheessa, vaan myöhemmin, kun kiinteistön omaa jäähdytysjärjestelmää remontoidaan. [41.] Tarkoituksena on kuitenkin saada kaikki hyödyt muuten hukkaan menevästä lämmöstä ja energiatehokkaaseen toimintaan kuuluu-kin myös tulevaisuuden käyttöratkaisujen rakentaminen, vaikka kyseisiä käytänteitä ei voitaisikaan ottaa heti käyttöön.

6.2 Energiankulutuksen seuraaminen

Vaikka varsinaisen käytettävän mittausjärjestelmän valintaan ei vielä tämän opinnäytetyön aikana päädytty, todennäköinen ratkaisu on suorittaa energiankulutuksen mittaaminen sähkönsyötön ja jäähdytyksen automaatiolaitteilta, joilta kerättyä informaatiota säilötään tietokantaan ja visualisoidaan siihen tarkoitetun sovelluksen avulla. Tavoitteena on mitata energiankulutusta useammasta kohtaa mukaan lukien tilaan asennettavat räkkikaapit sekä yksittäiset laitteet, joiden virrankulutusta pystytään valvomaan monitoroitavissa olevan virranjakoyksikön avulla. [41.] Useammasta kohtaa mittaamalla pystytään seuraamaan energiankulutusta laitteelta laitteelle, mutta myös paikantamaan energiaa hukkaavia komponentteja.

Rakennusvaiheessa mitataan sähkönkulutuksen sekä mahdollisten jäähdytyksessä esiintyvien vuotojen lisäksi myös lämpötilaa ja ilmankosteutta. Konesalin valmistuttua tarkoituksena on lisätä enemmän mittareita, joiden avulla pystytään seuraamaan muun muassa valaistusta, ilmanlaatua ja muita elementtejä, joita ei vielä rakennusvaiheessa otettu mitattavaksi. [41.] Monipuolisen mittaamisen avulla pystytään tarkkaavaisesti seuraamaan tilassa tapahtuvia muutoksia, jotka voivat vaikuttaa suorituskykyyn tai energiatehokkuuteen.

7 Pohdinta

Tämän opinnäytetyön keskeisimpänä tarkoituksena oli selvittää ekologisen toiminnan ja energiatehokkaiden ratkaisujen toteuttamista konesalialalla. Energiatehokkuus määriteltiin prosesseina, joiden tavoitteena on mahdollistaa käytettäväksi vain palvelun tai tuotteen tekemiseen tarvittava määrä energiaa. Vastauksia pyrittiin löytämään hakemalla tietoa konesalialasta useista maista ja maanosista, ottamalla selvää konesalin rakennusprosessista ja energiatehokkuuden mittausmenetelmistä sekä näiden ratkaisujen tarjoamista hyödyistä.

Työn aikana konesalien toiminnasta kerättiin tietoa laajalla otteella luomaan yleistävä kuva alasta, eri alueiden suosimista ratkaisuista ja alueiden energiatehokkuuden tasosta toisiinsa verrattuna. Konesalin sijoituskohteen suosioon vaikuttivat muun muassa teknologinen kehittyneisyys, suosio muiden yritysten joukossa sekä geologinen ja poliittinen rauhallisuus. Tästä pystyi päättämään, että kaikilla alueilla ei ole yhtä vahvaa kysyntää, mutta nousussa näytti myös olevan sijainnin potentiaali energiatehokkaiden ratkaisujen toteuttamiselle, mikä voi tulevaisuudessa vaikuttaa konesalien ryhmittymien muodostumiseen uusille alueille. Miellyttävää tällöin on alan toimijoiden tietoisuus ja kiinnostus valitsemansa kohteen ekologisuudesta. Koska työ kertoo konesalialasta vain yleistävällä tasolla, tuloksia ei voida käyttää antamaan tarkempaa kuvaa alueiden tai yritysten toiminnasta.

Vain Suomen konesalien energiatehokkuutta tarkasteltaessa keskityttiin rajoitettuun alueeseen, mutta tällöinkin on tärkeää välttää liian tarkkojen johtopäätösten luomista saaduista tuloksista. Suomen konesalien energiatehokkuuden taso, mikä osoittautui korkeaksi, olisi voinut muuttua, mikäli konesalien vertailu olisi keskitetty pelkästään Pohjoismaiden sisälle. Pohjoismaiden konesalit on todettu energiatehokkaiksi, joten Suomi olisi voinut saada alhaisemman, kuitenkin suotuisan, tuloksen, kun sitä olisi verrattu muun muassa Norjaan tai Ruotsiin muiden työssä esitettyjen kohteiden sijasta. Johtopäätökset eivät kuitenkaan perustuneet vain maiden väliseen vertailuun ja Suomi on osoittautunut suotuisaksi konesalien sijoituskohteeksi. Täten voidaan todeta, että työn aikana osittain saavutettiin myös tarkempi kuva konesalialan toiminnasta, vaikka vain Suomen alueella, mitä olisi voitu analysoida vielä syvällisemmin.

Sijoituskohteen löytäminen oli vasta ensimmäinen askel energiatehokkaan konesalin tarkastelussa, minkä jälkeen siirryttiin pohtimaan rakentamiseen ja toimintaan vaikuttavia muuttujia. Tulokseksi saatiin, että konesaleissa energiaa tuhlataan huonojen päätösten tai holtittomasti valit-

tujen ratkaisujen kautta. Näitä ovat muun muassa alhaisen tehotason jäähdytysratkaisut ja laitteiden käyttökapasiteetin puutteellinen hyödyntäminen. Pienimmillään energiankuluttajilla on vaikutuksensa ja niiden huomioimatta jättäminen aiheuttaa kustannusten nousua pitkällä aikavälillä. Energiatehokas konesali ottaa kaiken huomioon varmistaakseen optimaalisen energian käytön tietotekniikan laitteiden kuin myös ulkopuolisten muuttujien osalta. Työn perusteella saatiin selville, että suotuisimpia energiatehokkuuden nostattamisen menetelmiä ovat jäähdytyksen tehostaminen ja laitteiden toiminnan optimoiminen. Konesalista saadaan enemmän hyötyä myös yhteisöllisesti, mikäli laitteiden tuottamaa lämpöenergiaa käytetään hyödyksi, vaikka lähialueen rakennusten lämmittämiseen.

Energiatehokkaat ratkaisut tuottavat konesalille monipuolisia hyötyjä, kuten tuotannollisia ja sosiaalisia etuja, mutta houkuttelevimmaksi todettiin taloudellinen kasvu. Ekologinen toiminta tuottaa vähemmän haittaa ympäristölle sekä työntekijöille ja lähialueen asukkaille myös laitteiden tuotannosta ja hävityksestä vastaavilla alueilla. Tietotekniikan komponenttien valmistaminen ja purkamisen avasivat lisää kysymyksiä ekologisten valintojen suhteen, sillä aiheutettu vahinko tapahtuu useimmiten toisessa maassa, eikä tuotannosta aiheutuvia ongelmia välttämättä tuoda esille vahinkoalueen etäisyyden takia. Tämän takia on varsin tärkeää, että päätösten tekoa ja konesalin toimintaa seurataan tarkkaavaisesti, minkä takia työn aikana otettiin selvää energiatehokkuuden lisäksi kulutuksen mittaamisesta.

Energiatehokkuuden mittaus- ja seurantajärjestelmät ovat tärkeä osa konesalin toimintaa, sillä niiden avulla saadaan konkreettisia arvoja aktiivisten prosessien kulutuksesta. Kyseisten arvojen avulla pystytään analysoimaan konesalin nykytilanteen sekä tulevaisuuden lisäksi kulutukseltaan ongelmallisen korkeita kohtia ja säännöllisiä muutoksia. Energiatehokkuuden mittaaminen voi tapahtua eri tavoin, mutta useampaa laitetta seuraava automaattinen järjestelmä minimoi inhimilliset virheet ja takaa säännöllisin väliajoin lukemia, joiden avulla pystytään ylläpitämään tietokantaa komponenttien kulutuksesta. Mittaustuloksista saadaan paras mahdollinen irti, kun niitä käytetään konesalia koskevien ratkaisujen tekoon.

Uudeksi ongelmaksi nousi yritysten mahdollisuus mittaustulosten vääristämiselle ja täten parempien tulosten saavuttaminen todellisuudessa energiatehokkuustasoltaan alhaiselle konesalille. Mikäli tulosten vääristäminen todettaisiin yleiseksi ongelmaksi alalla, olisi otollista perehtyä tarkemmin yritysten motivaatioihin huijaamiselle. Pitäisikö tulevaisuudessa rajoittaa mittausjärjestelmien ja -menetelmien käyttöä niin, että kaikille konesaleille asetettaisiin samat säännöt? Ilman tarkkoja sääntöjä yritykset saavat tulkita tuloksia oman mielensä mukaan, minkä takia tulevaisuudessa olisi hyvä muuttaa toimintaperiaatetta mittaamisen suhteen yhdenmukaiseksi. Tulosten

kanssa pitää täten olla erittäin kriittinen. Tämän työn yhteydessä ei varsinaisesti onnistuttu aukaisemaan tätä ongelmaa syvällisemmin, minkä takia kyseisen pulman tutkiminen jatkossa voisi olla hyödyksi.

Kajaanin ammattikorkeakoululle sijoittuvan konesalin rakennusprosessin tarkastelun tavoitteena oli seurata mitä ratkaisuja on otettu tai ollaan ottamassa käyttöön ja miltä konesalin tulevaisuus näyttää. Täten työlle saatiin myös käytännön esimerkki, vaikka vain pienemmästä konesalista. Suotuisampi esimerkki olisi voinut olla ulkopuolisen tahon rakentama suurempi konesali, jotta olisi saatu sopivampi vertailukohde teoriassa esitettyihin isomman konesalin ratkaisuihin. Tästä huolimatta voidaan kuitenkin sanoa, että ammattikorkeakoululle rakennettava konesali on esimerkki siitä, miten pienemmätkin konesalit voivat ottaa huomioon energiatehokkaat ratkaisut.

Työn tuloksena saatiin selville, että konesali noudatti ja tulevaisuudessa sen on tarkoituksena noudattaa energiatehokkaita ratkaisuja. Suunnittelussa on otettu huomioon laitteiden ikä, jäähdytys ja muut ratkaisut, jotka ovat koululle hyödyksi muun muassa hukkalämmön hyödyntäminen. Tämän perusteella voidaan todeta, että käytännön esimerkki heijastaa teoriassa läpikäytyjä ratkaisuja. Tuloksia voidaan jatkossa hyödyntää, kun ammattikorkeakoulun sisäisiä konesaleja tarkastellaan toistensa kanssa, mitä tämän työn aikana ei otettu esille. Saatuja tuloksia voidaan myös käyttää vertaillessa konesaleja muiden toimijoiden kanssa.

Lopuksi voidaan todeta, että työn tavoite selvittää ja selittää energiatehokkaiden konesalien rakentamisen ja energiatehokkuuden mittaamisen tärkeyttä saavutettiin. Aiheen rajoittaminen kuitenkin olisi ollut hyödyksi, sillä saadut tulokset olivat yleistäviä, eikä konesalialasta täten saatu muodostettua tarkempaa tai syvällisempää kuvaa. Kyselyt, haastattelut ja työskentely muiden alan toimijoiden kanssa jäivät pois, mutta nämä asiat pystyttäisiin ottamaan huomioon mahdollisissa jatkotutkimuksissa. Tulevaisuudessa voitaisiin päätelmien lisäksi ottaa enemmän kantaa konkreettisten lukuarvojen avulla.

7.1 Opinnäytetyön luotettavuus ja pätevyys

Lähdeaineiston analysoinnin haasteena on havainnoitsijan taipumus painottaa tietoa, mikä tukee työssä esitettyjä väittämiä ja täten vastaväitteitä ei tuoda yhtä vahvasti esille. Mikäli työn tavoitteena on selvittää positiivisia vaikutuksia, on huomioitava, että nämä positiiviset vaikutukset otetaan todennäköisemmin esille riippumatta niiden esiintymismäärästä kartoitetussa lähdeaineis-

tossa. Vaikka tämän opinnäytetyön tarkoituksena on kertoa ekologisen toiminnan hyödyistä, käytettyjä lähteitä pyrittiin tulkitsemaan mahdollisimman neutraalisti, jotta vältettäisiin havaintojen vääristynyt tulkitseminen työlle otollisella tavalla.

Työn laatuun on saattanut vaikuttaa yritysten avoimuus tietojensa julkaisemiselle; energiatehokkaita ratkaisuja käyttävät yritykset kertovat enemmän toiminnastaan kuin yritykset, jotka eivät noudata samoja periaatteita, sillä nämä yritykset saivat luultavammin negatiivisen vastaanoton tiedon julkaisemisesta. Näin analysoitavaa materiaalia saadaan enemmän positiivisesta näkökulmasta ja saatavilla oleva tieto voi väistämättäkin nojautua opinnäytetyölle suotuisaan suuntaan. Vastaväitteiden vähäinen määrä rajoittaa tulosten luotettavuutta, sillä aihetta voidaan tutkia vain yhdeltä näkökannalta.

Koska opinnäytetyön selvitystä konesalien energiatehokkuudesta ei rajoitettu yhteen maahan tai maanosaan, on mahdollista, että tietoa ei kertynyt tasaisessa suhteessa kaikkien alueiden kesken. Myös hakukieli tai käytetyt hakusanat ovat voineet vaikuttaa tiedon monipuolisuuteen. Mikäli lähteitä olisi haettu esimerkiksi espanjan tai portugalin kielellä, olisiko osuus Latinalaisen Amerikan konesalien tilanteesta mahdollisesti muotoutunut eri tavalla?

Lähdeaineiston tulkintaan vaikuttaa myös lähteen sijainti ja ikä. Tiedon haku tämän työn yhteydessä rajoittui vain internetissä saatavilla oleviin lähteisiin ja lisätietoa olisi voitu saada kääntymällä muun kirjallisuuden puoleen tai toteuttamalla haastatteluja alan toimijoiden kanssa. Tietotekniikka kehittyy huimaa tahtia ja täten vanhemmat lähteet voivat nopeasti menettää paikkansapitävyytensä. Tämä ei tarkoita, etteikö vanhempiin lähteisiin voisi luottaa ja ne voivatkin tarjota pohjatietoa myös uudemmille ratkaisuille, mutta vanhempien lähteiden käytön edellytyksenä on tiedon kriittinen vertaaminen uudempaan materiaaliin.

Käytännön esimerkkiä varten tehtiin rajoitettu määrä lähityötä, jonka lisääminen olisi voinut paljastaa enemmän tietoa konesalista. Tämän lisäksi esitetyt suositukset ja päätelmät perustuvat yksittäisten henkilöiden lausuntoihin, mikä on voinut vaikuttaa lopputuloksiin ja niiden tarkkuuteen, jos tietoa on tulkittu eri tavoin henkilöiden kesken. Konesalin tarkastelu toteutettiin vain rajoitetulta ajalta konesalin rakennusprosessia, eikä opinnäytetyössä oteta tämän takia kantaa prosessin loppua tai konesalin varsinaista käyttöä kohden. Konesalin toiminnasta tehdyt johtopäätökset voivat menettää pätevyytensä, mikäli lopulliset ratkaisut poikkeavat työn aikana noudatetuista ratkaisuista.

7.2 Jatkotutkimustarpeet ja -ideat

Jatkotutkimusten osalta suotuisinta olisi keskittyä vain yhden maan tai maanosan konesalien energiatehokkuuteen koko maailman sijasta, jotta saataisiin tarkempi kuva alan tilanteesta yleis-tävän kuvan sijaan, mikä saavutettiin tämän työn aikana. Tiedonhakua voitaisiin laajentaa internetin ulkopuolisiin lähteisiin ja haastattelujen tai kyselylomakkeiden avulla saataisiin suoraa palautetta alan yrityksiltä. Ovatko odotukset energiatehokkaiden ratkaisujen suhteen täyttyneet? Onko ekologisen toiminnan soveltaminen vaikuttanut oikealta päätökseltä ja myös tulevaisuudessa käytettävältä ratkaisulta?

Työn aikana esitettyihin energiatehokkaiden ratkaisujen hyötyihin olisi hyvä pureutua vielä syvällisemmin kartoittamalla muita mahdollisia hyötyjä tai haittoja. Sen jälkeen voitaisiin ottaa vertailtavaksi alhaisen ja korkean energiatehokkuustason konesaleja, jotta saataisiin kerättyä konkreettisia lukuarvoja hyötyjen tueksi kulutuksesta, taloudesta, markkinoinnista ja muusta toiminnasta. Saatujen lukemien esittäminen korottaisi tämän työn luotettavuutta ja tarjoaisi mahdollisuuden vahvemmille kannanotoille päätelmien rinnalle. Havainnollistavia arvoja saataisiin myös paremmin esille tutkimalla konesalien suosion muuttumista vuosien varrella. Onko ekologisella toiminnalla ollut suosioon iso vai pieni vaikutus? Tutkimuksessa voitaisiin kartoittaa, miten suosittuja ekologisen toiminnan konesalit olivat kymmenen vuotta sitten muihin konesaleihin verrattuna ja sitten tarkastella samaa aihetta, mutta uudempien konesalien kanssa. Kehityksen mallintaminen voitaisiin toteuttaa asteikon tai käyrän avulla.

Jatkotutkimustarpeet Kajaanin ammattikorkeakoulun konesalia varten voisivat liittyä energiatehokkuuden tarkkailuun tämän työn kattaneen tarkastelujakson päättymisen jälkeen. Onko valittuja ratkaisuja noudatettu vai onko niistä päästetty irti? Koska työ kohdistui vain rajoitetulle ajalle, tehtyjen päätelmien tarkkuuden ja luotettavuuden tueksi tarvitaan lisäinformaatiota konesalin toiminnasta. Jatkossa voitaisiin tarkastella minkälaiset rajoitukset ammattikorkeakoulu tai samantapainen toimija asettaa vastaavalle rakennusprosessille esimerkiksi budjetin suhteen. Rajoitetaanko konesalin potentiaalia jo ennen rakentamisen aloittamista tai sen aikana? Olisi myös mielenkiintoista verrata uutta konesalia muiden ammattikorkeakoulujen tai samankaltaisten toimijoiden konesaleihin ja kyseisestä aiheesta voisi suorittaa erillisen tutkimuksen.

Lähteet

- 1 Motiva. 2010. Selvitys IT-ympäristön sähkönsäästökeinoista. Viitattu 14.9.2020. http://www.motiva.fi/files/4427/Konesalipalvelujen_energiatehokkuuden_periaatteet.pdf
- 2 Environmental and Energy Study Institute. N.d. Energy Efficiency. Viitattu 14.9.2020. <https://www.eesi.org/topics/energy-efficiency/description>
- 3 Työ- ja elinkeinoministeriö. N.d. Energiatehokkuus. Viitattu 14.9.2020. <https://tem.fi/energiatehokkuus>
- 4 Ayanoglu, E. 2019. Energy Efficiency in Data Centers. Institute of Electrical and Electronics Engineers Communications Society. Viitattu 14.9.2020. <https://www.comsoc.org/publications/tcn/2019-nov/energy-efficiency-data-centers>
- 5 Motiva. 2018. Energiatehokkuuden oheishyödyt yrityksissä. Viitattu 14.9.2020. https://www.motiva.fi/files/15389/Energiatehokkuuden_oheishyodyt_yrityksissa.pdf
- 6 Pearce, F. 2018. Energy Hogs: Can World's Huge Data Centers Be Made More Efficient? Yale Environment 360. Viitattu 14.9.2020. <https://e360.yale.edu/features/energy-hogs-can-huge-data-centers-be-made-more-efficient>
- 7 Cloudscene. N.d. Data Centers in Europe. Viitattu 16.9.2020. <https://cloudscene.com/datacenters-in-europe>
- 8 Työ- ja elinkeinoministeriö. N.d. Energiatehokkuusdirektiivi ja energiatehokkuuslaki. Viitattu 16.9.2020. <https://tem.fi/energiatehokkuusdirektiivin-toimeenpano>
- 9 Cruz, L. 2018. Study: Energy Efficiency in European Data Centers. Omdia. Viitattu 16.9.2020. <https://technology.informa.com/607235/study-energy-efficiency-in-european-data-centers>
- 10 Motiva. 2011. Energiatehokas konesali. Viitattu 15.9.2020. https://www.motiva.fi/files/4828/Energiatehokas_konesali.pdf

- 11 Yandex. 2019. How Yandex's Finland Data Centre Helps Heat the Local Community. Viitattu 15.9.2020. https://www.youtube.com/watch?v=5JeF_XZ6Z6U
- 12 Center for Scientific Computing. N.d. LUMI: yksi maailman tehokkaimmista supertietokoneista. Viitattu 21.9.2020. <https://www.csc.fi/lumi>
- 13 Center for Scientific Computing. 2020. LUMI-supertietokoneen hukkalämmöllä tuotetaan 20 prosenttia Kajaanin kaukolämmöstä: CSC ja Loiste Lämpö allekirjoittivat sopimuksen. Viitattu 21.9.2020. <https://www.csc.fi/-/lumi-supertietokoneen-hukkal%C3%A4mm%C3%B6ll%C3%A4-tuotetaan-20-prosenttia-kajaanin-kaukol%C3%A4mm%C3%B6st%C3%A4-csc-ja-loiste-l%C3%A4mp%C3%B6-allekirjoittivat-sopimuksen>
- 14 Fingrid. N.d. Kantaverkon kehittämissuunnitelma 2019–2030. Viitattu 15.9.2020. https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/kantaverkko/kantaverkon-kehittaminen/kantaverkon_kehittamissuunnitelma-2019-2030.pdf
- 15 Energy Efficiency and Renewable Energy. N.d. About the Federal Energy Management Program. Viitattu 24.9.2020. <https://www.energy.gov/eere/femp/about-federal-energy-management-program>
- 16 Cloudscene. N.d. Data Centers in South America. Viitattu 24.9.2020. <https://cloudscene.com/datacenters-in-south-america>
- 17 Carpio, C. & Coviello, M. F. 2014. Energy Efficiency in Latin America and the Caribbean: Progress and Challenges of the Past Five Years. Economic Commission for Latin America and the Caribbean. Viitattu 24.9.2020. https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/36637/S2014080_en.pdf?sequence=1
- 18 Guerra, L. & Guillén, J. 2019. Energy Efficiency Laws in Latin America and the Caribbean. Olade. Viitattu 24.9.2020. <http://biblioteca.olade.org/opac-tmpl/Documentos/old0437.pdf>
- 19 Greenpeace. 2019. Powering the Cloud: How China's Internet Industry Can Shift to Renewable Energy. China Water Risk. Viitattu 24.9.2020. <http://www.chinawater-risk.org/research-reports/powering-the-cloud-how-chinas-internet-industry-can-shift-to-renewable-energy/>

- 20 Ropes & Gray. 2019. Data Center Investment Trends. Viitattu 24.9.2020. <https://www.ropesgray.com/en/newsroom/alerts/2019/07/Data-Center-Investment-Trends?NK=data%20center%20investment%20trends>
- 21 Low, P. N.d. Datacentre Market Outlook. BroadGroup. Viitattu 24.9.2020. http://grass-events.com/wp-content/uploads/2017/03/13_40-BroadGroup.pdf
- 22 Basu, S. 2016. A Study on Selection of Data Center Locations. International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering, 4, 8, 14613–14616. Viitattu 25.9.2020. DOI: 10.15680/IJIRCCCE.2016. 0408002.
- 23 Vertiv. N.d. Data Center Infrastructure Management. Viitattu 25.9.2020. <https://www.vertiv.com/4a4d0a/globalassets/products/monitoring-control-and-management/software/data-center-infrastructure-management-promises-challenges-and-imperatives-of-data-center-infrastructure-management.pdf>
- 24 Krein, P. T. 2017. Data Center Challenges and Their Power Electronics. China Power Supply Society Transactions on Power Electronics and Applications, 2, 1, 39–46. Viitattu 25.9.2020. http://tpea.cpss.org.cn/uploads/soft/170421/1_1201051971.pdf
- 25 Butollo, F., Kusch, J. & Laufer, T. 2010. Hanki IT reilusti. Eettisen kaupan puolesta. Viitattu 6.10.2020. https://eetti.fi/wp-content/uploads/2018/01/HankiIT_reilusti_ohje_FI_web_KOR.pdf
- 26 DellTechnologies. 2019. Why Faster Refresh Cycles and Modern Infrastructure Management Are Critical to Business Success. Viitattu 6.10.2020. <https://www.delltechnologies.com/asset/en-us/solutions/business-solutions/industry-market/forrester-why-faster-refresh-cycles-and-modern-infrastructure-management-are-critical-to-business-success.pdf>
- 27 Lin, P. N.d. Optimize Data Center Cooling with Effective Control Systems. Schneider Electric. Viitattu 8.10.2020. <https://it-resource.schneider-electric.com/white-papers/wp-225-optimize-data-center-cooling-with-effective-control-systems>
- 28 Dunlap, K. & Rasmussen, N. N.d. Choosing Between Room, Row, and Rack-based Cooling for Data Centers. Schneider Electric. Viitattu 8.10.2020. <https://it-resource.schneider->

[electric.com/white-papers/wp-130-choosing-between-room-row-and-rack-based-cooling-for-data-centers](https://www.schneider-electric.com/white-papers/wp-130-choosing-between-room-row-and-rack-based-cooling-for-data-centers)

- 29 Rasmussen, N. & Torell, W. N.d. Data Center Projects: Establishing a Floor Plan. Schneider Electric. Viitattu 7.10.2020. <https://it-resource.schneider-electric.com/white-papers/wp-144-data-center-projects-establishing-a-floor-plan>
- 30 Motiva. 2013. Tuotannon hukkalämpö hyödyksi. Viitattu 7.10.2020. https://www.motiva.fi/files/8501/Tuotannon_hukkalampo_hyodyksi.pdf
- 31 Evans, T. N.d. Humidification Strategies for Data Centers and Network Rooms. Schneider Electric. Viitattu 7.10.2020. <https://it-resource.schneider-electric.com/white-papers/wp-58-humidification-strategies-for-data-centers-and-network-rooms>
- 32 Motiva. 2014. Energiatohokkuuden mittaus- ja seurantajärjestelmän hankinta. Viitattu 9.10.2020. https://www.motiva.fi/files/9845/Energiatohokkuuden_mittaus_ ja_seurantajarjestelman_hankinta.pdf
- 33 Smarter Services. N.d. How to Monitor and Manage Energy Efficiency in the Workplace. Viitattu 9.10.2020. <https://www.smarterservices.co.uk/energy-efficiency>
- 34 Abdurachmanov, D., Elmer, P., Eulisse, G., Khan, K., Knight, R., Niemi, T., Nurminen, J. K., Nyback, F., Ou, Z. & Pestana, G. 2015. Techniques and Tools for Measuring Energy Efficiency of Scientific Software Applications. Journal of Physics: Conference Series, 608. Viitattu 9.10.2020. DOI: 10.1088/1742-6596/608/1/012032.
- 35 Newcombe, L. N.d. Data Centre Energy Efficiency Metrics. British Computer Society. Viitattu 9.10.2020. https://www.bcs.org/media/2916/data-centre-energy_1.pdf
- 36 Brotherton, H. 2013. Datacenter Efficiency Measures. ResearchGate. Viitattu 10.10.2020. DOI: 10.13140/RG.2.1.2757.4246.
- 37 42U. N.d. What is PUE / DCiE? Viitattu 11.10.2020. <https://www.42u.com/measure-ment/pue-dcie.htm>
- 38 Center for Scientific Computing. 2016. CSC vie suomalaista laskenta- ja datakeskusosaamista maailmalle – kestävän kehityksen edelläkävijänä. Viitattu 11.10.2020. <https://www.csc.fi/-/csc-vie-suomalaista-laskenta-ja-datakeskusosaamista-maailmalle>

- 39 Madani, K., Makuch, Z. & Ristic, B. 2015. The Water Footprint of Data Centers. *Sustainability*, 7, 8, 11260–11284. Viitattu 8.10.2020. DOI: 10.3390/su70811260.
- 40 Partanen, T. 2020. Uudesta konesalista. Sähköpostiviesti 19.10.2020. Vastaanottaja H. Joensuu.
- 41 Huusko, T. 2020. Infoa konesalista. Sähköpostiviesti 19.10.2020. Vastaanottaja H. Joensuu.
- 42 Huusko, T. 2020. Infoa konesalista. Sähköpostiviesti 27.10.2020. Vastaanottaja H. Joensuu.