

Alexi Kaalikoski

**DATAKESKUSTEN PÄÄSTÖJEN VÄHENTÄMINEN
VIHREÄN IT:N KEINAIN**



JYVÄSKYLÄN YLIOPISTO
INFORMAATIOTEKNOLOGIAN TIEDEKUNTA
2024

TIIVISTELMÄ

Kaalikoski, Aleksi

Datakeskusten päästöjen vähentäminen vihreän IT:n keinoin

Jyväskylä: Jyväskylän yliopisto, 2024, 31 s

Tietojärjestelmätiede, kandidaatintutkielma

Ohjaaja: Mehtälä, Saana

Tässä tutkielmassa tutustutaan kasvavaan globaaliin ongelmaan. Yhteiskuntamme tiedonmäärä kasvaa räjähdysmäisesti, eikä ilmastomme pysy tämän muutoksen vauhdissa, ellemmme muuta toimintamallejamme fossiilista ratkaisusta hiilineutraaleihin vaihtoehtoihin. Tietoyhteiskuntamme aivoina voidaan pitää datakeskuksia, jotka käsittelevät suurimman osan yhteiskuntamme tallentamasta ja käyttämästä tiedosta. Datakeskusten olemassaolo on siis välttämättömyys nykyaikaisten tietojärjestelmien ja informaatioteknologioiden olemassaololle. Tiedon sijoittaminen datakeskuksiin hyödyttää yhteiskuntaa ja tarjoaa niin organisaatioille kuin päivittäisille käyttäjille palvelimia. Tiedon keskittämisellä on kuitenkin myös haittavaikutuksia. Datakeskukset kuluttavat suuria määriä sähköä ja niiden luomat hiilidioksidipäästöt ovat nousseet samalla tasolle, kuin lentoliikenteestä aiheutuvat hiilidioksidipäästöt. Lämpöpäästöt tulevat myös lisääntymään, ellei niitä aleta hallitsemaan entistä tehokkaammin. Vihreä IT tarjoaa ratkaisuja IT:n eli tässä tapauksessa datakeskusten tuottamiin ympäristöongelmiin. Tutkielman tarkoituksena onkin perehtyä kirjallisuuskatsauksen avulla datakeskusten toimintaa, vihreään IT:hen ja siihen, kuinka näitä kahta yhdistelemällä datakeskusten toimintamallia voitaisiin suunnata kohti hiilineutraaliuutta. Tutkielmassa havaitaan, että datakeskusten hiilineutraaliuuteen vaikuttaa seuraavat neljä päätekijää: 1) Modernien ja tehokkaiden IT-laitteiden hyödyntäminen, joka voi merkittävästi vähentää energiankulutusta datakeskuksissa 2) Toissijaisenlaitteiston energiatehokkuus, erityisesti jäähdytysjärjestelmän osalta 3) Laskennan hallinta, joka pyrkii vähentämään käyttämättömien laitteiden aiheuttamaa energiahävikkiä tehokkaalla työkuormien konsolidoinnilla ja 4) Energiajärjestelmän integrointi lämmön ja kysyntäjoustop hallinnan osalta, mikä tarjoaa mahdollisuuden merkittävään energiatehokkuuden lisäämiseen. Voidaan todeta, että vihreän IT:n implementointi datakeskusympäristöön laskee merkittävästi päästöjä, lisäten samalla kustannustehokkuutta. Datakeskusten tehokkuuden lisääminen voi täten johtaa globaalin tietoyhteiskuntamme mittakaavalla merkittäviin ympäristöllisiin säästöihin. Katsaus päättyy pohtivaan yhteenvedoon datakeskusten toiminnallisuuden parantamisesta, uusista toimintamalleista, sekä tarpeista aiheen jatkotutkimukselle alati muuttuvalla datakeskussektorilla.

Asiasanat: datakeskus, vihreä IT, hiilineutraali

ABSTRACT

Kaalikoski, Aleksi

Reducing emissions from data centers through green IT

Jyväskylä: University of Jyväskylä, 2024, 31 p

Information Systems Science, Bachelor's Thesis

Supervisor: Mehtälä, Saana

This bachelor's thesis explores a growing global problem. The amount of information in our society is growing exponentially, and our climate will not keep pace with this change unless we shift our policies from fossil-based to carbon-neutral solutions. Data centers can be considered as the brain of our information society as they process most of the information that our society holds and uses. The existence of data centers is therefore imperative for the existence of modern information systems and information technologies. The location of data in data centers benefits society and provides servers for organizations and everyday users alike. However, data centralization also has negative consequences. Data centers consume large amounts of electricity and the carbon dioxide emissions they generate have risen to the same level as those from aviation. Heat emissions will also increase if they are not managed more effectively. Green IT offers solutions to the environmental problems caused by IT, in this case data centers. The aim of the thesis is therefore to use a literature review to explore data center operations, green IT and how combining the two could enhance data center operations towards carbon neutrality. It is concluded in the thesis that the carbon neutrality of data centers is influenced by four main factors: 1) The use of modern and efficient IT equipment, which can significantly reduce energy consumption in data centers 2) The energy efficiency of secondary equipment, especially the cooling system 3) The management of computing, which aims to reduce energy loss from idle equipment through efficient workload consolidation and 4) The integration of energy systems for heat and demand response management, which offers the potential for significant energy efficiency gains. Thus, it can be argued that implementing green IT in a data center environment significantly reduces emissions while increasing cost-effectiveness. Increased efficiency of data centers can therefore lead to significant environmental savings at the scale of our global information society. The review concludes with a reflective summary on improving data center functionality, new approaches, and the need for further research in the ever-changing data center sector.

Keywords: data center, green IT, carbon neutral

KUVIOT

KUVIO 1 Maailmanlaajuisesti luodun tiedonmäärän kasvu.....	9
KUVIO 2 Tulevien teknologioiden hypesykli.....	14
KUVIO 3 Googlen datakeskusten PUE-tehokkuus.....	18

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

KUVIOT

1	JOHDANTO.....	6
2	DATAKESKUKSET.....	8
	2.1 Datakeskusten tarve	9
	2.2 Datakeskustyypit	10
	2.3 Pilviteknologia vai perinteinen datakeskus.....	11
3	VIHREÄ IT ORGANISAATIOSSA	13
	3.1 Vihreän IT:n määritelmä.....	13
	3.2 Vihreä IT liiketoimintastrategiana	14
	3.3 Vihreä IT-politiikka	15
4	VIHREÄ IT DATAKESKUSYMPÄRISTÖSSÄ.....	17
	4.1 Datakeskusten energiatehokkuus	17
	4.2 Datakeskusten energiakulutuksen ennustaminen.....	20
	4.3 Edistyksellinen jäähdytys.....	20
	4.4 Pohjoismaiden potentiaali datakeskusten sijaintina.....	21
	4.5 Tavoitteena hiilineutraali datakeskus ja Pue arvo 1	22
5	YHTEENVETO	25
	LÄHTEET	28

1 JOHDANTO

Vihreä IT on käsite, joka viittaa tietotekniikan kestäväan ja ympäristöystävälliseen käyttöön. Datakeskukset ovat merkittävä osa tietotekniikan infrastruktuuria, ja niissä tapahtuu valtava määrä tietojen tallennusta, prosessointia ja siirtoa. Tämän vuoksi datakeskusten energiatehokkuus on tärkeä osa vihreää IT:tä (Murugesan & Gangadharan, 2012). Perinteisesti datakeskukset ovat olleet erittäin energiakuluttavia, ja niiden ylläpitoon liittyvät kustannukset ovat olleet merkittäviä (Murugesan & Gangadharan, 2012).

Vihreä IT pyrkii vähentämään datakeskusten energiankulutusta ja päästöjä, jotta niiden ylläpitokustannukset olisivat kestävämmällä tasolla. Vihreän IT:n avulla datakeskusten energiankulutusta voidaan parantaa monin tavoin. Esimerkiksi käyttämällä energiatehokkaita laitteita, optimoimalla jäähdytysjärjestelmät, uusiokäyttämällä hukkaenergia ja hyödyntämällä uusiutuvaa energiaa (Murugesan & Gangadharan, 2012). Näiden toimenpiteiden avulla datakeskusten toimintaa on mahdollista tehostaa. Ympäristöystävällisempi datakeskus ei ole vain hyvä ympäristölle, vaan se voi myös tuoda merkittäviä säästöjä yrityksille, jotka käyttävät niitä (Murugesan & Gangadharan, 2012). Vihreä IT on siis kestävä kehityksen kannalta tärkeä tekijä tietotekniikan alalla, ja sen merkitys kasvaa jatkuvasti ICT-laitteiden sekä ympäristötietoisuuden lisääntyessä.

Tässä tutkielmassa pyritään löytämään tutkimusperustaisia toimintatapoja datakeskusten ympäristöystävällisyyden lisäämiseen. Tutkimuksessa toimia pyritään myös mallintamaan kokonaisuutena, jota noudattamalla voitaisiin saavuttaa hiilineutraali datakeskus osaksi tietoyhteiskuntamme toimintoja. Tutkimuskysymys on muotoiltu seuraavasti:

- Millaisilla toimilla voidaan edistää datakeskusten hiilineutraaliutta?

Tutkielmassa rakennetaan myös ymmärrystä datakeskuksista sekä vihreästä IT:stä, sillä käsitteiden ymmärtäminen on ensiarvoisen tärkeää kokonaiskuvan hahmottamisessa. Vihreän IT:n implementointiprosessin ymmärtäminen datakeskusympäristössä vaatii tietämystä datakeskusten ja vihreän IT:n rajoituksista ja mahdollisuuksista. Synteesiä näiden kahden aiheen välille pyritään luomaan aiempaan kirjallisuuteen perustuen. Tutkielmassa pyritään selkeyttämään jo luotuja ratkaisuja, ja yhdistämään niitä virtaviivaiseksi toimintamalliksi, jonka avulla tulevaisuuden datakeskuksista voitaisiin tehdä hiilineutraaleja.

Tämä tutkielma on toteutettu kirjallisuuskatsauksena. Tutkielmassa hyödynnetty aineisto on haettu tieteellisten julkaisujen hakukoneita hyödyntäen, kuten Google Scholaria ja Jyväskylän Yliopiston JYKDOK-tietokantaa. Aineistonhakemiseen käytettyjä keskeisiä hakusanoja olivat "Datakeskus", "Vihreä IT", "Hiilineutraali" sekä näiden yhdistelmiä suomen ja englannin kielellä. Lähdemateriaalien valinnassa tutustuttiin ensin teoksen johdantoon ja sen perusteella harkittiin vastaako lähde käsiteltävää aihetta. Lähteiden luotettavuutta arvioitiin vertaisarvioinnin, julkaisupäivän sekä viittaussääntöjen kautta.

Tutkielman tuloksena selviää, että datakeskusten ympäristöystävällisyyttä voidaan lisätä noudattamalla tutkielmassa esiteltävää neliportaista lähestymistapaa. Tämä toimintamalli pureutuu datakeskusten ympäristöystävällisen toiminnan kannalta neljään kriittiseen ulottuvuuteen: modernit IT-laitteet, toissijaisen laitteiston energiatehokkuus, laskennan hallinta ja energiajärjestelmän integrointi. Toimintamallin avulla ympäristötoimet voidaankin esittää käytännönläheisellä tasolla, mahdollistaen aiheen käsittelyn eri-ikäisten datakeskusten näkökulmasta.

Tutkielmassa johdantoa seuraa kolme varsinaista sisältölokua, joista ensimmäisessä (luku kaksi) käsitellään datakeskuksia, niiden määritelmää, tarvetta, teknologiaa ja tyyppejä. Kolmas luku käsittelee vihreän IT:n määritelmää, sen hyödyntämistä liiketoiminta strategiana ja sitä koskevaa politiikkaa. Luvussa perehdytään myös vihreän IT:n ajankohtaisuuteen. Neljännessä luvussa luodaan synteesi vihreän IT:n ja datakeskusten välille. Luvussa käsitellään edistyksellistä jäähdytystä, pohjoismaiden potentiaalia datakeskuksen sijaintina ja ratkaisuja, joiden avulla voidaan edetä kohti hiilineutraaleja datakeskuksia. Viides luku on yhteenveto, jossa tutkielman tuloksia vedetään yhteen. Yhteenvetoluku sisältää myös aiheen pohdintaa IT-alan näkökulmasta sekä jatkotutkimus mahdollisuuksista.

2 DATAKESKUKSET

Datakeskuksen määritelmä on laaja, eikä sen määritelmästä olla täysin yhteisymmärryksessä. Yhteisesti hyväksytty määritelmä kuitenkin on se, että datakeskus sisältää useita tietokoneita ja niiden oheisjärjestelmiä, jotka tallentavat, käsittelevät ja lähettävät suuria määriä dataa. Datakeskus on valtava laitos, johon on kerätty suuri määrä prosessointitehoa tukemaan erilaisia tarpeita. Tällaisia tarpeita ovat esimerkiksi verkkokauppojen ja terveydenhuollon nettipalveluiden hyödyntämä data (Wu & Buyya, 2015). Nyky-yhteiskunta ei siis toimisi, mikäli datakeskuksia ei olisi.

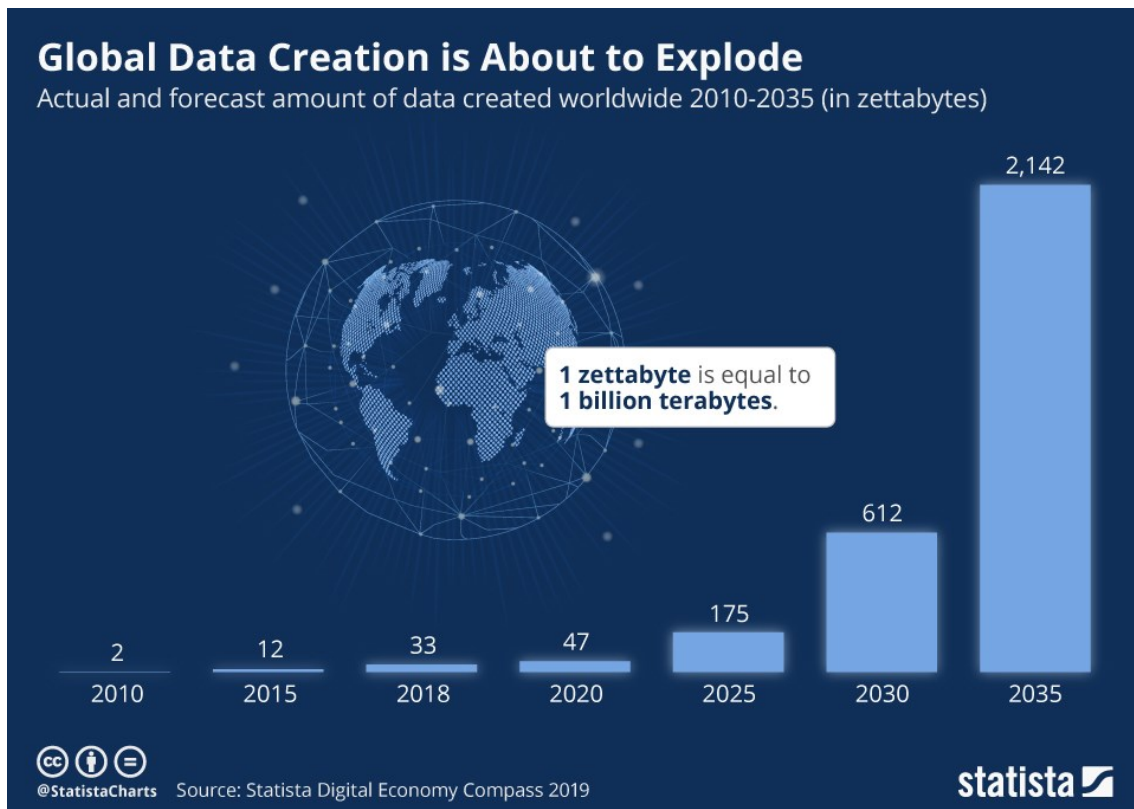
Datakeskukset sisältävät ensisijaisia elektronisia laitteita ja toissijaisia elektronisia laitteita. Ensisijaiset elektroniset laitteet vastaavat tiedonkäsittelystä (palvelimet), tallentamisesta (tallennuslaitteet) ja tietoliikenteestä (verkkolaitteet). Datakeskuksen toissijaiset elektroniset laitteet vastaavat keskuksen luotettavasta virran saannista (varalaitteet) ja ICT-laitteille oikean lämpötilan sekä ilmastoiden ylläpitämisestä (ympäristönvalvontalaitteet) (Geng, 2015). Datakeskuksissa käytetään kustomoituja generaattoreita vakaan varavirran tuottamiseen sekä kustomoituja ilmanvaihtoratkaisuja keskuksen lämpötilan hallintaan. Datakeskuksissa hukkalämmön keräämiseen on myös omat oheislaitteet (Geng, 2015). Vaikka datakeskuksia onkin erikokoisia ja -tyyppisiä, palvelevat ne yhtä yhteistä tavoitetta, joka on käsitellä dataa. Datakeskuksista käytetään myös nimiä kone-sali, serverihuone ja palvelinkeskus (Geng, 2015).

Datakeskuksen rakennusvaiheessa tulee ottaa huomioon keskuksen jäähdytys, keskuksen tyypistä huolimatta. Jäähdytykseen liittyen on tärkeää huomioida keskuksen sijainti, sillä vallitsevilla sääoloilla on merkittävä vaikutus keskuksen jäähdytysmahdollisuuksiin. Datakeskuksen energiankulutusta ja energiakustannuksia voidaan hillitä tulevaisuudessa hyvällä suunnittelulla sekä tehokkaampien jäähdytysratkaisuiden avulla. (Geng, 2015)

2.1 Datakeskusten tarve

Yhteiskuntamme ylläpitämiseen tarvittavaa tietoa on valtava määrä ja voidaan todeta, että tiedon määrä kasvaa joka vuosi lisää. Hallittavan tiedon määrä on kasvanut merkittävästi erilaisten uusien teknologioiden synnyn seurauksena, kuten esineiden internet (engl. *Internet of Things*). Tämän kasvun seurauksena on tarvetta kasvattaa myös tietoa prosessoivien datakeskusten määrää. Voidaan myös todeta, että tämän kehityksen suunta ei tule laskemaan vaan ennemminkin kasvamaan eksponentiaalisesti (Armstrong, 2019).

Statista on antanut asiantuntijoiden arvioihin perustuvia, suuntaa antavia lukuja vuoden 2018 tiedon määrästä, sekä globaalin tiedon määrän kasvusta. Statistan ennuste arvioi tiedon määrän kasvavan yli 500 prosenttia vuoteen 2025 asti ja jatkavan kasvua vuoteen 2035 asti, ylittäen alkuperäisen tiedon määrän 6400 prosentilla. Samanlaiseen arvioon on päätyttyä myös Ciscon Global Cloud Index, joka ennustaa datakeskusten tietoliikenteen kasvun nousevan vuosittain 25 prosenttia (Cisco, 2020). Tähän pohjautuen Cisco siis toteaa datakeskusten tietoliikenteen kasvavan noin kolminkertaiseksi joka viides vuosi. Kuvio 1 havainnollistaa ennusteiden mukaista tiedon kasvua.



KUVIO 1 Maailmanlaajuisesti luodun tiedon määrä 2010–2018 ja ennustettu kasvu 2020–2035 (Armstrong, 2019).

Datakeskusten ollessa tieto- ja viestintäteknologian pääkomponentti on itsestään selvää, että internetin käytön kasvun myötä myös datakeskusten määrää ja tehoa tulee lisätä järjestelmän ylläpitämiseksi. Datakeskusten tärkeimpinä tehtävinä on tarjota internetin tarvitsemat keskeiset toiminnot (Laurent ym., 2020). Keskukset varastoivat, suojaavat ja käsittelevät tietoa. Alan kasvaessa valtavaa vauhtia on myös datakeskusten käsite muuttunut pienistä serverihuoneista suuriksi datakeskuksiksi. Suuremmassa rakennuksessa voidaan tuottaa enemmän laskentatehoa, jolla pyritään vastaamaan eksponentiaalisesti kasvavaan internet-palveluiden kysyntään (Laurent ym., 2020).

2.2 Datakeskustyyppit

Tukkutason palveluntarjoajat ovat huomanneet, että datakeskusten vaiheittain rakentaminen on kustannus- ja energiatehokkaampaa. Tämä onkin johtanut siihen, että monet palveluntarjoajat ovat siirtyneet kehittämään niin sanottuja modulaarisia datakeskuksia (Crosby & Curtis, 2015). Käsite modulaarinen datakeskus on otettu laajasti käyttöön, mutta kyseisen käsitteen määritelmää ei ole kuitenkaan yleisesti hyväksytty. Tällä hetkellä markkinoilla olevia modulaarisia datakeskuksia voidaan jakaa viiteen eri tyyppiin. Nämä tyypit ovat: perinteinen, monoliittinen, monoliittinen modulaari, kontti ja itsenäinen datakeskus (Crosby & Curtis, 2015). Seuraavaksi avataan kaikki nämä datakeskustyyppit.

Perinteiset datakeskukset perustuvat rakennuspohjaisiin ratkaisuihin, joissa hyödynnetään koko tilan yhteisiä, sisäisiä tai ulkoisia, laitteistoja ja taustalevyjä (Crosby & Curtis, 2015). Yhteisiä hyödynnettäviä laitteistoja voivat olla esimerkiksi jäähdytysvesilaitokset tai rinnakkaisgeneraattorilaitokset. Perinteiset datakeskukset voidaan rakentaa joko kerralla täyteen kapasiteettiinsa tai vaihtoehtoisesti vaiheittain. Vaiheittainen rakentaminen on yleistynyt käytäntö uusissa datakeskuksissa. Datakeskuksia laajennetaan vaiheittain lisäämällä rakennukseen uusia konesaleja. Mikäli datakeskuksessa hyödynnetään aiemmin mainittua yhteistä taustalevyä tai taustalevyjärjestelmää, on mahdollista, että pienenkin teknisen ongelman ilmentyessä koko järjestelmä pysähtyy. Mikäli datakeskus rakennetaan vaiheittain, törmätään järjestelmän testaamisessa haasteeseen. Kun osa järjestelmästä on jo ajossa, on mahdotonta testata koko järjestelmän toimivuutta yksittäin sekä yhdessä täyden kuorman alla. (Crosby & Curtis, 2015)

Monoliittinen datakeskus on myös rakennuspohjainen ratkaisu, kuten perinteinenkin datakeskus. Monoliittiset datahallit ovat tyypillisesti suuriin rakennuksiin rakennettuja massiivisia järjestelmiä, jotka voivat tarjota jo ensimmäisenä päivänä yli 5 MW tehoa. Näissä suurissa datahalleissa on yleisesti kapasiteettia 5–20 MW teholle (Crosby & Curtis, 2015). Monoliittiset datahallit eroavat perinteisistä datakeskuksista edukseen niiden segmentoitvien taustalevyjen ansiosta. Segmentoivilla taustalevyillä saavutetaan toimintavarmuutta, sillä yksittäinen vikapiste ei altista koko järjestelmää käyttökatkolle. Segmentoivat taustalevyt mahdollistavat myös jokaisen konesalin käyttöönoton tason 5 mukaisesti ennen asiakkaan käyttöönottoa. Monoliittisessa datahallissa ainoana yhteisenä

komponenttina toimii yleensä keskijänniteverkko. Suurissa datahalleissa on yleensä useita käyttäjiä, ja ne sopivat parhaiten asiakkaille, joilla on tiedossa tarkka IT kapasiteettinsa tarve myös tulevaisuudessa. (Crosby & Curtis, 2015)

Monoliittiset tehdasvalmisteiset konesalit ovat rakennuspohjaisia ratkaisuja. Nämä konesalit tavallisista monoliittisista datakeskuksista poiketen täyttävät palveluntarjoajan esivalmistetuilla konesaleilla. Monoliittisiä tehdasvalmisteisiä datakeskuksia hyödynnetään silloin kun asiakkaalla on tiedossa tarkasti tarvitsemansa kapasiteetti, sillä räkkitila suunnitellaan tarkasti tarvittavalle kuormitukselle (Crosby & Curtis, 2015). Tehdasvalmisteisessa datakeskuksessa matalan kuormituksen ryhmät ja korkean kuormituksen ryhmät jaotellaan omiksi tiloikseen, jolloin vältytään tietotekniikkakapasiteetin ylikuormittumiselta. Molemmista tiloissa voidaan käyttää segmentoituja tai jaettuja taustalevyarkkitehtuureja. Tehdasvalmisteisissa monoliittisissa ratkaisuisissa kuten tavallisissakin monoliittisissa vaaditaan asiakkaan vuokraavan ja maksavan tarvitsemansa tilan etukäteen. (Crosby & Curtis, 2015)

Konttidatakeskuksen pohjaratkaisu eroaa huomattavasti aiemmista rakennuspohjaisista ratkaisuisista. Konttidatakeskukset ovat tehdasvalmisteisiä kuljetuskontteihin rakennettuja järjestelmiä (Crosby & Curtis, 2015). Nämä järjestelmät ovat erittäin mobiileja, ja niiden toimittaminen onnistuu nopealla aikataululla vaativimmillekin alueille. Konttidatakeskusten nopea käyttöönotto vaatii kuitenkin jo olemassa olevia ulkoisia laitteistoja, kuten generaattoreita. Parhaimmillaan nämä konttiratkaisut ovat väliaikaisina konesaleina, jotka toimivat muutamissa sadoissa KW-kuormitusryhmissä. (Crosby & Curtis, 2015)

Viimeisenä mainittavana datakeskus tyyppinä on itsenäiset datakeskukset. Itsenäisissä datakeskuksissa hyödynnetään modulaarista arkkitehtuuria. Itsenäiset datakeskukset on suunniteltu kokonaisratkaisuisiksi, jotka täyttävät luotettavuutta ja rakennuksen tehokkuutta koskevat sertifiointistandardit (Crosby & Curtis, 2015). Itsenäiset konesalit ovat rakennettu karkaistuun kuoreen, joka voidaan sijoittaa joustavasti haastaviin maantieteellisiin sijainteihin. Itsenäiset datakeskukset eroavat siis huomattavasti rakennuspohjaisista sekä modulaarisista ratkaisuisista. Asiakkaiden ei tarvitse myöskään tietää tarkasti etukäteen, kuinka paljon he tarvitsevat kapasiteettia, sillä yksiköitä on helppo lisätä tarpeen mukaan. Itsenäiset datakeskukset ovat optimaalisia noin 1–4 MW ja ajan myötä kasvavaan kulutukseen, ja ne ovat parhaimmillaan haastavissa maantieteellisissä olosuhteissa. (Crosby & Curtis, 2015)

2.3 Pilviteknologia vai perinteinen datakeskus

Termit perinteinen datakeskus ja pilvidatakeskus eroavat toisistaan omistajuuden perusteella. Perinteinen datakeskus on yrityksen sisäinen laitos, kun taas pilvidatakeskus on tyypillisesti yrityksen ulkopuoleinen palveluntarjoaja (Saha ym., 2016). Pilviratkaisut on tyypillisesti luokiteltu kolmeen kategoriaan omistajuuden mukaan; julkinen, yksityinen ja hybridi (Microsoft 2023).

Microsoft avaa Azure-pilvipalvelualustansa esittelyn yhteydessä erilaisia pilvipalveluiden muotoja. Julkinen pilvi on yrityksen ulkopuolisen tahon omistama (Microsoft 2023). Julkisen pilven käyttäjillä on pääsy pilven resursseihin internetyhteyden kautta. Palvelun käyttäjiä ovat usean eri tahon henkilöt, jotka jakavat pilvessä olevat resurssit. Palvelua ei siis ole kohdennettu yksityisten asiakkaiden tarpeisiin, mikä vähentää kustannuksia, monimutkaisuutta ja huoltotarvetta (Microsoft, 2023).

Yksityinen pilvi on täysin yhden yrityksen tarpeita varten suunniteltu kokonaisuus. Asiakasyritys voi jopa vaatia datakeskuksen ylläpitoa ilman kolmatta osapuolta, mikä tarkoittaa, että datakeskus on yrityksen oma. Yksityisessä pilvessä asiakasyrityksellä on korkeampi itsemääräämisoikeus kuin julkisessa pilvessä (Microsoft, 2023). Tietoturva on korkeampi ja keskus voidaan suunnitella täydellisesti yrityksen tarpeisiin yksityisen pilven avulla. Tämän ansiosta datakeskus pystyy tarjoamaan nopeamman ja luotettavamman tietojen hallintajärjestelmän. Pilven yksityisyys toki lisää runsaasti kustannuksia, ja sen hallinta kulluttaa myös lisää resursseja (Microsoft, 2023).

Hybridimalli on kahden aiemmin esitellyn mallin välimaasto, joka sisältää siis niin julkisen kuin yksityisen pilven ominaisuuksia. Yritys voi hybridipilven avulla tallentaa arkaluotoista tietoa yksityiselle datakeskuspuolelle ja muun datan yleiselle puolelle. Yritys voi näin hyötyä molempien ratkaisuiden eduista (Microsoft, 2023).

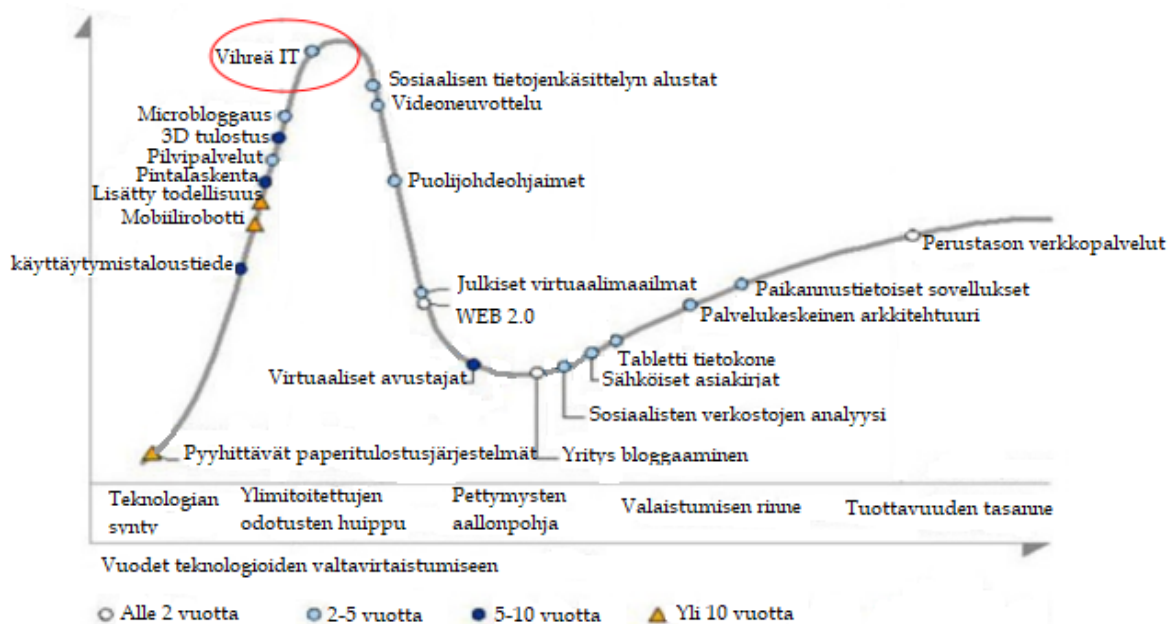
3 VIHREÄ IT ORGANISAATIOSSA

Ilmaston lämpenemisen myötä, ihmiskunta on havahtunut hiilidioksidipäästöjen haittoihin. Rajojen ylittäväksi tavoitteeksi onkin asetettu hiilidioksidipäästöjen vähentäminen. Useimmat taloudet ovat tänä päivänä palvelupohjaisia ja riippuvaisia tieto- ja viestintäteknikasta (Bitterlin, 2012). Tämän riippuvuuden myötä tietotekniikan rooli tulevaisuuden ongelmien luojana ja niiden ratkaisijana on korostunut. Tietotekniikan alan ollessa vastuussa vain noin 2 % maailmanlaajuisesta hiilidioksidipäästöstä (Jones 2018), ovat katseet kääntyneet tietotekniikan alan mahdollisuuteen vähentää epäsuorasti muiden alojen hiilidioksidipäästöjä. Informaatioteknologian ala pyrkii vähentämään omaa osuuttaan hiilidioksidipäästöistä vihreämpien tuotteiden avulla, mutta vihreä IT nähdään kuitenkin tätä laajempänä prosessina (Bitterlin, 2012). Tässä luvussa määritellään ensin vihreä IT, sitten liitetään vihreä IT osaksi liiketoimintastrategiaa ja lopuksi tutkitaan vihreää IT-politiikkaa.

3.1 Vihreän IT:n määritelmä

Vihreän IT:n idean katsotaan olevan lähtöisin vuonna 1992 Yhdysvaltain luonnonsuojelujärjestön käynnistämästä Energy Star -ohjelmasta. Vihreä IT on laajakäsite, eikä sille ole yksiselitteistä määritelmää. Vihreä IT sisältää strategisia ja taktisia lähestymistapoja organisaation hiilijalanjäljen vähentämiseksi tietotekniikan osalta (O'Neill, 2010). Vihreä IT nähdään tapana lunastaa yhteiskunnan asettamat ympäristöystävällisyys tavoitteet tietotekniikan osalta (Bitterlin, 2012). Voidaan todeta, että vihreän IT:n tavoite on lisätä informaatiotekniikan ympäristöystävällisyyttä moninaisin keinoin. Vihreä IT pyrkii vihreämmän teknologian soveltamisen lisäksi vähentämään muiden toimialojen hiilidioksidipäästöjä erilaisten tietotekniikan palveluiden avulla, kuten optimoimisen ja puhtaamman energian. Vihreä IT termi käsittää myös vihreän tietoisuuden levittämisen, niin työntekijöitä, kuin myös koko tuotantoketjua kouluttamalla vihreämmistä ratkaisuista. Vihreä IT saattaa toimia myös perustana säädöksille, jotka muovaavat

koko organisaation toimintaa (O'Neill, 2010). Vihreä IT on saanut aikaan keskustelua monissa lehdissä sekä organisaatioissa. Gartner, Inc. julkaisemassa "Hype cycle for emerging technologies, 2008" -listassa käsitellään 27 erilaista teknologiaa, jotka ovat niin sanotusti "hypeettyjä" teknologioita. Vihreä IT sijoittuu korkealle kyseisessä listauksessa (Kuvio 2).



KUVIO 2. Tulevien teknologioiden hype-kieli (Gartner inc, 2008).

3.2 Vihreä IT liiketoimintastrategiana

Organisaatioiden toiminta on kasvavassa määrin riippuvainen teknologiasta. Tämän takia organisaatioiden kannattaa ottaa huomioon mahdollisuudet vähentää teknologiasta johtuvia kuluja. Vihreän IT:n käyttöönotolla organisaation on mahdollista säästää erilaisia resursseja, kuten rahaa ja aikaa samalla tehden organisaation toiminnasta energiatehokkaampaa (Akano & Campbell, 2014). Vihreän IT:n implementointi organisaation toimintaan saattaa kuitenkin tuottaa haasteita energiatehokkaaseen teknologian käyttöönottoon, turvallisuuteen liittyviin ongelmakohtiin sekä suurina innovointikustannuksina, mikä voi johtaa epävarmuuteen muutosta kohtaan (Khan & Khan, 2013).

Teknologian avulla organisaatiot muuttavat toimistojaan energiatehokkaammiksi. Esimerkiksi arkistojen muuttaminen sähköisiksi perinteisten paperiarkistojen sijaan, lisää toimistojen energiatehokkuutta. Useat organisaatiot ovat panostaneet web-konferensseihin, mahdollistaakseen työn tekemisen useista sijainneista. Tavoitteena tässä muutoksessa on ollut vähentää työmatkoihin kuluvia resursseja (Bitterlin, 2012). Näitä muutosta voidaan kutsua vihreän IT:n saavuttamiksi positiivisiksi vaikutuksiksi ympäristölle.

Palvelinkeskusten yleistyminen on auttanut organisaatioita vähentämään laitteiston määrää erityisesti palvelimien kohdalla. Tähän muutokseen on ensisijaisesti vaikuttanut pilvipalveluiden käyttöönotto. Keskitettyjen palvelimien energiankäyttöä on huomattavasti helpompi hallita kuin useiden erillisten palvelinhuoneiden (Akano & Campbell, 2014). Palvelinkeskusten hyödyntäminen mahdollistaa organisaatioiden tehokkaamman skaalautumisen, kun uusille toimipisteille ei tarvitse rakentaa serverihuoneita. Organisaation on siis kustannustehokkaampaa avata uusia toimipisteitä uusiin kaupunkeihin (Bitterlin, 2012).

3.3 Vihreä IT-politiikka

Vihreän IT-politiikan luominen on kannattavaa organisaatiolle niin rahallisesti, kuin myös ympäristötavoitteiden saavuttamisen varmistamiseksi (O'Neill, 2010). Ympäristöystävällisen näkökulman ollessa ajankohtainen on sopiva hetki liittää vihreä IT-politiikka osaksi organisaation strategiaa alasta riippumatta. Ympäristönäkökulman lisäksi organisaatioiden on vähennettävä käyttökustannuksiaan, täytettävä hiilidioksidipäästöjen vähentämistavoitteet ja torjuttava huonoa julkisuutta ympäristön saastuttamisesta. Vihreä IT-politiikka pyrkii vähentämään organisaation hiilijalanjälkeä (O'Neill, 2010). Tämä puolestaan kannustaa valmistajia lisäämään tuotteidensa ympäristöystävällisyyttä, joka puolestaan laskee koko tuotantoketjun hiilijalanjälkeä.

Vihreä IT-politiikka selittää työntekijöille, toimittajille, asiakkaille ja käyttäjille organisaation ympäristöarvot IT:hen liittyen. Vihreän IT-politiikan tulee olla linjassa organisaation muiden ympäristö strategioiden kanssa, jotta se olisi mahdollisimman uskottava. Vihreän IT-politiikan luominen ei välttämättä ole yksinkertaista tilanteessa, jossa organisaatiolla on taloudellisia haasteita. Vihreä IT-politiikka kannattaa organisaation sisällä linkittää osaksi rahan säästötoimenpiteitä (O'Neill, 2010). Vihreän IT-politiikan avulla organisaation on mahdollista säästää resursseja, hiilidioksidipäästöjä, sekä varmistaa ympäristösäädösten rajoissa toimiminen. Jatkuvasti tiukentuvien hiilidioksidipäästösäädösten rikkomisesta voi olla sanktiona sakkoja, jotka voitaisiin välttää noudattamalla vihreää IT-politiikkaa (O'Neill, 2010).

Vihreän IT-politiikan luomisessa on tärkeää havaita kolme vaihetta. Ensimmäinen vaihe on vakuuttaa organisaation johtajat ja osakkaat siitä, että politiikan avulla on mahdollista saavuttaa taloudellisia säästöjä, vähentää ympäristövaikutusta ja parantaa organisaation mainetta kohtuullisella aikavälillä (O'Neill, 2010). Toinen vaihe on vihreän IT-politiikan käyttöönottosuunnitelma. Käyttöönottosuunnitelman ensimmäisten askelten kannattaa olla mahdollisimman kustannustehokkaita. Tämä tarkoittaa sitä, että vihreä IT-politiikka voidaan aloittaa esimerkiksi ympäristötietämys kampanjalla, jossa ohjeistetaan työntekijöitä sulkemaan kaikki IT-laitteensa yön ajaksi. Tavoitteena on siis vakuuttaa päättäjät vihreän IT-politiikan toimivuudesta, luomalla näkyviä säästöjä organisaatiolle vähillä resursseilla. Yksinkertaisista ja kustannustehokkaista muutoksista siirrytään askel askeleelta kohti pidempi aikaisempia ja enemmän resursseja vaativia

toimia, kuten servereiden virtualisointi (O'Neill, 2010). Kolmas vaihe on nimittää vihreästä IT-politiikasta vastaava henkilö, joka suhtautuu aloitteeseen intohimoisesti. Tämän henkilön tehtävä on esitellä aloitetta johtokuntatasolla ja vakuuttaa päättäjät vihreän IT-politiikan kannattavuudesta. Vihreä IT-politiikka saattaa vaikuttaa organisaation kaikkiin tasoihin, tehdastiloista johtoryhmän kokouksiin, joten vastuuvollisuuden tulee olla johtoryhmällä (O'Neill, 2010). Johtoryhmän on tärkeää lähettää selkeä viesti organisaation sisäisesti siitä, että vihreä IT-politiikka on osa yritysstrategiaa ja että siihen suhtaudutaan vakavasti.

Vihreän IT-politiikan vaikutukset leviävät myös organisaation ulkopuolelle (O'Neill, 2010). Poliitiikka rohkaisee työntekijöitä vaatimaan toimittajilta ja yhteistyökumppaneilta ympäristöystävällisempiä ratkaisuja. Tämä näyttäytyy esimerkiksi paremmin suunniteltuina laitteina, joita on mahdollista korjata uusimisen sijaan. Muutos on nähtävissä konkreettisesti esimerkiksi matkapuhelin valmistajien suostuessa tarjoamaan yleisiä latureja mallikohtaisten sijaan, joka vähentää elektroniikka romua. (O'Neill, 2010).

Euroopan unioni on määritellyt useita energiatehokkuutta ja tietotekniikan kehitystä edistäviä IT-politiikkoja hyödynnettäväksi alueellaan. Poliitiikkojen takana on Euroopan unionin sitoumus digitalisaation, internet-yhteyksien ja ICT-teollisuuden kasvun edistämiseen (Koronen ym., 2020). Osana Euroopan unionin vihreää IT-politiikkaa on datakeskusten yhdistäminen energijärjestelmiin kestäväällä tavalla. Euroopan unionin vihreän IT:n kärkenä voidaan pitää vuonna 2020 voimaan astunutta Ecodesign-direktiiviä. Direktiivissä määritellään vähimmäistehokkuusvaatimukset Euroopan markkinoille sallituille tuotteille. Direktiivissä on määritelty datakeskusten palvelimien ja tallennuslaitteiden komponenteille, sekä tyhjäkäyntiteholle tiettyjä raja-arvoja ja materiaalitehokkuusvaatimuksia (Koronen ym., 2020). Direktiivillä tavoitellaan myös energiatehokkuuden läpinäkyvyyttä, sillä se velvoittaa valmistajat luovuttamaan tietoja laitteiden energiatehokkuudesta. Osana Euroopan unionin vihreää IT-politiikkaa on energiatehokkuutta edistävien tutkimusten rahoittaminen Horizon 2020-ohjelman muodossa. Horizon hankkeessa merkittävään rooliin on nostettu datakeskusten energiatehokkuuden lisääminen ja datakeskusten integroiminen energijärjestelmiin (European Commission 2019). Kehitystä pyritään saavuttamaan innovatiivisilla jäähdytysratkaisuilla, hukkalämmön hyödyntämisellä, maatienteellistä ja ajallista työmäärää tasapainottamalla, uusiutuvia energialähteitä integroimalla, liittämällä datakeskukset kaukolämmitysverkkoon ja liittämällä datakeskusten varmuuskäyttöjärjestelmät verkkoon (Koronen ym., 2020). Euroopan unionin säätämät vihreät IT-politiikat vaativat ajoittaista päivittämistä sillä, nopeasti kehittyvä teknologia muovaa toimintakenttää. On myös tärkeää huomata, että Euroopan unionin säädösten mukaisen toiminnan valvominen on jäsenvaltioiden vastuulla.

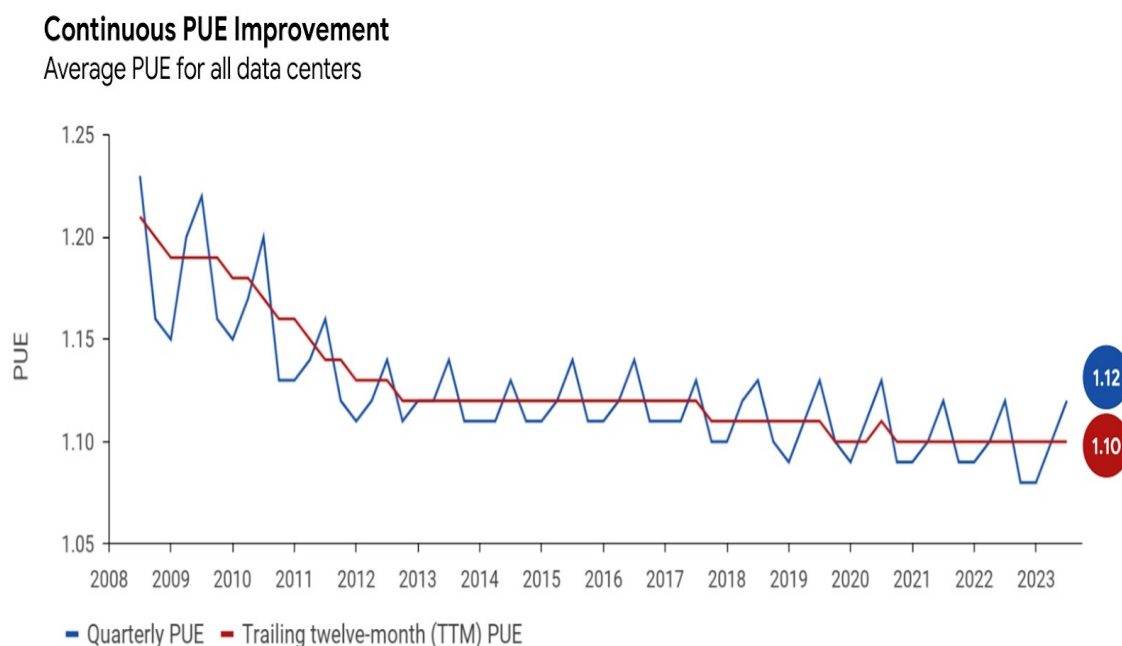
4 VIHREÄ IT DATAKESKUSYMPÄRISTÖSSÄ

Maailman tieto- ja viestintäteknikka-ala aiheuttaa noin kaksi prosenttia maailman hiilidioksidipäästöistä, mikä vastaa lentoliikenteen hiilidioksidipäästöjä (Murugesan & Gangadharan, 2012). On arvioitu, että datamäärät kasvavat 500 % vuoteen 2025 mennessä ja yli 6400 % vuoteen 2035 mennessä (Armstrong, 2019). Näiden muuttujien välillä on looginen yhteys. Tietomäärien kasvu lisää datakeskusten määrän ja tehokkuuden kasvua. Lisääntyneeseen kysyntään vastataan lisääntyneellä tuotannolla, mikä puolestaan nostaa tuotannon energiakustannuksia. Aikaisempien tulosten perusteella voidaan todeta, että ellei datakeskusten toimintamallia muuteta nykyisestä, hiilidioksidipäästöt kasvavat. Tässä luvussa käsitellään edistyksellisiä ratkaisuja datakeskusten jäähdytyksessä ja pohjoismaiden viileän ilmaston implementointia osana energiatehokasta jäähdytystä. Datakeskusten jäähdytyksen tehostaminen ympäristöystävällisesti nousee esille uusissa uusissa tutkimuksissa, jäähdytyksestä aiheutuvan merkittävän energiankulutuksen vuoksi. Datakeskuksen jäähdytyksen ja sijainnin lisäksi luvussa käsitellään energiakulutuksen optimointia, energiankulutuksen ennakoimista sekä uusiutuvan energian tärkeyttä hiilineutraaleissa datakeskuksissa. Uusiutuvan energian hyödyntäminen datakeskusten energianlähteenä on välttämätöntä hiilineutraaliuuden saavuttamiseksi. Lopulta esitellään malli, joka sisältää nämä askeleet kohti hiilineutraaleita datakeskuksia.

4.1 Datakeskusten energiatehokkuus

Datakeskusten kasvattaessa kokoa pienistä serverihuoneista valtaviksi laitoksiksi ovat niiden käyttämät energiaresurssit myös kasvaneet. Datakeskusten sisällä suurimpia energiasyöppöjä ovat palvelimet sekä IT-laitteet (Song ym., 2015). Jones (2018) arvioi ICT-alan olevan vastuussa noin 2 % maailman hiilidioksidipäästöistä. Datakeskukset sen sijaan vastaavat Jonesin mukaan noin 0,3

prosentista maailman hiilidioksidipäästöistä (Jones, 2018). Datakeskusten vastassa suhteellisen suuresta määrästä sähkönkulutusta, on syytä tutkia niiden energiatehokkuutta. Energianhallinnalla pyritään vähentämään kaikkia energiaan liittyviä kustannuksia, mukaan lukien pääoma- ja käyttökustannukset, sekä ympäristövaikutukset (Barroso, 2022). Datakeskusten energiatehokkuus määritellään mittaamalla käytetty energia tietyin työmäärän suorittamiseen. Datakeskusten energiatehokkuuden vertailemiseen on kehitetty energiatehokkuuden mittari PUE (Power usage effectiveness). PUE-arvo kuvaa datakeskuksen kokonaistehon suhdetta IT-tehoon. IT-teho sisältää laskenta-, verkko- ja muiden IT-laitteiden kuluttaman tehon (Barroso, 2022). Esimerkiksi PUE-arvon ollessa 3,0 kuluttaa datakeskuksen mekaaniset ja sähköiset järjestelmät kaksi kertaa enemmän virtaa, kuin todellinen laskentakuorma. Lähellä 1,0 oleva PUE-arvo tarkoittaa, että lähes kaikki energia kulutetaan tietojenkäsittelyyn (Google, 2024). Useat suuret operaattorit kuten Google, Microsoft, Amazon ja eBay ovat raportoineet viime vuosina erinomaisia PUE-arvoja datakeskuksistaan, jotka ovat tyypillisesti alle 1,2. Google on malliesimerkki PUE-arvon jatkuvasta kehittämisestä (kuvio 3).



KUVIO 3. Googlen datakeskusten PUE-tehokkuus (Google, 2024).

PUE-arvon ollessa väitetysti suurimpia ajureita datakeskusten energiatehokkuuden lisäämiseen on siinä kuitenkin heikkoutensa. Vaikka PUE-arvon mittaamiseen on selvät viralliset ohjeet, kaikki eivät lisää laskuihin samoja muuttujia. PUE-arvon kaunistelua hyödynnetään, esimerkiksi markkinoinnissa ja organisaation imagon parantamisessa. PUE-arvoa kaunistellaan esimerkiksi ilmoittamalla yksittäisen olosuhteiltaan täydellisen päivän arvo keskiarvon sijaan (Barroso, 2022).

Datakeskusten energiankulutuksen kasvaessa on elintärkeää keskittyä käytetyn energian tehokkaaseen hyödyntämiseen. Tämä vaatii tarkkaa optimointia toimintaprosesseissa, jotta käytetty energia muunnetaan mahdollisimman tehokkaasti palvelimien ja järjestelmien suorituskyvyksi. Optimoiduilla prosesseilla voidaan saavuttaa parempi energiatehokkuus ja samalla vähentää ympäristövaikutuksia. Resurssien dynaaminen hallinta on keskeisessä roolissa datakeskusten optimoinnissa (Nguyen ym., 2016). Resurssien dynaaminen hallinta perustuu joustavaan kykyyn hallita tietokonejärjestelmän resursseja muuttuvien olosuhteiden mukaan. Dynaamisia hallintamenetelmiä on lukuisia, mutta tässä kappaleessa keskitytään esittelemään muutamia keskeisiä esimerkkejä suorituskyvyn ja energiatehokkuuden varmistamiseksi.

Virtualisointia hyödynnetään laajasti datakeskuksissa ja se luo pohjan pilvilaskennalle (Nguyen ym., 2016). Useita virtuaalikoneita voidaan luoda yhdelle fyysiselle palvelimelle, joka vähentäen laitteiston määrää ja tehostaa resurssien käyttöä. Virtuaalikoneiden määrän kasvaessa tulee niiden hallinnasta haastavaa. Virtuaalikoneiden tehokkaaseen hallintaan hyödynnetään hallinta-algoritmeja, jotka tasapainottavat kuormaa ja alentavat energiankulutustasoa. Hallinta-algoritmien tukena käytetään virtuaalikoneiden sijoittamis- ja konsolidointialgoritmeja, joiden avulla virtuaalikoneiden sijoittaminen fyysisiin koneisiin optimoidaan. Näiden algoritmien avulla kyetään rajaamaan aktiivisten palvelimien määrää, luomaan uusia virransäästötilassa olevia palvelimia ja aktivoimaan ne tarvittaessa sekä minimoimaan palvelimien vaihtojen määrää (Nguyen ym., 2016).

Datakeskusten koon laajentuessa, laajenee myös sisäisen verkkoinfrastruktuurin koko. Sisäisen verkkoinfrastruktuurin laajentuessa energiatehokkuuden tärkeys korostuu. Verkkoympäristössä energiasäästöjä pyritään saavuttamaan ensikädessä optimoimalla verkkotopologiarakenteita. Tässä lepoteknologialla on merkittävä rooli. Lepoteknologialla voidaan herättää ja sammuttaa solmut tarpeen mukaan. Lepoteknologia ei vaikuta verkon suorituskykyyn, mutta sen avulla voidaan saavuttaa merkittäviä energiasäästöjä erityisesti ajankohtina, jolloin palvelupyyntöjä vastaanotetaan vähän. Elastic Tree-malli on tunnettu dynaaminen verkko- ja virtuanhallintamalli, joka säätää verkkoelementtien asetukset vastaamaan datakeskuksen kuormaa. Hellerin (2010) mukaan Elastic Tree-mallilla savutetaan datakeskuksissa 25–62 % energiansäästö työmäärille. Mallilla on myös kyky reagoida äkilliseen liikenteen kasvuun. Elastic Tree-malli omaa siis tasapainon suorituskyvyn, luotettavuuden ja energiankulutuksen välillä (Heller ym., 2010).

Ohjelmistotehon optimointia pidetään tehokkaana energiansäästöstrategiana. Strategiaa toteutetaan optimoimalla ohjelmistosuunnittelua ja koodaustapoja datakeskus ympäristöön sopiviksi. Optimoinnin jatkuvan parantamisen mahdollistaa alati kehittyvä ohjelmistotehon optimointitekniikka. Tehon optimointia voidaan suorittaa esimerkiksi kääntäjäteknologiaa tehostamalla. Kääntäjäteknologia on yksinkertaisuudessaan ohjelma, joka kääntää korkeatasoisen ohjelmointikielen konekoodiksi (Grune ym., 2012). Tätä prosessia voidaan tehostaa useilla tavoilla, kuten proseduraalisella abstraktiolla, jossa koodissa olevat rutiinit tunnistetaan ja ne korvataan rutiinikutsulla käsiteltävän koodin

tiivistämiseksi (Grune ym., 2012). Optimoitu koodi johtaa suorituskyvyn parantumiseen lisäten näin energiatehokkuutta.

4.2 Datakeskusten energiakulutuksen ennustaminen

Datakeskusten energiankulutuksen ennustaminen on tärkeää, jotta keskusten määrän lisääntymisen aiheuttamiin haasteisiin voidaan vastata. Onnistunut energiakulutuksen ennustaminen edistää esimerkiksi datakeskusten resurssien optimointia ja ympäristöhaittojen vähentämistä (Liu 2020). Luotettavien ennusteiden avulla voidaan tukea uusiutuvan energian integrointia sekä uusien datakeskusten ympäristöystävällistä sijoittelua. Eettisen näkökulman lisäksi ennusteiden tarkkuudella on konkreettinen vaikutus datakeskusliiketoiminnan kannattavuuteen esimerkiksi kustannustehokkuuden ja operatiivisen tehokkuuden kannalta (Liu 2020). Datakeskuksen energiankulutusta voidaan ennustaa useilla menetelmillä, kuten data-analyysillä ja simulointimalleilla.

Liu (2020) ehdottaa energiankulutuksen ennustamiseen polynomisovitusmenetelmään perustuvaa mallia. Polynomisovitusmalli menetelmän valintaa Liu perustelee sen pienellä ennustevirheellä muihin regressiomalleihin verrattuna. Ennustemallissa energiankulutusta arvioidaan Cisco Researchin raportoiman globaalin datakeskusliikenteen määrän perusteella. Mallissa hyödynnetään datakeskusten keskiarvo PUE:ta ja korkeiden leveysasteiden PUE-arvoja. Korkeiden leveysasteiden PUE-arvot simuloidaan Romonet-simulaatiolla valitun keskuksen maantieteellisen sijainnin perusteella. Tämän ansiosta Liun (2020) polynomisovitusmallilla voidaan ennustaa maailmalajaajuinen dynaaminen PUE-arvo datakeskuksille. Liu (2020) ennustaa mallinsa perusteella maailmanlaajuisen PUE-arvon laskevan vuoden 2020 arvosta 1.8 keskimäärin 1.5:een vuoteen 2026 mennessä. Tulevaisuuden datakeskusten sijoittaminen arktisella alueella tehostaa merkittävästi globaalin PUE-arvon laskua, arktisten alueiden tarjoamien ympäristö etujen vuoksi (Liu 2020).

4.3 Edistyksellinen jäähdytys

Datakeskusten energiatehokkuutta on viime aikoina tutkittu paljon. Suurin osa tutkimuksista koskee tehokkaita jäähdytysjärjestelmiä, energiankulutusta ja uusiutuvien energialähteiden integrointia. Tehokkaiksi jäähdytysratkaisuiksi voidaan mainita ulkoilman hyödyntäminen ja vesijäähdytys.

Ulkoilman hyödyntäminen voisi säästää 5,5–7,9 % jäähdytysjärjestelmän sähkönkulutuksesta datakeskuksen sijainnin mukaan (Oró ym., 2015). Myös Lee ja Chen (2013) toteavat tutkimuksessaan, että datakeskuksen sisäilmaa laskiessa jokaista laskettua sisäilman kahta lämpöastetta kohden voidaan säästää 2,8–8,5 % energiakustannuksissa ulkoilmaa hyödyntämällä. Tässä tutkimuksessa todettiin, että tulokseen vaikutti selkeästi, millä ilmastovyöhykkeellä datakeskus sijaitsi.

Kylmässä ilmastossa tulokset olivat huomattavasti kuumaa ilmastoa parempia. Ilmaston kosteus heikensi tuloksia. Lee ja Chen (2013) ehdottavatkin kosteilla alueilla käytettäväksi vesijäähdytysratkaisua.

Vesijäähdytystä voidaan pitää monin tavoin ilmajäähdytystä tehokkaampana. Veden lämmönjohtavuus on parempi kuin ilman, joka johtaa tehokkaampan jähdytykseen. Virtaava vesi voi olla jopa 4000 kertaa lämpöä johtavampaa kuin ilma, joten on sanomattakin selvää, että ero on valtava. IBM on kehittänyt datakeskuksen vesijäähdytysprototyypin, joka pystyy kierrättämään 80 % energiasta. Tässä prototyypissä vettä kierrätetään 45 asteisena jäähdytettävien osien kautta. Prosessissa ulostulovesi lämpenee 60 asteiseksi ja muodostunutta lämpöenergiaa voidaan ohjata suoraan kunnalliseen lämmitysverkkoon tai talojen lämmitykseen. IBM uskoo saavansa vielä joku päivä 100 % käytetystä energiasta uusiokäyttöön. (Kolehmainen & Ollila 2008.)

Yhtenä datakeskusten tunnetuimpana jäähdytysjärjestelmänä toimii HACA-järjestelmä (Lu ym., 2011). HACA-järjestelmä perustuu kuuma-kylmäkäytävään, jossa datakeskuksen korotetun lattian alla kulkee käytävä, johon viileä ilma johdetaan. Viileä ilma nousee keskuksessa oleville laitteille lattiassa olevista rei'istä. Samalla keskuksessa lämmin ilma nousee ylöspäin, ja se imetään katossa olevilla poistoilmalaitteilla kuumakäytävää pitkin ulos keskuksesta. HACA-järjestelmän energiatehokkuutta voidaan tehostaa työmäärän hallintamenetelmällä, jossa kuormitusta keskitetään lattian lähellä sijaitseville palvelimille. Koska viileä ilma nousee lattiasta, on jäähdytyksen hyötysuhde tehokkain lähellä lattiaa, lisäten jäähdytystehoa ja vähentäen energiankulutusta.

4.4 Pohjoismaiden potentiaali datakeskusten sijaintina

Pohjoismaiden ilmastoa voidaan pitää erittäin sopivana datakeskuksille (Manner ym., 2018). Ilmaston ollessa viileä voidaan ulkoilmaa hyödyntää tehokkaammin keskusten viilennykseen. Ilmaston kylmyys antaa myös mahdollisuuden uusiokäyttää datakeskuksessa syntynyttä lämpöä energiana muiden kiinteistöjen lämmitykseen korkean kaukolämmitysasteen vuoksi. Manner ym. (2018) uskovat hukkalämpöenergian hyödyntämisen kasvattavan ajan saatossa arvoaan, sillä rakennustekniikan ansiosta asuntojen lämmöneristys parantuu ja hukkalämmöstä saatavaa matalampaa lämpöenergiaa pystytään hyödyntämään tehokkaammin. Tutkijoiden mukaan energian uusiokäyttö on yksi tapa korvata osa fossiilisilla polttoaineilla tuotetusta lämpöenergiasta (Manner ym., 2018). Manner ym. (2018) suositteleekin tulevaisuuden datakeskusten vertailuun hyödynnettäväksi energian uusiokäytön tehokkuutta mittaavaa ERE-arvoa yleisesti suosituksen PUE-arvon sijaan.

Tutkijoiden mukaan suomalaisten datakeskusten sähkönkulutuksesta jopa 97 % voitaisiin ottaa talteen hukkalämpönä (Lu ym., 2011). Uusien massiivisten jopa 400 Megawatin modernien datakeskusten hukkalämmöllä olisi Manner ym. (2018) mukaan mahdollista lämmittää 12 neliökilometriä asuttamatonta aluetta.

Datakeskusten luomalla hukkalämmöllä on mahdollista lämmittää myös merkittävän kokoisia asuttuja alueita. Vuonna 2022 tietotekniikka-alan jätti Microsoft ja Suomen suurin energia yhtiö Fortum solmivat yhteisenhanke sopimuksen datakeskusalueen rakentamisesta Suomeen. Hankkeessa Microsoftin vastuuna on datakeskusratkaisuiden toteuttaminen ja Fortumin vastuuna on datakeskuksien luoman hukkalämmön kierrättäminen kaukolämpöverkkoon. Datakeskuksissa syntyvällä hukkalämmöllä on tarkoitus vastata 40 % lähialueiden kaukolämmöntarpeesta (Microsoft, 2022). Datakeskukset tulevat toimimaan uusiutuvalla energialla, jolloin sivutuotoksena syntyvä hukkalämpö on myös päästötöntä energiaa (Microsoft, 2022).

4.5 Tavoitteena hiilineutraali datakeskus ja PUE arvo 1

Maapallolla tapahtuva ilmastonmuutos on kiihtynyt viime vuosikymmenten aikana ihmisen aiheuttamien kasvihuonepäästöjen seurauksena. Kasvihuonepäästöjä syntyy pääasiassa energiantuotannosta, maankäytöstä ja kulutustottumuksista. Globaaliksi trendiksi onkin noussut hiilineutraaliuden tavoittelu, pyrkimyksenä vähentää kasvihuonepäästöjä ja hidastaa ilmastonmuutosta. Intergovernmental Panel on Climate Change:n raportista (Lee, 2023) käy ilmi, että hiilineutraalius vähentää kasvihuonepäästöjä ja auttaa estämään ilmastonmuutoksen katastrofaaliset seuraukset, sekä edistää kestäväää kehitystä ja teknologian innovointia. Ilmastomme kuumentuessa jatkuvasti on otettava käyttöön uusia lakeja ja toimia, jotka tähtäävät päästöjen vähentämiseen ja hiilineutraaliuden saavuttamiseen globaalisti. Hiilineutraalius on siis tärkeää huomioida myös datakeskustoiminnassa (Lee ym., 2023.) Seuraavaksi esitellään neljän askeleen strategia, kohti hiilineutraalia datakeskustoimintaa.

Ensimmäisenä askeleena on mahdollisimman modernien ja tehokkaiden IT-laitteiden käyttö datakeskuksissa. Modernit energiatehokkaat IT-laitteet mahdollistavat hillityn energiankulutuksen kasvun suhteessa vanhan teknologian hyödyntämiseen, vaikka laskentatehoa nostetaan jatkuvasti (Koronen ym., 2020). Erityisesti mikrosirujen lisääntynyt suorituskyky laskee energiankulutusta. Piipohjaisten mikrosirujen kehitys on kuitenkin kohtaamassa fysikaaliset ja insinöörityieteelliset rajoitukset, jotka estävät suorituskyvyn kasvattamisen. Tutkimuksen alla ovat uudet innovatiiviset teknologiat suorituskyvyn kasvattamiseen, kuten kvanttietokoneet ja millivolttikytkimet (Koronen ym., 2020).

Toisena askeleena on toissijaisenlaitteiston energiatehokkuuden varmistaminen. Huolellisella jäähdytysjärjestelmän suunnittelulla voidaan vaikuttaa radikaalisti toissijaisenlaitteiston energiankulutukseen. Jäähdytysjärjestelmän tehokkuutta mitataan jo aiemmin tässä tutkielmassa esitellyllä PUE-arvolla, jonka tulisi olla enintään 1 hiilineutraaliuden saavuttamiseksi. Vanhanaikainen hyörypuristusjäähdytysjärjestelmä kattaa yleensä 30–50 % sähkön kokonaiskulutuksesta datakeskuksessa. Tästä syystä onkin järkevää hyödyntää moderneja mekaanisia jäähdytyslaitteistoja, joiden avulla datakeskuksen ilmavirta voidaan optimoida ja yhdistää luonnollisiin jäähdytyslähteisiin. Ilmavirran optimoinnilla

voidaan saavuttaa energiasäästöjä poistamalla paikalliset kuumat kohdat keskuksista tasaamalla ilmavirtaa, joka vähentää tarvetta käyttää tuulettimia ilmavirran kierrättämiseksi (Koronen ym., 2020). Modernien mekaanisten jäähdytysjärjestelmien rinnalla, tai jopa korvaajana voidaan hyödyntää datakeskusta ympäröivää ilmaa tai vettä. Tätä kutsutaan ilmaisen jäähdytyksen hyödyntämiseksi. Ilmaisen jäähdytyksen hyödyntäminen osana datakeskuksen jäähdytystä johtaa tyypillisesti 12–15 % kokonaisvaltaiseen sähkönsäästöön. Valtaosa modernien datakeskusten jäähdytysjärjestelmistä perustuu ilman hyödyntämiseen, mutta sitäkin tehokkaampana ratkaisuna pidetään nestemäisiä jäähdytysjärjestelmiä. Nestemäiset jäähdytysjärjestelmät omaavat korkeamman lämpökapasiteetin mahdollistaen entistäkin tehokkaampien mikrosirujen energiatehokkaan viilentämisen. Nestemäisten jäähdytysjärjestelmien tuotteena syntyvää lämmintä jäähdytysainetta eli jätelämpöä pystytään uudelleenkäyttämään tehokkaasti kaukolämpöverkossa, lisäten nestemäisen jäähdytyksen energiatehokkuutta (Koronen ym., 2020).

Kolmas askel on tehokas laskennan hallinta, jolla tarkoitetaan palvelimien virranhallintaa. Käynnissä olevat hyödyntämättömät IT-laitteet aiheuttavat merkittävän määrän energiahävikkiä, niiden energiatehokkuudesta huolimatta. Palvelimien käyttöaste vaihtelee huomattavasti datakeskusten välillä, mutta on arvioitu, että vähintään 20 % kaikista palvelimista on jatkuvasti valmiustilassa eli päällä suorittamatta laskentatoimenpiteitä (Koronen ym., 2020). Työkuormien konsolidoinnilla eli työkuormien keskittämällä pienemmälle määrälle palvelimia, samalla sammuttaen kokonaan valmiustilassa olevat palvelimet saavutetaan merkittäviä energiasäästöjä. Työkuormien konsolidointi vaatii kuitenkin laillisen mandaatin, jota pilvipalvelussa toimivalla operaattorilla ei välttämättä ole (Koronen ym., 2020). Konsolidointia toteutetaan kuitenkin tehokkaasti laajoissa moderneissa pilvipohjaisissa datakeskuksissa, tarjoten asiakkaalle energiatehokasta laskentatehoa.

Neljäs askel on datakeskuksen energiajärjestelmän integrointi lämmön ja kysyntäjoustopuolelta. Käytännössä kaikki datakeskuksissa käytetty sähkö muuttuu lopulta lämmöksi, joka on poistettava keskuksista toiminnan ylläpitämiseksi. Datakeskuksissa syntyvä hukkalämpö on yleensä matalalämpöistä, mutta se kasvaa jäähdytyksen tehokkuuden kasvaessa. Esimerkiksi ilmajäähdytyksessä syntyvä ulostulolämpö on noin 25–30 °C, kun taas tehokkaammassa nestemäisessä jäähdytyksessä voidaan saavuttaa jopa 60°C ulostulolämpö (Ebrahimi ym., 2014). Ulostulolämpöä voidaan hyödyntää esimerkiksi lähellä sijaitsevien rakennusten, kuten toimistojen ja asuinrakennusten lämmitykseen. Ulostulolämmön hyödyntäminen laajemmassa mittakaavassa on myös mahdollista kierrättämällä ulostulolämpö paikallisten energiayhtiöiden kaukolämpöverkossa. Optimaalisessa tilanteessa useita datakeskuksia sijoitetaan yhden keskitetyn lämpöpumppuaseman ympärille. Keskitetyn sijoittelun ansiosta kaukolämpöyhtiö saa vakaamman energianlähteen, useamman datakeskuksen toimittaessa hukkalämpönsä keskitettyyn pumppuasemaan. Prosessissa ulostulolämpötila kasvaa ja sen hyödyntäminen tehostuu. Hiilineutraalin datakeskuksen toiminnalle kriittisen uusiutuvan edullisen energian saatavuutta voidaan lisätä

kysyntäjoustolla. Kysyntäjousto esimerkiksi GreenWare-järjestelmällä, mahdollistaa datakeskusten toiminnan hajauttamisen maantieteellisesti aina energiakustannuksiltaan edullisimpiin alueisiin. Järjestelmä ohjaa automaattisesti palvelupyynnöt siihen datakeskukseen, jossa on kyseisellä hetkellä halvimmat energiakustannukset. Tämä tasoittaa datakeskusten sähkön kysyntäpiikkejä ja täten myös uusiutuvan energian hintaa (Zhang ym., 2011).

5 YHTEENVETO

Tämän tutkielman tavoitteena oli löytää tutkimusperustaisia toimintatapoja datakeskusten ympäristöystävällisyyden lisäämiseen. Tutkielmassa esitellään useita toimia kohti hiilineutraalia datakeskusta ja nykyaikaista tietoyhteiskuntaa. Tämän kirjallisuuskatsauksen tutkimuskysymys oli:

- Millaisilla toimilla voidaan edistää datakeskusten hiilineutraaliutta?

Tutkielmassa esitellyt toimet kohti hiilineutraalia datakeskusta tarjoavat käytännön ohjeita toimialalle, joka on keskeisessä asemassa teknologisen kehityksen ja yhteiskunnan digitalisaation kannalta. Tutkielmassa esitelty strategia kohti hiilineutraalia datakeskustoimintaa sisältää neljä askelta, jotka vastaavat tutkimuskysymykseen. Strategian askeleet ovat: modernit IT-laitteet, toissijaisen laitteiston energiatehokkuus, laskennan hallinta ja energijärjestelmän integrointi.

Modernien ja tehokkaiden IT-laitteiden hyödyntäminen datakeskuksissa on tärkeä ensimmäinen askel, sillä uudet teknologiat voivat vähentää energiankulutusta merkittävästi suhteessa vanhoihin järjestelmiin. Erityisesti mikrosirujen lisääntynyt suorituskyky on laskenut energiankulutusta datakeskuksissa. Suorituskyvyn jatkuva lisääminen saattaa kuitenkin kohdata fyysiset ja insinööritieteelliset rajat, jolloin uusien innovatiivisten teknologioiden, kuten kvanttietokoneiden tutkimus ja kehitystyö korostuvat. Strategian toinen askel on toissijaisen laitteiston energiatehokkuuden varmistaminen huolella suunnitellulla jäähdytysjärjestelmällä, sillä se vastaa merkittävästä määrästä datakeskuksen sähkönkulutuksesta. Optimoitu nestejäähdytykseen perustuva jäähdytysjärjestelmä tarjoaa mahdollisuuden merkittäviin energiasäästöihin vanhoihin järjestelmiin verrattuna. On tärkeää kuitenkin huomata, että jäähdytysjärjestelmän tehokkuus ei ole ainoa tekijä, joka vaikuttaa datakeskuksen energiankulutukseen. Laitteiston ja infrastruktuurin tehokkuudella on myös merkittävä vaikutus energiankulutukseen. Esitelty kolmas askel on laskennan hallinta eli palvelimien virranhallinta. Tämä askel on keskeisessä roolissa hiilineutraalin datakeskuksen

tavoittelussa, sillä käyttämättömät valmiustilassa olevat laitteet aiheuttavat energiahävikkiä, joka voidaan välttää työkuormien oikea-aikaisella ja tehokkaalla konsolidoinnilla. Työkuormien konsolidoinnin ansiosta käyttämättömät palvelimet voidaan sammuttaa, jolloin saavutetaan merkittäviä energiasäästöjä. Tässä prosessissa on tärkeää varmistaa, että konsolidointitoimet eivät vaaranna palvelujen saatavuutta tai tietoturvaa. Strategian neljäs askel on energiajärjestelmän integrointi lämmön ja kysyntäjoustop hallinnan osalta. Hukkalämmön integrointi osaksi kaukolämpöverkkoa tarjoaa mahdollisuuden energiatehokkuuden lisäämiseen. Lämmön integrointi vaatii tiivistä yhtistyötä ICT-alan toimijoiden, energiayhtiöiden ja rakennuttajien välillä. Hiilineutraalin datakeskuksen toiminnalle kriittisen edullisen uusiutuvan energian saatavuutta voidaan lisätä kysyntäjoustopilla. Ohjaamalla palvelupyynnöt maantieteellisesti edullisimman uusiutuvan energian alueelle voidaan tasoittaa uusiutuvan energian kysyntä- ja hintapiikkejä.

Kokonaisuudessaan tämä tutkielma osoitti, että vihreä IT on merkittävä osa organisaatioiden kestävästä kehityksestä ja ympäristövastuullisuudesta. Organisaatioille keskeinen toimenpide hiilineutraalin toiminnan saavuttamiseksi, on vihreän IT:n implementointi osaksi organisaation strategiaa. Tämä voidaan toteuttaa luomalla organisaatiolle vihreä IT-politiikka. Ilmastonmuutoksen torjuminen vaatii konkreettisia toimia kaikilla aloilla. Tietotekniikka-alalla keskeisiä haasteita ovat datakeskusten energiatehokkuus ja hiilijalanjäljen pienentäminen. Tämän tutkielman tulokset osoittavat, että useilla eri toimilla on mahdollista saavuttaa merkittäviä parannuksia datakeskusten ympäristövaikutuksiin. Tutkielmassa nostetaan esille neliaskelisen strategian lisäksi monia tehokkaita ratkaisuja datakeskusten päästöjen vähentämiseen. Tärkeinä ratkaisuina voidaan pitää prosessien optimointia, virtualisointia, lepoteknologiaa, ohjelmistotehon optimointia sekä uusiutuvan energian hyödyntämistä osana datakeskuksen toimintaa. Tällaiset innovaatiot eivät ainoastaan pienennä datakeskusten hiilijalanjälkeä, vaan voivat myös parantaa niiden operatiivista tehokkuutta ja luotettavuutta. Tutkielmassa esitetään, että datakeskusten sijoittaminen pohjoismaihin on houkuttelevaa, kun tavoitellaan energiatehokkuutta ja ympäristöystävällisyyttä. Modernien jäähdytysratkaisuiden tehokkuus kasvaa datakeskuksen sijaitessa viileän ilmaston alueella, jossa luonnollisen jäähdytyksen hyödyntäminen on mahdollista ja syntyvää hukkalämpöä voidaan uusiokäyttää energiana, edistämällä alueellista kestävyttä. Vaikka datakeskukset eivät ole suurin päästöjen aiheuttaja niiden kasvavat energiatarpeet on otettava huomioon. Datakeskustoiminnan muuntuminen hiilineutraaliksi voi toimia kannustavana esimerkkinä myös muiden toimialojen siirtymään kohti hiilineutraaliutta.

Tutkielman lopputuloksia voidaan pitää uskottavina, sillä hyödynnetyt lähteet ovat pääosin tieteellisiä artikkeleita, jotka ovat läpikäyneet vertaisarvioinnin, niiden korkean laadun ja luotettavuuden varmistamiseksi. Lähteiden valinnassa kiinnitettiin erityisesti huomiota julkaisujen tuoreuteen, koska datakeskusteknologia kehittyy jatkuvasti. Tutkielman luotettavuutta vahvistaa viitteet virallisiin dokumentteihin, kuten Euroopan unionin direktiiveihin. Virallisten

dokumenttien hyödyntäminen lisää tutkielman lopputulosten oikeellisuutta, ajantasaisuutta ja lainmukaisuutta.

Teknologian kehittyessä on syytä tehdä jatkotutkimusta vihreän IT:n hyödyntämisestä datakeskusympäristössä. Yksi mielenkiintoinen jatkotutkimusaihe on energian varastointi erilaisiin akkujärjestelmiin. Akkujärjestelmien avulla voitaisiin tasata entisestään uusiutuvan energian kysyntäpiikkejä ja edistää näin kustannustehokkaampaa hiilineutraalia toimintaa. Mielenkiintoista olisi tutkia myös koneoppimisen hyödyntämistä datakeskuksissa esimerkiksi laitteiston energiatehokkuuden analysoinnissa. Koneoppiminen voisi auttaa tunnistamaan energiatehottomat laitteet ja ehdottaa vaihtoehtoisia tehokkaampia ratkaisuja niiden tilalle.

LÄHTEET

- Akano, A.K. & Campbell, W. (2014). A Cross-cultural Survey of the Impact of Organizational Culture on Adoption of Green IT. *Conference on Complex, Intelligent and Software Intensive Systems*, Birmingham, UK (pp.177-184). doi: 10.1109/CISIS.2014.95
- Armstrong, M. (2019, 16. huhtikuuta). Global data creation is about to explode. Haettu 20.2.2023 osoitteesta:
<https://www.statista.com/chart/17727/global-data-creationforecasts/>
- Barroso, L. A., Hölzle, U., & Ranganathan, P. (2022). *The Datacenter as a Computer: Designing Warehouse-Scale Machines*. Springer Nature Switzerland AG.
<https://doi.org/10.1007/978-3-031-01761-2>
- Bitterlin, I. F. (2012). *Green IT: Managing Your Carbon Footprint* [ITPro collection]. BCS, The Chartered Institute.
- Cisco. (2020). Cisco annual internet report (2018–2023). White paper Cisco public. Haettu 7.3.2023 osoitteesta:
<https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.pdf>
- Crosby, C & Curtis, C. (2015). Hosting or colocation data centers. Teoksessa H. Geng (toim.), *Data center Handbook* (s. 47-57). Hoboken: Wiley
- Ebrahimi, K. Jones, G. F. & Fleischer, A. S. (2014). A review of data center cooling technology, operating conditions and the corresponding lowgrade waste heat recovery opportunities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31, 622–638.
- European Commission. (2019). Bringing to market more energy efficient and integrated data centres. Haettu 23.3.2023 osoitteesta:
<https://ec.europa.eu/info/funding-tenders/opportunities/portal/screen/opportunities/topic-details/ee-20-2017>

Gartner inc. (2008). Emerging technology trends. Haettu 19.1.2023 osoitteesta: <http://www.gartner.com/it/page.jsp?id=739613&format=print>

Geng, H. (2015). *Data Center Handbook*. Wiley.

Google. (2024). Continuous PUE improvement. Haettu 15.1.2024 osoitteesta: <https://www.google.com/about/datacenters/efficiency/#measuring-efficiency.%20101,%20161>

Grune, D., van Reeuwijk, K., Bal, H. E., Jacobs, C. J. H., & Langendoen, K. (2012). *Modern Compiler Design*. Springer New York, NY. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-4699-6>

Heller, B., Seetharaman, S., Mahadevan, P., Yiakoumis, Y., Sharma, P., Banerjee, S., & McKeown, N. (2010). ElasticTree: Saving Energy in Data Center Networks. NSDI'10 Proceedings of the 7th USENIX conference on Networked systems design and implementation, 7, 249–264.

Jones, N. (2018). How to stop data centres from gobbling up the world's electricity. *Nature*. Haettu 11.2.2023 osoitteesta: <https://www.nature.com/articles/d41586-018-06610-y>

Khan, R. U. & Khan, S. U. (2013). Green IT-Outsourcing Assurance Model. *2013 IEEE 8th International Conference on Global Software Engineering Workshops*, 84–87. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICGSEW.2013.19>

Kolehmainen, A & Ollila, K. (2008). Datakeskus lämmittää uima-altaan. Haettu 5.3.2023 osoitteesta: <https://www.tivi.fi/uutiset/datakeskus-lammittaa-uima-altaan/126fc0e0-b7b6-3bf9-a5a4-7749748279dd>

Koronen, C., Åhman, M., & Nilsson, L.J. (2020). Data centres in future European energy systems – energy efficiency, integration and policy. *Energy Efficiency*, 13(1), 129–144. <https://doi.org/10.1007/s12053-019-09833-8>

Laurent, A. Dal Maso, M. Wang, X. Zhu, X & Prata, D. (2020). Environmental Sustainability of Data Centres: A Need for a Multi-impact and Life Cycle. Copenhagen Centre on Energy Efficiency.

- Lee, H & Romero, J. (2023). Climate change 2023: synthesis report. Geneva: IPCC. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- Lee, K, P. & Chen, H, L. (2013). Analysis of Energy Saving Potential of Air-Side Free Cooling for Data Centers in Worldwide Climate Zones. *Energy and Buildings*, 64, 103–112.
- Liu, Y., Wei, X., Xiao, J., Liu, Z., Xu, Y., & Tian, Y. (2020). Energy consumption and emission mitigation prediction based on data center traffic and PUE for global data centers. *Global Energy Interconnection*, 3(3), 272–282. <https://doi.org/10.1016/j.gloi.2020.07.008>
- Lu, T., Lu, X., Remes, M & Viljanen, M. (2011) *Energy and buildings. Investigation of air management and energy performance in a data center in Finland: Case study*, 43(12), 3360–3372. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.08.034>
- Manner, J., Pärssinen, M., Syri, S. & Wahlroos, M. (2018). Waste heat from data centers: An investment analysis. *Sustainable Cities and Society*, 44, 428–444. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.10.023>
- Microsoft (2022). Microsoft ja Fortum yhteistyöhön - Microsoft rakentaa Suomeen datakeskusalueen, joka tuottaa päästötöntä kaukolämpöä Fortumin asiakkaille pääkaupunkiseudulla. Haettu 18.3.2023 osoitteesta: <https://news.microsoft.com/fi-fi/2022/03/17/microsoft-rakentaa-suomeen-datakeskusalueen/>
- Microsoft Azure. (2023). Public cloud vs private cloud vs hybrid cloud microsoft azure. Haettu 5.3.2023 osoitteesta: <https://azure.microsoft.com/en-us/resources/cloud-computing-dictionary/what-are-private-public-hybrid-clouds/#related-products>
- Murugesan, S. & Gangadharan, G. R. (2012). Green IT: an overview. Teoksessa *Harnessing green IT: Principles and practices*, 1-21. Wiley.
- Nguyen, T. H. (2016). *Virtual machine management for efficient cloud data centers with applications to big data analytics*. [väitöskirja, Aalto-yliopisto]. Aaltodoc. <https://aaltodoc.aalto.fi/items/14c3cf53-6e9c-4051-be7b-5fc2e7012691>

Oró, E. Depoorter, V. Garcia, A. & Salom, J. (2015). Energy Efficiency and Renewable Energy Integration in Data Centres. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 429-446.

O'Neill, M. G., & British Computer Society. (2010). *Green IT for Sustainable Business Practice*. Swindon: British Informatics Society Limited. ISBN: 1-906124-62-0

Saha, S. Sarkar, J. Dwivedi, A. Dwivedi, N. Narasimhamurthy, A. M. & Roy, R. (2016). A novel revenue optimization model to address the operation and maintenance cost of a data center. *Journal of Cloud Computing*, 5(1).

Song, Z. Zhang, X. & Eriksson, C. (2015). Data Center Energy and Cost Saving Evaluation. *Energy Procedia*, 75, 1255-1260.

Wu, C. & Buyya, R. (2015). *Cloud Data Centers and Cost Modeling*. Morgan Kaufmann.

Zhang, Y., Wang, Y. & Wang, X. (2011). GreenWare: Greening Cloud-Scale Data Centers to Maximize the Use of Renewable Energy. Teoksessa F. Kon & A-M. Kermarrec (toim.), *Middleware 2011* (143-164). Springer.