



Vaasan yliopisto  
UNIVERSITY OF VAASA

Aaro Hyytiäinen

## **Tekoälyn ympäristövaikutukset**

Kiertotalous kestävän kehityksen edistäjänä

Tekniikan ja innovaatiojohtamisen yksikkö  
Kandidaatintutkielma, tekniikan kandidaatti  
Energia- ja informaatiotekniikan koulutusohjelma

Vaasa 2025

---

**VAASAN YLIOPISTO****Tekniikan ja innovaatiojohtamisen yksikkö**

<b>Tekijä:</b>	Aaro Hyytiäinen		
<b>Tutkielman nimi:</b>	Tekoölyn ympäristövaikutukset: Kiertotalous kestävän kehityksen edistäjänä		
<b>Tutkinto:</b>	Tekniikan kandidaatti, Energia- ja informaatiotekniikan ohjelma		
<b>Oppiaine:</b>	Tuotantotalous		
<b>Työn ohjaaja:</b>	Tauno Kekäle		
<b>Valmistumisvuosi:</b>	2025	<b>Sivumäärä:</b>	45

---

**TIIVISTELMÄ:**

Tässä kandidaatintutkielmassa tarkastellaan kirjallisuuskatsauksen pohjalta tekoölyn aiheuttamia ympäristövaikutuksia sekä kiertotalouden tarjoamia mahdollisuuksia kestävämmälle tekoöllylle. Tekoölyteknologiat ovat viime vuosina kehittyneet huomattavasti, ja niitä sovelletaan yhä laajemmin eri toimialoilla, kuten terveydenhuollossa, teollisuudessa sekä logistiikassa. Nopean kehityksen myötä myös tekoölyn käyttö lisääntyy jatkuvasti, mikä puolestaan aiheuttaa uudenlaisia ympäristöhaasteita. Yksi keskeinen huolenaihe on palvelinkeskusten energiankulutuksen kasvu, sillä tekoöly vaatii suuria määriä laskentatehoa erityisesti oppimismallien koulutusvaiheessa. Tutkielmassa pyritään arvioimaan tekoölyn energiankulutuksen suuruusluokkaa sekä elinkaaren aikana aiheutuvia päästöjä globaalilla tasolla. Tämän lisäksi selvitetään, millä tavoin kiertotalouden periaatteita voidaan soveltaa tekoölyn ympäristövaikutusten hillitsemiseksi. Tutkielman tavoitteena on muodostaa kokonaiskuva siitä, missä suuruusluokassa ympäristövaikutukset ovat ja miten näitä vaikutuksia voitaisiin hallita tai vähentää. Tekoölyteknologiat eivät itsessään aiheuta suoranaisia päästöjä, mutta valtaosa ympäristövaikutuksista syntyy epäsuorasti palvelinkeskuksissa. Esimerkiksi suurten kielimallien kouluttaminen vaatii nykyisellään huomattavia määriä energiaa. Palvelinkeskusten ylläpito ja jäädytys kuluttavat jatkuvasti sähköä, ja mikäli energia tuotetaan fossiilisilla polttoaineilla, syntyy myös hiilidioksidipäästöjä. Päästöjen arviointi tarkasti on vaikeaa, sillä ne riippuvat esimerkiksi käytetyn sähkön tuotantotavasta ja palvelinkeskusten tehokkuudesta. Kiertotalousmalli voi tarjota ratkaisuja tekoölyn aiheuttamien ympäristövaikutusten vähentämiseksi. Tekoölyn tapauksessa tämä voi tarkoittaa esimerkiksi palvelinkeskusten hukkalämmön talteenottoa ja hyödyntämistä kaukolämpöverkossa, laitteistojen elinkaaren pidentämistä, energiatehokkuuden optimointia sekä sähkö- ja elektroniikkajätteen tehokasta kierrätystä. Esimerkkinä käytetään Microsoftin palvelinkeskushanketta Espoossa, joka on yksi merkittävä esimerkki kiertotalouden käytäntöjen hyödyntämisestä palvelinkeskusteollisuuden kontekstissa. Lisäksi tekoölyllä itsellään voi olla positiivinen rooli kiertotalouden edistämisessä. Tekoölypohjaisia ratkaisuja voidaan hyödyntää ennakoivassa kunnossapidossa, resurssien optimoinnissa sekä toimitusketjujen läpinäkyvyyden parantamisessa. Vaikka tekoölyn ympäristövaikutusten tarkka arviointi on haastavaa niiden monimutkaisen ja laaja-alaisen luonteen vuoksi, kiertotalous tarjoaa lupaavia työkaluja ja malleja kestävän teknologian kehittämiseksi. Näiden toimintojen avulla voidaan kehittää uusia liiketoimintamalleja, jotka tukevat kiertotalouden periaatteita ja vähentävät ympäristökuormitusta. Kokonaisuudessaan tutkielmassa muodostetaan yleiskuva tekoölyn ympäristövaikutukseen sekä kiertotalouden välisestä yhteydestä niiden hallitsemiseksi, erityisesti painottaen tekoöllylle kriittisiä palvelinkeskuksia, huomioiden mahdolliset ratkaisut, innovaatiot sekä monimutkaisuuden näiden viitekehysten yhdistämisessä

---

**AVAINSANAT:** Tekoöly, Kiertotalous, Palvelinkeskus, Ympäristövaikutukset, Kestävä kehitys

## Sisällys

1	Johdanto	5
1.1	Tutkimuksen tausta	5
1.2	Tutkimuksen tavoitteet	6
1.3	Tutkimusmenetelmät	6
1.4	Tekoälysovellusten hyödyntäminen tutkielmassa	8
2	Tekoäly & palvelinkeskukset	9
2.1	Tekoäly	9
2.2	Palvelinkeskukset	12
2.3	Tekoälyn ympäristövaikutukset	14
2.4	Kestävä tekoäly & tulevaisuuden visiot	16
3	Kiertotalous	21
3.1	Kiertotalouden määritelmä, pääperiaatteet ja energiantransitio	21
3.2	Digitaalinen kiertotalous & tekoäly	24
3.3	Kiertotalouden rooli palvelinkeskuksissa	25
3.4	Microsoftin palvelinkeskus & kiertotalousratkaisut	27
3.5	Kestävämpi palvelinkeskusteollisuus & kiertotalous	32
4	Yhteenveto ja pohdinta	37
	Lähteet	42

## Kuviot

Kuvio 1, Tekoälyn ja oppimismallien välinen yhteys	11
Kuvio 2, Kestävän tekoälyn kaksijakoisuus, (Mukaillen Van Wynsberge, 2021, s. 124)	19
Kuvio 3, Kiertotalouden rengasmalli, (Olabi, 2019, s.451)	21
Kuvio 4, Kiertotalouden arvoketju (Hoosain ja muut, 2023, s. 178)	35

## Lyhenteet

AIGC	-	Artificial intelligence Generated content
AI	-	Artificial Intelligence
CV	-	Computer Vision
DL	-	Deep learning
ICT	-	Information & Communication technology
IoT	-	Internet of things
IT	-	Information technology
kWh	-	Kilowattitunti
ML	-	Machine Learning
NLP	-	Natural Language processing
TWh	-	Terawattitunti
YVA	-	Ympäristövaikutusten arviointimenettely

# 1 Johdanto

Tekoälyn kehitys viime vuosina on ollut merkittävää, tekoälyä sovelletaan entistä enemmän eri toimialoilla, kuten teollisuudessa, liikenteessä ja terveydenhuollossa. Vaikka tekoälyn tuomat hyödyt yhteiskunnalle ovat merkittäviä, tekoälyn käyttöön liittyy kasvavia ympäristöhaasteita. Teknologian nopea kehitys ja sen käyttöönotto tekoälyn ympärillä sekä arjessa että liike-elämässä ovat lisänneet huomattavasti energiankulutusta, lisääntyvän energiankulutuksen ohella ICT- infrastruktuuri osaltaan kasvattaa tekoälyn aiheuttama negatiivista ympäristövaikutusta.

## 1.1 Tutkimuksen tausta

Tekoälymalleja koulutetaan palvelinkeskuksissa, jotka ovat keskeinen osa digitaalista infrastruktuuria, ja tekoälyteknologian yleistyessä energiankulutuksen oletetaan kasvavan. Palvelinkeskusten rooli tekoälyn kehityksen kannalta onkin huomattava, sillä niiden aiheuttamat hiilidioksidipäästöt ovat epäsuorasti tekoälymallien koulutuksesta ja käytöstä johtuvia. Esimerkiksi tekoälymalli ChatGPT:n globaali käyttö tuottaa vuoden aikana energiantarpeensa vuoksi 25- kertaisten määrän hiilidioksidipäästöjä verrattuna kyseisen GPT-3 mallin kouluttamiseen (Chien ja muut, 2023). Palvelinkeskusten päästöihin vaikuttaa energiankulutuksen lisäksi myös ICT- laitteiston asianmukainen kierrätys. Puutteelliset kierrätysmenetelmät voivat aiheuttaa merkittäviä päästöjä ja negatiivisia ympäristövaikutuksia. Tekoälyä voidaan kuitenkin myös hyödyntää esimerkiksi energian käytön optimoinnissa. Tämä asetelma herättää kysymyksen siitä, missä mittakaavassa tekoälyn energiankulutus sekä hiilidioksidipäästöt ovat sekä millaisia ratkaisuja kiertotalousmallit voivat tarjota ympäristövaikutusten hillitsemiseksi erityisesti tekoälyn suhteen toiminnalle kriittisten palvelinkeskusten tapauksessa.

## 1.2 Tutkimuksen tavoitteet

Tutkimuksen tavoitteena on selvittää tekoälyn energiankulutuksen suuruusluokka globaalisti, sisältäen tekoälymallien koulutuksesta sekä käytöstä aiheutuvan energiankulutuksen sekä laitteiston osalta. Lisäksi aineiston pohjalta tarkoituksena on arvioida tekoälyn käytöstä aiheutuvat hiilidioksidipäästöt. Tutkimusongelma aiheuttaa osaltaan haasteita yksiselitteisten ratkaisujen löytämiseksi, sillä ympäristövaikutusten arviointi voi olla haasteellista johtuen monimutkaisuudesta, johon vaikuttaa teknologinen kehitys sekä globaalit taloudelliset- että ympäristölliset intressit. Tekoälyn palvelinkeskuksissa aikaansaamaa energiankulutusta ja syntyneitä päästöjä voidaan optimoida esimerkiksi soveltamalla kiertotalouden ja kestävän kehityksen periaatteita moderneissa palvelinkeskuksissa. Tutkielmassa on tavoitteena esitellä käytännön esimerkkinä Microsoftin palvelinkeskushanketta Suomessa, joka hyödyntää kiertotalouden periaatteita esimerkiksi luovuttamalla keskuksessa syntynyttä hukkalämpöä alueellisesti kaukolämpöverkon tarpeisiin. Kiertotalousajattelun tarjoamat ratkaisut verrattuna perinteiseen lineaariseen talousajattelumalliin ovat avainasemassa kestävämmän tekoälyn implementoinnin saralla. Palvelinkeskuksissa suoritetaan muitakin toimenpiteitä, kuin suoranaisesti tekoälyyn liittyviä toimintoja. Silti vaikutus keskusten ympäristöystävällisempien kiertotalousratkaisujen vuoksi vaikuttaa suoranaisesti myös tekoälyn aiheuttamaan negatiiviseen ympäristökuormaan.

## 1.3 Tutkimusmenetelmät

Tutkielmassa tarkastellaan tekoälyn energiankulutusta sekä hiilidioksidipäästöjä globaalista näkökulmasta ja pohditaan kiertotalouden kestävyysperiaatteiden mukaisia ratkaisuja osana negatiivisten ympäristövaikutusten vähentämisessä.

Aihe on rajattu koskemaan tekoälyn osalta sen valmistelu, koulutus- ja käyttövaihetta, sekä tekoälyn epäsuorasti aiheuttamaa ympäristökuormaa palvelinkeskuksissa sisältäen keskusten energiankulutuksen ja laitteiston aiheuttaman ympäristökuorman.

Kiertotalouden osalta aihe on rajattu koskemaan tekoälyn suhteen digitaalista kiertotaloutta. Palvelinkeskusten kiertotalousratkaisuja ja innovatiivisia visioita sekä tekoälyn, että palvelinkeskusten osalta aineiston pohjalta. Digitaalinen kiertotalous ja mahdolliset ratkaisut lukeutuvat kiertotalouden viitekehyksen alle, sillä termin viitekehyksen sisällä tavoitteet ovat samankaltaisia riippumatta siitä, mille alueelle kiertotalouden periaatteita sovelletaan. Tutkielmassa analysoidaan Microsoftin uutta palvelinkeskushanketta Suomessa, joka on globaalisti merkittävä esimerkki kiertotalouden hyödyntämisen suhteen.

Tutkielma on tehty kirjallisuuskatsauksena, aiheen tuoreudesta huolimatta relevanttia lähdemateriaalia koskien erityisesti tekoälyä ja kiertotaloutta on hyvin saatavilla, joten kirjallisuuskatsaus tutkielmatyyppinä soveltuu annetun tutkimusongelman käsittelyyn vaaditulla laajuudella. Tutkielma on jaettu osioihin, joissa käsitellään tekoälyä ja palvelinkeskuksia sekä energiankulutusta ja päästöjä globaalisti. Kiertotaloutta käsitellään määritellen keskeiset periaatteet, sekä pohditaan kiertotalouden mahdollisuuksia palvelinkeskusteollisuuden alalla, käyttäen esimerkkinä Microsoftin palvelinkeskushanketta. Lopuksi kirjallisuuden pohjalta yhteenveto, joissa esitellään tutkielman keskeiset johtopäätökset, ja kuinka nämä vastaavat asetettuihin tutkimuskysymyksiin. Viimeiseksi arvioidaan tutkielman merkitystä ja ehdotetaan mahdollisia ajatuksia jatkotutkimuksista.

Tutkielman tutkimuskysymykset on muotoiltu seuraavasti:

1. Kuinka paljon tekoälyn käyttö ja koulutus aiheuttaa suorasti ja epäsuorasti hiilidioksidipäästöjä energiantarpeensa täyttämiseksi?
2. Kuinka Microsoftin uusi palvelinkeskus Suomessa hyödyntää kiertotalouden periaatteita?
3. Millaisia ratkaisuja voidaan toteuttaa tekoälyn käytöstä syntyneiden päästöjen vähentämiseksi kiertotalouden näkökulmasta?

#### **1.4 Tekoälysovellusten hyödyntäminen tutkielmassa**

Tutkielmaa tehdessäni olen hyödyntänyt Googlen tarjoaman Gemini- tekoälymallin 2.0 Flash- kielimallia. Tekoälytyökalua on käytetty ennen varsinaista kirjoittamista apuvälineenä tutkielman ideointivaiheessa. Olen käyttänyt tekoälyä varmistaakseni, että olen ymmärtänyt ja kääntänyt lähdemateriaalin oikein englannista suomeksi. Tämä auttoi minua saamaan paremman kokonais käsityksen käytetystä lähdemateriaaleista, jotta lähteiden käyttö olisi kauttaaltaan asianmukaista ja perusteltua. Tiedostan täyden vastuun sisällöllisistä ja laadullisista piirteistä tutkielmassa olevan yksin minun.

## 2 Tekoäly & palvelinkeskukset

Tämän osion tarkoituksena on avata tekoälyä ja palvelinkeskusta käsitteenä sekä käsitellä tekoälyn aiheuttamia päästöjä, joiden näkyvin osa on palvelinkeskusten energiantarpeesta aiheutuvat päästöt. Osiossa käsitellään tekoälyn energiankulutusta globaalisti sekä kaikkia syntyviä hiilidioksidipäästöjä huomioiden koko tekoälyn elinkaari mahdollisimman laajasti. Lisäksi tarkoituksena on selvittää palvelinkeskusten energiankulutuksen suuruusluokka globaalisti, vaikka tekoälyn käyttö- ja koulutus ovat palvelinkeskuksissa tapahtuvia yksittäisiä toimintoja kaikkien muiden suoritettavien toimintojen lisäksi. Lopuksi tarkastellaan tulevaisuuden visioita kestävämmälle tekoälylle.

### 2.1 Tekoäly

Tekoälyllä tarkoitetaan digitaalista ohjelmistoa tai järjestelmää, joka on kykeneväinen osoittamaan ihmisälyn kaltaista käyttäytymistä analysoimalla ympäristöään ja toimimalla itsenäisesti tietyissä rajoissa saavuttaakseen ennalta asetetut tavoitteet. Tekoäly-termin alla on kuitenkin useita eri teknologioita, joilla voi olla eroavaisuuksia niiden näennäisessä älykkyydessä. Yleisesti termiä käytetään tarkoittaen mitä tahansa tekoälyteknologiaa, jota käytetään kontekstista riippumatta. (Euroopan parlamentti, 2020). Tekoäly voi toimia esimerkiksi neuvonantajan roolissa tai autonomisessa päätöksenteossa ennalta ohjattujen algoritmien avulla. Termin soveltuessa useisiin konteksteihin, on syytä suhtautua kriittisesti tekoälystä puhuttaessa, lisäksi tekoäly omana tieteenalanaan on vielä suhteellisen uusi, joten viitekehyksen sisälle lukeutuu useita osa-alueita.

Generatiivisten tekoälymallien kehitys ja historia alkaa omana tieteenalanaan 1950-luvulta. Varhaisia menetelmiä tekoälyn kehityksen saralla olivat Markovin- ja Gaussin sekoitusmallit, joita käytettiin ennen syväoppimismallien mukanaan tuomia merkittäviä parannuksia. Varhaiset menetelmät eivät soveltuneet kuitenkaan luonnollisen kielen

käsittelyyn (NLP), vaan tämä oli mahdollista vasta neuroverkkojen avulla. Tietokonenäön (CV) perinteiset kuvanluontimenetelmät olivat rajoitteita kehityksen alkuvaiheissa. Merkittävä läpimurto generatiivisen tekoälymallien kehityksessä tapahtui kuitenkin vuonna 2017, kun uudenlaiset transformeri-mallit otettiin käyttöön. Transformerimallien avulla NLP:n ja CV:n soveltaminen kehittyi huomattavasti ja niitä pystyttiin soveltamaan malleissa, jotka yhdistivät kuva- ja tekstidataa. (Cao ja muut, 2023).

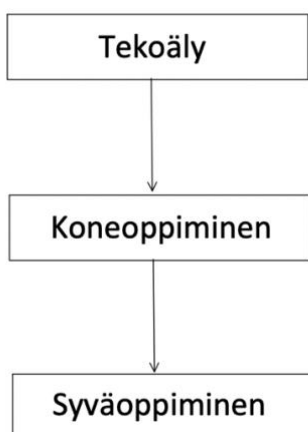
Transformeri-arkkitehtuuri on keskeinen osa monia yleisesti tunnettuja tekoälymalleja, kuten GPT-3 ja DALL-E-2. Arkkitehtuuri koostuu enkoodereista sekä dekodeereista, joista enkooderi muuttaa syötteen sellaiseen muotoon, että dekodeeri pystyy hyödyntämään syötettä tuottaessaan lopullisen ulostulon. Mallin ytimessä on monipäinen huomiointimekanismi, joka painottaa sanoja niiden merkityksen mukaan. Lisäksi rinnakkaisuus transformeri-malleissa tekee niistä tehokkaita ja hyvin soveltuvia laajamittaiseen esikoulutukseen. (Cao ja muut, 2023)

Tekoälyn yleistymisen useilla toimialoilla viime vuosina on mahdollistanut generatiivisen tekoälyn kehitys. Generatiivinen tekoäly viittaa laskennallisiin toimintoihin, jotka ovat kykeneviä luomaan uutta sisältöä, kuten tekstiä, kuvia tai ääniä. Esimerkkinä generatiivisista tekoälymalleista ovat esimerkiksi CoPilot, GPT-3 sekä DALL-E-2. (Feuerriegel ja muut 2024, s. 111). Näitä malleja voidaan käyttää myös älykkääseen keskusteluun ihmisen kanssa. Tekoälyn kehityksen on arvioitu voivan nostaa maailman bruttokansantuotetta jopa seitsemällä prosentilla. Arvioiden mukaan generatiivisen tekoälyn kehitys voi tulevaisuudessa korvata satoja miljoonia työntekijöitä (Feuerriegel ja muut 2024, s. 111). Vaikka generatiivisen tekoälyn yleistyminen tuo huomattavaa lisäarvoa usealle eri toimialalle, aiheuttaa se kuitenkin riskejä ja eettisiä haasteita, mikäli tulevaisuudessa ryhdytään korvaamaan ihminen tekoälysovelluksilla suuressa mittakaavassa.

Viime vuosina AIGC on herättänyt kiinnostusta laajemmassa mittakaavassa, myös ICT-sektorin ulkopuolella. Yhteiskunnan sisällä on seurattu entistä tarkemmin suurten

teknologiayritysten kehittämiä ratkaisuja tekoälymallien kanssa. AIGC terminä viittaa sisältöön, jonka luomisessa on hyödynnetty edistyneitä tekoälymalleja ihmisen sijasta. Näin entistä suurempien sisältömäärien nopea ja tehokas tuottaminen on mahdollista. Esimerkiksi GPT-3- kielimallin kanssa on mahdollista olla vuorovaikutuksessa ihmiselle tyypilliseen tapaan. (Cao ja muut, 2023)

Tärkeä osa-alue tekoälyn kouluttamisessa on koneoppiminen. Se määritellään nykyisin omaksi tieteenalaksi, jonka tarkoituksena on antaa tietokoneille ja ohjelmistoille kyky oppia ilman suoranaista tarvetta ohjelmoinnille. Koneoppimisen tarkoituksena on, että tietokone tai ohjelmisto oppii jatkuvasti suuresta määrästä dataa. Koneoppimisen perustana ovat laskennalliset algoritmit, joita käytetään erilaisten dataongelmien ratkaisemiseksi. Koneoppimisalgoritmit oppivat ajan saatossa tunnistamaan yksityiskohtia opetusaineistosta, soveltaen niitä testidataan ennustamista tai luokittelua varten. (Mahesh, 2019, s. 381). Syväoppiminen on yksi koneoppimisen malli, joka perustuu keinotekoisii neuroverkkoihin. Useimmissa sovelluksissa syväoppimismallit ovat huomattavasti tehokkaampia verrattuna perinteisiin data-analyysimenetelmiin. (Sharifani & Amini, 2023). Tekoälyn ja eri oppimismallien välistä yhteyttä on mallinnettu kuviossa 1, jonka avulla havaitaan syväoppimisen olevan eräs koneoppimisen malli ja koneoppimisen olevan tekoälyn yksi oppimismalli.



**Kuvio 1, Tekoälyn ja oppimismallien välinen yhteys**

Kehityksen myötä kone- ja syväoppiminen ovat nousseet varteenotettaviksi työkaluiksi esimerkiksi kuvankäsittelyssä ja puheentunnistuksessa. Molemmat oppimismallit nähdään vallankumouksellisina teknologioina tekoälyn kehityksen edetessä. Tulevaisuudessa oppimismallit pystyvät entistä paremmin tekemään ennustuksia ja analysoimaan suuria tietojoukkoja tarjoten ratkaisuja, joita ennen ei pystytty saamaan. (Sharifani & Amini, 2023)

## 2.2 Palvelinkeskukset

Palvelinkeskus (myöhemmin datakeskus) on käsitteenä suhteellisen laaja, eikä sille ole olemassa täysin yksiselitteistä määritelmää. Yleisesti datakeskus voidaan kuitenkin määritellä siten, että keskus koostuu useista palvelimista, tietokoneista sekä näihin liitetyistä ohjeisjärjestelmistä. Ohjeisjärjestelmien pääasiallisena tehtävänä on jatkuvasti tallentaa, siirtää ja käsitellä mittavia datamääriä. Datakeskukset ovat suuria digitaalisen infrastruktuurin kokonaisuuksia, joissa on merkittävä määrä laskentatehoa vastaamaan erilaisiin tarpeisiin. (Wu & Buyya, 2015, s. 155). Yksi tarve laskentateholle on tekoäly- ja oppimismallien kouluttaminen ja tekoälyn käytöstä aiheutuvat laskennalliset toiminnot muiden palvelinkeskusten toimintojen lisäksi. Palvelinkeskukset ovat kriittinen osa tekoälyn koulutuksen ja käytön osalta, sillä tekoälyjärjestelmät vaativat suuria määriä laskentatehoa toimiakseen tehokkaasti. Tekoälyn ollessa digitaalinen ohjelmisto, sitä ei olisi olemassa lainkaan ilman datakeskuksia.

Datakeskusten rakenne sisältää tyypillisesti kolme pääkuormitusosastoa: IT-kuormitusosasto, jäähdytys- ja ympäristönohjauslaitteet sekä sisäinen tehonkäsittelyjärjestelmä. IT-kuormitusosasto sisältää esimerkiksi palvelimia sekä fyysistä tallennustilaa. Datakeskuksen energiantarpeeseen sisältyy myös ympäristönvalvonnan sekä vaaditun lämpötilan ylläpitämiseen kuuluva energia. (Ahmed ja muut, 2021). Toimintaperiaatteeltaan datakeskus on kokonaisuudessa toinen päätepiste loppukäyttäjän lisäksi. Keskuksen ja käyttäjän välillä on toimintoja kuten palvelimia, turvallisuustasoja sekä laskennallisia toimintoja. (Mondal ja muut, 2023).

Loppukäyttäjä voi olla esimerkiksi tietokone, matkapuhelin tai mikä tahansa IoT- laite (Internet of things), joka on yhteydessä internettiin. Nämä laitteet lähettävät pyyntöjä keskuksen suoritettavaksi, jotka toimitetaan datakeskuksen edellä mainittujen toimintojen läpi. Keskuksessa suoritetaan laskutoimituksia pyyntöjen pohjalta, huomioiden samalla resurssien riittävyyden ja optimaalisen käytön. (Mondal ja muut, 2023). Yksi käytännön esimerkki loppukäyttäjän lähettämästä pyynnöstä on generatiiviselle tekoälysovellukselle annettu syöte.

Datakeskukset tuottavat toimiessaan lämpöä, jota täytyy säädellä ja hyödyntää. Keskuksissa syntyvän hukkalämmön vuoksi keskuksissa on käytössä erilaisia ilmanvaihtoratkaisuja lämpötilan hallitsemiseksi (Geng, 2014, s. 9). Datakeskusten suunnitteluvaiheessa niiden jäähdytys on keskeinen huomioon otettava tekijä, riippumatta datakeskuksen tyypistä tai koosta. Keskuksen sijainti vaikuttaa merkittävästi jäähdytysratkaisuihin, sillä ympäristön lämpötila sekä muut vallitsevat ilmasto-olosuhteet määrittävät jäähdytyksen tehokkuuden. (Geng, 2014, s. 190).

Tyypillisesti keskusten suurin virrankuluttaja on IT-kuormitusosasto. Datakeskuksessa erityisesti IT-kuormitusosaston laitteet tuottavat huomattavan määrän hukkalämpöä. IT-laitteet ovat herkkiä lämpötilan ja kosteudenvaihteluille, joten rajoitetut ja säännölliset olosuhteet konesalissa ovat välttämättömät moitteettoman toiminnan takaamiseksi. Suuren lämmönmuodostuksen sekä laitteiston vaatimien säännöllisten olosuhteiden vuoksi erityisesti IT- kuormitusosaston täytyy jatkuvasti olla valvonnan alla. (Ahmed ja muut, 2021).

Globaalin datansiirron ja digitaalisten palveluiden kysynnän ennustetaan kasvavan keskeytyksettä tulevaisuudessa, mikä edellyttää yhä useampien datakeskusten rakentamista vastaamaan lisääntyvään dataliikenteeseen. Samalla datakeskusten kokonaisenergian tarve kasvaa, aiheuttaen lisää ympäristökuormaa.

### 2.3 Tekoälyn ympäristövaikutukset

Tekoälyjärjestelmät eivät suoranaisesti aiheuta päästöjä koulutus- ja käyttövaiheiden aikana. Pääasiallisesti syntyvät päästöt aiheutuvat epäsuorasti palvelinkeskuksissa, joissa laskennallisten toimintojen suorittaminen tapahtuu. Näin ollen tekoälyn ympäristövaikutuksia käsitellessä painopiste siirtyy erityisesti palvelinkeskuksiin, joiden energiankulutus on keskeinen tekijä tekoälyn ympäristövaikutusten määrittelyssä. Tekoälyn toiminta onkin täysin riippuvainen datakeskusten digitaalisesta infrastruktuurista. Tekoälyn ympäristövaikutuksiin tulee myös sisällyttää ICT-infrastruktuurin aiheuttamat päästöt, joten energiankulutus datakeskuksissa ei yksinään ole negatiivisten ympäristövaikutuksen aiheuttaja.

Tekoälyn entistä tehokkaampi kouluttaminen sekä uudet oppimismallit ovat edesauttaneet suuriin edistysaskeliin tekoälyn kehityksen edetessä. Kuitenkin on huomioitava, että kone- ja syväoppimismallien kouluttaminen kuluttaa huomattavia määriä energiaa globaalisti jo nyt. Tekoälyn jatkuvasti saavuttaessa useampia käyttökohteita, voidaan energiankulutuksen olettaa nousevan huomattavasti tulevina vuosina. Oppimismallien kouluttaminen vaatii energiaa suorittaakseen laskutoimituksia koulutuksen aikana, tämä energiankulutus lisää samassa suhteessa tekoälyn kokonaisuudessaan aiheuttamia hiilidioksidipäästöjä. Energiankulutuksesta aiheutuneiden hiilidioksidipäästöjen määrä riippuu sekä käytetyn energian määrästä, että energianlähteestä.

Tekoälymallien elinkaaren aikana hiilidioksidipäästöt koostuvat koulutuksen aikana aiheutuneista sekä jatkuvan käytön aiheuttamista päästöistä. Lisäksi palvelinkeskuksissa laitteiston rakentaminen, käyttö sekä ylläpito aiheuttaa jatkuvasti kasvavia hiilidioksidipäästöjä sähkönkulutuksen ja laitteiston vuoksi. Sähköenergian kulutus ei kuitenkaan ole ainoa päästöjen aiheuttaja suhteessa kaikkiin tekoälyn hiilidioksidipäästöihin, sähköenergiaa tuottavia voimalaitoksia käytetään jossain määrin

fossiilissa polttoaineilla, joka osaltaan on huomattava tekijä lisäämään päästöjen kvantiteettia. (Kirkpatrick, 2023, s. 17).

Jokaisella digitaalisella ohjelmistolla tai sovelluksella on hiilijalanjälkensä, eli laskettavissa olevat hiilidioksidipäästöt. Hiilijalanjäljen määrittäminen ei kuitenkaan ole täysin yksiselitteistä. Tekoälyn koulutus- sekä käyttövaiheessa aiheutuneiden päästöjen lisäksi on tarkasteltava esimerkiksi laitteiston valmistuksen sekä niiden elinkaaren päättymisen suhteen. Koska tekoälyn käytön itsessään aiheuttamat hiilidioksidipäästöt eivät ole yksiselitteisiä, varmintä on tarkastella sitä osana ICT-sektorin päästöjä. (Kirkpatrick, 2023, s. 17). ICT-sektorin aiheuttamat kokonaispäästöt koostuvat henkilökohtaisten tietokoneiden sekä palvelinkeskusten laskentakäytöstä, internetin käytöstä sekä sähköpostiviestinnästä (Mageswari ja muut, 2022, s. 340). ICT-sektorin tuottamat päästöt olivat noin 1,4 % maailman hiilidioksidipäästöistä vuonna 2020. Laskennallisesti ICT-sektorin päästöt olivat yhteensä 764 miljoonaa tonnia hiilidioksidiekvivalenteja (Malmodin ja muut, 2024).

Tekoälyn käytöstä aiheutunut hiilijalanjälki on arvioitu 1,8 –2,8 % suuruiseksi ICT-sektorin aiheuttamien päästöjen kokonaismäärästä (Kirkpatrick, 2023, s. 17), siten tekoälyn arvioitu ympäristökuorma olisi noin 0,3% kaikista globaaleista hiilidioksidipäästöistä. Laskennallisesti aineiston pohjalta tekoälyn kokonaisuudessaan aiheuttamat hiilidioksidipäästöt ovat siis noin 17,5 miljoonaa tonnia hiilidioksidiekvivalenteja. Yhden NLP-oppimismallin kouluttaminen tuottaa 284 000 kilogramman edestä hiilidioksidiekvivalenteja, tämä vastaa viiden henkilöauton koko elinkaaren aiheuttamaa ympäristökuormaa. (Strubell ja muut, 2019). Tätä arviota oppimismallin kouluttamisen aiheuttamista päästöistä verrattaessa aiemmin arvioituihin tekoälyn aiheuttamiin kokonaispäästöihin, saadaan yhden oppimismallin koulutuksesta aiheutuneiden päästöjen osuudeksi 1,6 % tekoälyn aiheuttamista kokonaispäästöistä, joten voidaan todeta arvion olevan oikeansuuntainen, sillä oppimis- ja tekoälymalleja on lukuisia ja niitä käytetään ja koulutetaan jatkuvasti kasvavissa määrin. Aineistoihin

perustuvan tiedon luotettavuutta arvioidessa tulee huomioida, ettei päästöjen tai energiankulutusten arviointi ole yksiselitteistä, laskennalliset arviot toimivat tässä tutkielmassa suuntaa antavina tarkastellessa tekoälyn aiheuttaman ympäristökuorman suuruusluokkaa.

Koko ICT- sektorin käyttämä sähköenergian tarve on 4 % vuotuisesta sähköenergian kulutuksesta maailmanlaajuisesti. Globaali sähköenergiankulutus vuosina 2022 ja 2023 on ollut noin 25 000 TWh (Malmodin ja muut, 2024). Aineiston pohjalta arvioitu ICT- sektorin sähkönkulutus on noin 1000 TWh, josta tekoälyn osuus olisi arviolta 23 TWh jos käytetään arvioita päästöistä, todellisuudessa tekoälyn koulutus ja käyttö aiheuttaa myös muita epäsuoria hiilidioksidipäästöjä esimerkiksi laitteiston ja energianlähteen kestävyiden osalta, joten tämä nimenomainen arvio kokonaisenergian tarpeesta on todennäköisesti suurempi.

Maailmanlaajuisesti datakeskusten itsessään energiantarve on noin kaksi prosenttia kaikesta globaalisti energiasta (Ajayi, 2021). Ottaen huomioon koko ICT- sektorin käyttämän sähköenergian määrän, voidaan havaita datakeskusten käyttävän noin puolet koko sektorin energiantarpeesta. Kirkpatrickin (2023, s. 17) arvioon koko tekoälyn päästöistä sisältyy tekoälyn käytöstä- ja koulutuksesta itsessään aiheutuvat päästöt, joten datakeskuksissa epäsuorasti tekoälyn aiheuttamat päästöt lukeutuvat samaan arvion viitekehukseen. Lisäksi datakeskusten vastuulla on globaalisti muitakin lukuisia tehtäviä ICT- sektorilla tekoälymallien koulutuksen ja käytön lisäksi, joten datakeskusten kokonaispäästöjen arvioinnolla ei tämän tutkielman rajauksen puitteissa ole merkittävää arvoa.

## **2.4 Kestävä tekoäly & tulevaisuuden visiot**

Globaaleihin kokonaispäästöihin verrattuna tekoälyn aiheuttamat päästöt ovat maltillisia, kestävä kehityksen näkökulmasta on kuitenkin tärkeää kehittää niitä entistä kestävämmiksi. Ottaen huomioon, että päästöt riippuvat merkittävästi käytetystä

energiälähteestä, kaiken tekoälysovellusten laskennan keskittäminen uusiutuvaa energiaa hyödyntäviin datakeskuksiin voi pienentää päästöjä tulevaisuudessa.

Yksi keskeinen strategia tekoälyn energiatehokkuuden parantamiseksi on tekoälymallien tehostaminen siten, että mallin koulutukseen sekä päättelykykyyn tarvittavia laskennallisia resursseja voidaan vähentää. Kouluttamisen energiatehokkuuden optimointiin on jo olemassa tekniikoita, kuten mallien karsiminen ja kvantisointi. Karsiminen tarkoittaa tarpeettomien parametrien poistamista oppimismallien rakenteesta vähentäen laskennallista kuormitusta, kuitenkin vaikuttamatta oleellisesti käytössä olevaan suorituskykyyn. Kvantisointi edistää tehokkuutta mallin oppimisprosessissa muuntamalla korkean tarkkuuden toiminnot matalamman tarkkuuden muotoihin, mikä osaltaan myös vähentää laskennallisia vaatimuksia sekä muistin käyttöä. (Chen, 2023).

Optimointitekniikat eivät pelkästään vähennä tekoälyjärjestelmien aiheuttamaa energiankulutusta, samalla parannetaan käyttöönoton tuotettavuutta laitteistoissa, joissa resurssit laskutoimituksia varten ovat matalammat. (Chen, 2023). Tekoälyn hiilidioksidipäästöjen vähentäminen ei rajoitu siis ainoastaan energian aiheuttamaan hiilijalanjälkeen, hyötyjä saadaan myös välillisesti, kun laitteistoa ei tarvitse uusia jatkuvasti. Valmiiksi tuotettua ja asennettua ICT- infrastruktuuria voidaan käyttää entistä kauemmin.

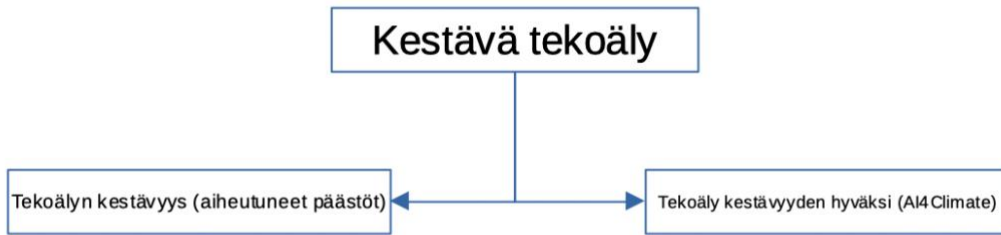
ICT- laitteistolla on merkittävä vaikutus tekoälyjärjestelmien energiatehokkuuden parantamisessa. Oikein optimoidut laitteet tarjoavat entistä kestävämpiä ja tehokkaampia laskennallisia prosesseja, jotka on mukautettu suorittamaan tiettyjä tehtäviä. Mukautetut grafiikkasuorittimet sekä ohjelmoitavat porttiryhvät ovat esimerkkejä laitteistosta, joka on optimoitu käsittelemään tekoälykuorman tehokkaammin, kun tavalliset yleiskäyttöiset suorittimet. Mukautettujen suorittimien on mahdollista suorittaa samanaikaisesti tuhansia laskutoimituksia, mikä on tärkeää erityisesti koulutettaessa syväoppimismalleja. Näiden laitteiden jatkuva kehittäminen on

tärkeää tekoälysovellusten skaalaamiseksi. (Chen, 2023). Laitteiston jatkuva uusiminen on kuitenkin ristiriidassa mahdollisimman pitkäaikaisen laitteen elinkaaren kanssa. Vaikka kvantisointi ja karsiminen mahdollistavat vanhemman laitteiston hyödyntämisen tekoälylaskennassa, uusien ja mukautettujen laitteistojen käyttö on energiatehokkaampaa. Tämä luo dilemman laitteiston pitkän elinkaaren tavoitteen ja uusien laitteiden valmistuksen ympäristövaikutusten välillä.

Omana tutkimusalanaan kestävä tekoäly on vielä suhteellisen uusi. Nykyään kestävästä tekoälystä voidaan puhua kattoterminä, jota voidaan soveltaa tekoälyn teknologiaan huomioiden samalla kestävyteen liittyviä kysymyksiä. Tekoälyn teknologian kestävyyttä analysoidessa tulee huomioida vaadittava laitteisto, koulutusmenetelmät sekä datankäsittely. (Van Wynsberghe, 2021, s. 214).

Kiertotalousajattelun vuoksi tekoälyn kestävyttä tulee kuitenkin analysoida koko sen elinkaaren eli suunnittelun, koulutuksen, käyttöönoton ja varsinaisen käytön kestävyden osalta. Kattotermin alle lukeutuu siis tekoälyn kestävyys sekä tekoälyn edistämä kestävyys. Yksi vakiintunut tekoälyn soveltamisalue on ”Tekoäly kestävä kehityksen tukena”, jonka tarkoituksena on pyrkiä hyödyntämään sekä tekoälyä että koneoppimista tavoitteiden saavuttamiseksi. Yksi tunnettu voittoa tavoittelematon organisaatio AI4Climate edustaa tätä suuntausta. (Van Wynsberghe, 2021, s. 124 ).

Van Wynsberghe:n (2021, s. 124) mukaan tekoäly ja ML ovat työkaluja, joilla on mahdollista saavuttaa edullisemmän ja puhtaamman energian toimittaminen suurelle osalle maailman väestöstä, mutta dilemma suuren energiankulutuksen suhteen aiheuttaa ongelmallisuuksia tavoitteen saavuttamisen suhteen. Tekoälyn kestävyden arvioinnin kaksijakoisuutta on mallinnettu kuviossa 2, jossa kattotermin alle lukeutuu sekä tekoälyn eksakti kestävyysarviointi, sekä tekoälyn hyödyntäminen kestävyden edistämisessä.



**Kuvio 2, Kestävän tekoälyn kaksijakoisuus, (Mukaiillen Van Wynsberge, 2021, s. 124)**

Termin ongelmallisuuden vuoksi kestävään tekoölyyn sisältyy selkeitä jännitteitä uusien tekoölyinnovaatioiden sekä kestävä kehityksen tavoitteiden välillä. Suurin ongelma kestävyyttä arvioidessa kohdentuu tekoälyn koulutuksen ja käytön kestävyiden analysointiin. Globaalisti tekoölykeskustelussa tulisi käsitellä myös eettisiä kysymyksiä ympäristön ja talouden jännitteiden lisäksi. Tekoälyn ei voida antaa käyttönsä ja kehityksensä myötä tehdä yhteiskunnasta kestävämpää, sen käyttäminen ja implementoinnin laajuus on valinta, jonka yhteiskunta tekee ajan kuluessa. Tekoälyn kehityksen edetessä on huolellisesti valittava ne arvot, joista halutaan pitää kiinni, siten voidaan varmistaa tekoälyn kehitys tavalla joka tukee näitä arvoja. (Van Wynsberge, 2021, s. 215)

Datakeskusoperaattorit pyrkivät saavuttamaan kestävämmän imagon hyödyntämällä monipuolisesti uusiutuvia energialähteitä, kuten paikallista tuuli- ja aurinkovoimaa tai sertifioitua vihreää sähköä sekä optimoimalla sähkönkäyttöään uusiutuvan tuotannon mukaan (Wahlroos ja muut, 2018). Vaikka datakeskusten energiankulutuksen odotetaan kasvavan, innovaatiot mahdollistavat niiden luotettavuuden ja energiatehokkuuden parantamisen ilmastovaikutusten hillitsemiseksi (Ahmed ja muut, 2021). Myös arktiset alueet on nähty potentiaalisina sijainteina optimaalisen jäähdytyksen kannalta (Liu ja muut, 2020, s. 280).

Tekoälyn elinkaariarvioinnin voidaan ajatella sisältävän kolme päävaihetta - Valmistus, käyttö- ja loppuvaihe. Valmistusvaiheeseen sisältyy mm. raaka-aineiden louhinta,

laitteiston valmistus sekä logistiset toimenpiteet. Käyttövaihe alkaa tekoölymallien kouluttamisella, jatkuen ylläpitoon ja päättelyvaiheisiin. Loppuvaiheessa tekoölymalli on tullut elinkaarensa päätökseen. Jokaisessa elinkaaren päävaiheessa syntyy päästöjä, joten vain ymmärtämällä näitä kaikkia yhteisvaikutuksia sidosryhmät voivat kehittää strategioita kestävämmän tulevaisuuden varalle, sisältäen energian optimoinnin ja laitteiston käyttöiän pidentämisen aiheuttaman päästöjen vähenemisen. (Huang, 2024, s. 10)

Tulevaisuudessa suuntaviivat tekoölyn päästöjen vähentämisessä sisältävät lukuisia haasteita. Vaikka päästöjä voitaisiin vähentää esimerkiksi energiatehokkaammalla laitteistolla, epälineaarinen hiilidioksidipäästöjen kasvu voi pahimmillaan lisätä kokonaispäästöjä. Myös energiatehokkuus on vielä ongelma erityisesti datakeskuksissa tekoölyn aiheuttamien paikallisten kuumien pisteiden vuoksi, mikä omiaan laskee sähkönkäytön tehokkuutta lisäten päästöjä. Usein huomaamatta jää siirtokustannukset, joita energian siirto aiheuttaa datakeskuksissa. Maailmanlaajuisesti alueelliset sääntelyerot tuovat oman haasteensa yhdenmukaisen analysoinnin suorittamiseksi. Tekoölylaitteistoon upotettu hiili lisää myös elinkaariarviointien kompleksisuutta, mikä tarkoittaa tekoölyn epäsuorasti aiheuttamia päästöjä myös laitteiston osalta. (Huang, 2024, s. 15)

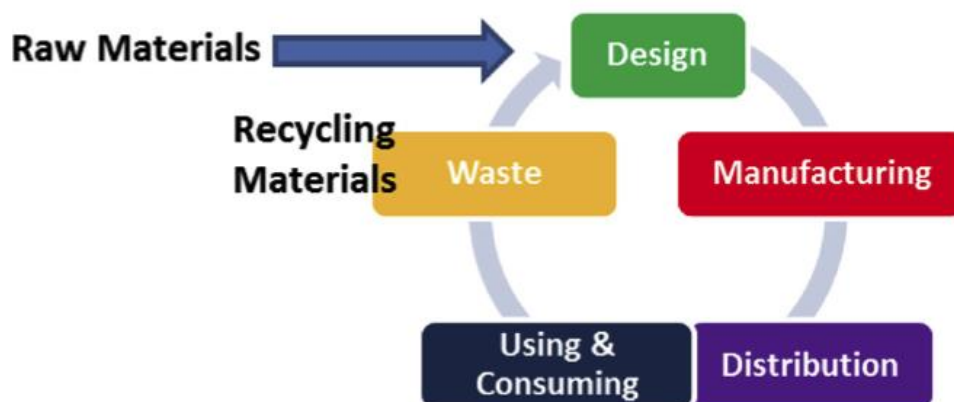
Tällä hetkellä nousevat trendit ja suuntaviivat tulevaisuudelle sisältävät uusiutuvan energian käyttöönoton entistä laajemmassa mittakaavassa, siirtyminen kestävämpiin energianlähteisiin muuttaa kokonaistoiminnot kestävämmiksi. Huangin (2024, s. 15) mukaan kehittyvät energianvarastointitekniikat sekä edistynyt litiumioni tekniikka akustoissa näyttelevät merkittävää osaa uusiutuvan energian varastoinnissa ja luotettavuuden parantamisessa. Tekoöly pystyy kuitenkin itse auttamaan energianhallintajärjestelmiä optimoiden mikroverkkojen resurssien tasaisen käytön ja siten päästöjen vähenemisen. Älykäs integrointi ja kehittynyt mittausrakenteet mahdollistaa energiankulutuksen optimoinnin dynaamisesti vuorovaikutuksessa isompien verkkojen kanssa. (Huang, 2024 s. 15)

### 3 Kiertotalous

Tämän osion tarkoituksena on määritellä kiertotalous käsitteenä, mitä siihen sisältyy ja kuinka sen periaatteita on mahdollista soveltaa tekoälyn suhteen. Lisäksi syvennyttään digitaaliseen kiertotalouteen sekä datakeskusten kiertotalousratkaisuihin. Käytännön esimerkkinä kiertotalouden periaatteiden hyödyntämisestä käytetään Microsoftin datakeskushanketta Espoossa, joka on parhaillaan rakennusvaiheessa. Lopuksi tarkoituksena on tarkastella, mille kaikille osa-alueille kiertotaloutta voidaan soveltaa datakeskusteollisuudessa laajemmin.

#### 3.1 Kiertotalouden määritelmä, pääperiaatteet ja energiantransitio

Kiertotalous määritellään taloudelliseksi kehitysmalliksi, joka koostuu materiaalien toistuvasta kierrosta. Termin alle lukeutuu myös määritelmä taloudellisesta tuotanto- ja kulutusmallista, joka pyrkii hyödyntämään resurssit mahdollisimman laajasti, jotta resurssien kokonaiselinkaari pitenee (Euroopan Parlamentti, 2023). Kiertotalouden perusajatusta on havainnollistettu kuviossa 3 rengasmallin avulla.



Kuvio 3, Kiertotalouden rengasmalli, (Olabi, 2019, s.451)

Pääperiaatteita kiertotaloudelle ovat järjestyksessään: Vähennä, uudelleen käytä sekä kierrätä. Nämä kolme pääperiaatetta muodostavat pohjan kiertotalouden perusajatukselle. Vähentämisellä tarkoitetaan lähestymistapaa, joka huomioi resurssien kulutuksen sekä jätteen vähentämisen tuotannon, kulutuksen sekä jakelun prosesseissa. Uudelleenkäyttö perustuu prosessien aikana syntyneen jätteen käyttämiseen jossain valmistus- tai käyttöprosessin vaiheessa, esimerkiksi korjaukseen, kunnostamiseen tai uudelleen valmistukseen. Uudelleenkäyttöperiaate edellyttää toimiakseen optimaalista kierrätysmekanismia. Kierrätysperiaate viittaa taas jätteen suoranaiseen kierrättämiseen elinkaaren aikana. Periaatetta voidaan hyödyntää sekä primäärisesti, että sekundäärisesti. Primäärinen resurssien hyödyntäminen tarkoittaa, että jätteestä valmistetaan uusi, alkuperäistä vastaava tuote. Sekundäärinen resurssien hyödyntäminen tarkoittaa jätteen lajittelua eri raaka-aineiksi, joista voidaan tuottaa myös erityyppisiä tuotteita. (Zhang, 2022, s. 3).

Kiertotalouden ytimessä on tuotteiden sekä resurssien uudelleenvalmistus- ja käyttö. Nämä toiminnot vaativat vähemmän energiaa ja raaka-aineita verrattuna perinteiseen matala-asteiseen kierrättämiseen. Resurssien arvon säilyminen tulisi maksimoida. Arvon säilyminen sisältää esimerkiksi resurssien talteenoton uusiokäyttöä tai kunnostusta varten. Viimesijainen keino kierrättämiselle tulisi olla pelkkä raaka-aineiden kerääminen, joka on perinteisen kierrätysajattelun pohja. Kiertotalouden periaatteiden mukainen energiantuotanto ei suosi polttamista, jonka tulisi olla toiseksi viimeinen vaihtoehto. Viimeinen vaihtoehto tuotteiden tai resurssien elinkaaren aikana on kiertotalouden mukaan kaatopaikka. Toimimalla näin tuotteiden sekä resurssien elinkaari säilyttää mahdollisimman korkean laadun ja arvon ollen samalla pitkäikäisiä sekä energiatehokkaita. (Korhonen ja muut, 2018, s. 38)

Lineaarinen talousmalli on vastakohta kiertotaloudelliselle talousajattelulle. Parhailaan globaalisti noin 75 % energiantuotannosta perustuu uusiutumattomiin louhittuihin energianlähteisiin, joista energiaa saadaan polttamalla. Palaminen prosessina vapauttaa ilmakehään päästöjä pitoisuuksina, joita ympäristö ei siedä (Korhonen ja muut, 2018, s.

40). Kiertotalouden soveltamisesta saatavat hyödyt ovat merkittäviä: ympäristön suojeleminen, päästöjen väheneminen sekä yleisesti tehokkaampi ja kestävämpi resurssien käyttö auttaa vähentämään negatiivista ympäristövaikutusta elinkaaren aikana.

Kiertotalouden periaatteet ovat sovellettavissa myös energiankulutuksen- ja käytön suhteessa. Energiatransitio kohti uusiutuvia energialähteitä on kuitenkin määrittelyltään erilainen kiertotalouteen nähden. Näillä viitekehyksillä on kuitenkin samankaltaiset päämäärät. Sekä kiertotalousmalli, että energiatransitio periaatteena pyrkii energian kestäväan tuotantoon ja kulutukseen. Mallien pohjalla on huoli ympäristöstä, kestävästä kehityksestä sekä talouskasvusta. Näiden tavoitteiden saavuttaminen on mahdollista kahdessa eri ulottuvuudessa, tuottamistapojen sekä kulutustottumusten muuttumisella. (Okafor ja muut, 2021, s. 652).

Energiatransition osalta on kyse tuotantojärjestelmien muuttamisesta siirtymällä hiileen tukeutuvista energialähteistä uusiutuviin vaihtoehtoihin. Kiertotalouden ytimessä on ajatus uudelleenkäytöstä ja resurssien tehokkaasta ja kestävästä hyödyntämisestä. Kiertotalouden periaatteen tavoite resurssien tehokkaasta käytöstä on kriittinen mahdollistaja innovatiivisten energiatransitoratkaisujen lisäämiselle. (Okafor ja muut, 2021, s. 652). Kiertotalouden periaatetta voidaan soveltaa kuitenkin energiatransition tarkoituksiin tilanteissa, kun uusiutuvaan energiaan nojaavien energialähteiden käyttö optimoidaan tehokkaasti ja mahdollinen energiahävikki saadaan minimoitua.

Mainittujen toimien lisäksi kiertotalouden sekä energiatransition onnistumiseksi edellytetään laajoja yhteiskunnallisia muutoksia tavoitteiden saavuttamiseksi. Kiertotalouden osalta nämä ovat tuottajan vastuuta sekä vapaiden markkinoiden sisältämiä markkinamekanismeja. Energiatransition osalta taas erilaisia kannustimia sekä mahdollisia verovähennyksiä uusiutuvan energian innovaatioihin. Lisäksi periaate energiategokkuudesta sisältäen energiaa säästäviä laitteita sekä uusia teknologioita on tärkeää tavoitteiden saavuttamiseksi. (Okafor ja muut, 2021, s. 652).

Kestävä kehitys pohjautuu systeemiajattelulle, joka korostaa sosiaalisten sekä teknisten järjestelmien yhteistä kehitystä. Sosiaalisten- ja teknisten järjestelmien yhteiskehitys on mahdollista, kun olemassa olevaa järjestelmää muokataan (energiatransitio) ja lopputuloksena saadaan malli uudentaloudelle toiminnalle lineaarisen mallin sijasta (kiertotalous). (Okafor ja muut, 2021, s. 661). Sosiaaliset ja tekniset järjestelmät siis yhdistävät kiertotalouden ja energiatransition toisiinsa.

### **3.2 Digitaalinen kiertotalous & tekoäly**

Tekoälyn toiminnan riippuvuus digitaaliseen infrastruktuuriin aiheuttaa energiankulutuksen ja ympäristökuormansa vuoksi ongelmia kiertotalouden näkökulmasta. Ympäristökuormaa lisää osaltaan myös digitaaliseen transformointiin liittyvät materiaalit, kuten sähkö- ja elektroniikkaromu. Tällä hetkellä globaalisti ICT-sektori tuottaa sähkö- ja elektroniikkaromua vuosittain yli 50 miljoonaa tonnia, josta kierrätetään asianmukaisesti vain noin 20 %. On ennustettu, että vuoteen 2050 mennessä romun määrä nousee 120 miljoonaan tonniin. (Fraga-Lamas ja muut, 2021, s. 3).

Digitaalisten teknologioiden jatkuva lisääntyminen edellyttää uudenlaisia sovelluksia digitaalisen infrastruktuurin sovittamisesta kiertotalouden periaatteisiin. Painopiste digitaalisessa kiertotaloudessa on tällä hetkellä energiatehokkuudessa ja kyberturvallisuudessa. Kiertotalouden skaalaamista IT-sektorille edesauttaa uudet digitaaliset teknologiat, sillä ne auttavat uusien liiketoimintamallien sekä kiertotalouden toimitusketjujen edellyttämän tiedon luomisessa. Lisäksi uudenlaiset tekniikat voivat kasvattaa läpinäkyvyyttä ja tietoa, jotka nyt hidastavat digitaalisen kiertotalouden kehittymistä. (Fraga-Lamas ja muut, 2021, s. 3 – 4)

IT- sektorilla tekoälyllä on merkittävä rooli digitaalisen kiertotalouden edistämisessä. Tekoälymallien energiatehokkuuden parantaminen on kestävyiden osalta kriittinen osa kohti laajempaa kestävyysajattelua. Energiatehokkaat tekoälymallit voivat olla luomassa

perustan tekoälyn edellytykselle toimia osana kestävämpää teknologiaa. (Dash, 2025) Tulevaisuudessa tekoälyn energiatehokkuutta ja siten kestävyttä voidaan edistää hajautetuilla IoT- arkkitehtuureilla, joka osaltaan vähentää laskennan energiankulutusta (Fraga-Lamas ja muut, 2021). Panostaminen energiatehokkuuteen onkin välttämätöntä, mikäli voidaan maksimoida tekoälyn potentiaali digitaalisen kiertotalouden edistämisessä.

### **3.3 Kiertotalouden rooli palvelinkeskuksissa**

Keskeisiä kiertotalouteen liittyviä teemoja datakeskuksissa ovat hukkalämmön säätelyyn ja jakeluun liittyvät seikat sekä nopean kehityksen aiheuttamat kierrätysongelmat laitteiston kanssa. Laitteistoa kehitettäessä rajoittava tekijä käyttöiän pituudessa on usein käytettävä ohjelmisto, eikä niinkään itsessään laitteiston fyysiset laskennalliset ominaisuudet. Tämänkaltaisen käytännön laitteistojen suhteen johtaa entistä suurempiin sähkö- ja elektroniikkajätteen määrään datakeskuksissa. Kiertotalouden näkökulmasta on myös ongelmallista, että valtaosa elektroniikkajätteestä päätyy kehittyviin maihin, joissa kierrätys ja muu jätteidenkäsittely on usein sääntelemätöntä ja mahdollisesti ympäristöä vahingoittavaa. (Andrews ja muut, 2021, s. 16).

Kiertotalouden toteuttaminen datakeskuksissa laitteiston osalta on toistaiseksi haastavaa. Ongelmat ovat moniulotteisia ja ainutlaatuisia. Tämän kaltaiset haastavat ongelmat vaativat kokonaisvaltaisesti innovatiivista lähestymistapaa muutoksen mahdollistamiseksi. Elinkaariajattelun vuoksi on ensiarvoisen tärkeää huomioida, että päätökset ja toimenpiteet jokaisessa elinkaaren vaiheessa vaikuttavat kaikkien muiden elinkaaren vaiheiden kestävyteen. (Andrews ja muut, 2021, s. 17). Muutosta kohti kiertotalousmallia datakeskuksissa edesauttavat projektit, joita on aloitettu muutoksen nopeuttamiseksi, esimerkiksi CEDaCI (Circular Economy for the Data Centre Industry) -projekti.

Datakeskusten innovatiivisia kiertotalousratkaisuja ajatellessa voidaan käsitellä niitä design- ajattelu sekä tuplatimantti- viitekehyksien avulla. Viitekehykset määrittellään käytännönläheisiksi käyttäjäkeskeisiksi ideologioiksi, jotka määrittelevät ongelmat uudelleen luodakseen samalla innovatiivisia ratkaisuja. Mallit ovat nykyisellään osoittautuneet menestyksekkäiksi useilla aloilla, koska niiden ytimessä on innovointia haittaaviin vinoumiin pohjautuminen. Viitekehykset ovat siis tehokkaita työkaluja erityisesti kiertotalouden periaatteiden soveltamisesta. (Andrews ja muut, 2021, s. 8 - 9).

Viitekehyksiä voidaan suoranaisesti hyödyntää datakeskuksissa tunnistamalla haasteet ja kartoittamalla mahdollisuuksia ratkaisujen välillä, myös ongelmien määrittely ja tavoitteiden asettaminen on hyödyllistä ajatellessa näiden viitekehyksien pohjalta. Muita keinoja kiertotalousajattelun pohjalle datakeskuksissa näiden viitekehysten pohjalle ovat ideointi, laajamittainen testaus ja prototyyppien valmistaminen sekä laajan iteroinnin pohjalta saadun palautteen hyödyntäminen ja jatkuva kehitystyö kiertotalousajattelun mukaisesti. (Andrews ja muut, 2021, s. 10)

Kiertotalousajattelu datakeskuksissa yhdistetään usein syntyneen hukkalämmön hyödyntämiseen rakennusten lämmityksessä. Hukkalämpöä voidaan hyödyntää suoraan lämmön toimittamiseen rakennuksiin lähialueilla, jotta voidaan vähentää kaukolämmön tai fossiilisten polttoaineiden kulutusta lämmityksessä. (Lu ja muut, 2024). Taloudellisesta- ja ympäristönäkökulmasta suoritettu analysointi osoitti, että hukkalämmön uudelleenkäytön osalta eräässä toimistorakennuksessa fossiilisen maakaasuun kulutusta pystyttiin vähentämään jopa 15 000 kuutiometriä vuoden aikana. (Lu ja muut, 2024).

Datakeskusten jäähdytys voidaan toteuttaa useammalla eri tavalla, yleisimmin käytetty ilmastoinnilla toteutettu ei ole energiatehokasta nykyajan suurissa datakeskuksissa. Kehitteillä olevat jäähdytysteknologiat kuten nestejäähdytys sekä vapaajäähdytys ovat syrjäyttämässä ilmajäähdytyksen tulevaisuudessa. Nestejäähdytys mahdollistaa tehokkaan hukkalämmön talteenoton entistä korkeammassa lämpötiloissa.

Vapaajäähdytys on yleistymässä erityisesti maailman pohjoisissa datakeskuksissa, joissa matalia ulkolämpötiloja voidaan hyödyntää entistä tehokkaammin. (Wahlroos ja muut, 2018)

### 3.4 Microsoftin palvelinkeskus & kiertotalousratkaisut

Käytännön esimerkkinä datakeskusten kiertotalousratkaisuista tutkielmassa käytetään Microsoftin datakeskusta, jota parhaillaan rakennetaan Espooseen. Hankkeen ajoitettu valmistuminen on vuonna 2031, tällä hetkellä suoritetaan esirakennustehtäviä sekä ensimmäisen datakeskusrakennuksen rakentamista. Yhteensä alueelle valmistuu neljä datakeskusrakennusta, joiden syntyvää hukkalämpöä tullaan käyttämään alueellisesti Espoon ja lähikuntien alueilla. Tulevaisuudessa keskus muodostaa yhdessä kahden muun Etelä-Suomen datakeskuksen kanssa yhden suurimmista ICT- alan investoinneista Suomessa. Hanke on maailmanlaajuisesti varteenotettava esimerkki kiertotalousmallin hyödyntämisestä datakeskuksissa. (YVA - Arviointiseloste, *Espoon Datakeskus*, 2024, s. 6).

Lähdemateriaalina on pääasiassa käytetty Ympäristöhallinnon ympäristövaikutusten arviointimenettelyä, jota sovelletaan sellaisissa hankkeissa, jotka todennäköisesti vaikuttavat haitallisesti ympäristöönsä (*Ympäristövaikutusten arviointi*, n.d.). YVA:n tueksi esitetty tieteellinen lähdemateriaali on tuotu tieteellistä lähdemateriaalia, joten kriittisesti arvioiden perustiedon hankkimiseen voidaan käyttää ei- tieteellistä lähdeaineistoa käsitellessä nimenomaista datakeskusta esimerkinomaisesti. Tieteellisen lähdemateriaalin niukkuuden vuoksi liittyen tähän nimenomaiseen datakeskushankkeeseen ympäristöhallinnon arviointimenettelyä voidaan pitää relevanttina lähdemateriaalina, kun haetaan vain taustatietoa hankkeen yhtymäkohdista tutkielmassa käsiteltävään aiheeseen. YVA on lakisääteinen menettely, joka pohjautuu tieteelliseen faktapohjaan sekä asiantuntija-arvioihin, rajoittavana tekijänä YVA:ssa on kuitenkin sen keskittyminen vain tietyn hankkeen ympäristövaikutusten arviointiin, vaikka analyysillä onkin teoreettinen pohja.

Datakeskuksilla on merkittäviä ympäristövaikutuksia laajemmassakin ulottuvuudessa lukuisilla eri osa-alueilla, kuten maaperän tai vesistöjen kannalta, mutta tutkielman aiheen rajaamisen vuoksi on tarpeellista käsitellä kiertotalousratkaisuja, jotka välillisesti tai välittömästi ovat yhteydessä tekoälyn tai datakeskusten ympäristökuorman vähentämiseen tai niiden kiertotalousratkaisuihin. Datakeskuksessa vaadittava energiatehokkuus saavutetaan uudella suunnittelulla, joustavilla ICT- järjestelmillä, tehokkaalla ilmanvaihtosuunnittelulla sekä mekanismeilla, jotka minimoivat sähkönjakeluhäviöitä mahdollisimman tehokkaasti. Hankkeen IT- kapasiteetti on laskennallisesti 211,35 megawattituntia, sisältäen koko keskuksen käyttämän sähköenergian. (YVA - Arviointiseloste, Espoon Datakeskus, 2024, s. 23)

Jäähdytykseen datakeskuksissa käytetään suoraa ilmajäähdytystä (YVA - Arviointiseloste, Espoon Datakeskus, 2024, s. 23). Kyseinen jäähdytysmuoto on yksi vapaajäähdytyksen malli, Wahlroosin ja muiden (2018) mukaan vapaajäähdytys on vesijäähdytyksen kanssa syrjäyttämässä perinteiset ilmastointimenetelmät. Suora ilmajäähdytys on tehokas tapa jäähdyttää laajoja datakeskuksia perinteisen ilmastoinnin sijasta, jäähdytysilma otetaan talteen ulkoilmasta ja se kostutetaan, jotta lämpötila ja kosteus ovat optimaalisella alueella datakeskuksen toiminnan kannalta. Ilmajäähdytys poistaa tarpeen vesijohtoverkoston kuormittamiselle, mikä lisää hankkeen arvoa kestävä kehityksen näkökulmasta (YVA - Arviointiseloste, Espoon Datakeskus, 2024, s. 23).

Ilmajäähdytyksen lisäksi datakeskuksessa hyödynnetään suljettua ilmavesijärjestelmää, jossa viileä ilma menee ensin ilmanvaihtoyksikön sekä lämmönvaihtimen läpi. Viilentäessään datakeskuksen laitteistoa ilma kuumenee. Lämmin ilma johdetaan järjestelmän toiselle lämmönvaihtimelle, jossa ilman sitoma lämpöenergia siirtyy suljettuun vesipiiriin, josta ilma johdetaan hyödynnettäväksi kaukolämpöverkossa tai talviaikaan kylmän tuloilman lämmitykseen. Tämänkaltaisen lämpöenergian kierrätysjärjestelmä on maailmanlaajuisesti alan uusinta teknologiaa, eikä

samankaltaista järjestelmää ole käytössä vielä monessa paikassa. (YVA - Arviointiseloste, Espoon Datakeskus, 2024 s. 23).

Datakeskuksen sähköenergian tullessa täysin hiilidioksidivapaista lähteistä, syntynyt lämpöenergia on täysin hiilidioksidipäästötöntä. Kun hukkalämpöä voidaan luovuttaa tarpeeksi alueellisen kaukolämpöverkon tarpeisiin, voidaan mahdollisesti täysin korvata fossiilisista polttoaineista peräisin oleva lämpöenergia datakeskuksissa. Hukkalämpö otetaan talteen Fortumin lämpöpumppulaitoksella ja siirretään sitä kautta kaukolämpöverkon tarpeisiin, prosessissa aikana viilentynyt vesi kierrätetään takaisin datakeskuksen ilmavesijärjestelmään. Datakeskuksesta kaukolämmön käyttöön siirretyn lämpöenergian määrä on suoraan riippuvainen vallitseviin olosuhteisiin ja ajalliseen keskuksen kuormitustasoon. (YVA - Arviointiseloste, Espoon Datakeskus, 2024 s. 24).

Syntyvän hukkalämmön tehokkaalla talteenotolla on selvä positiivinen ympäristövaikutus, samalla se toimii hyvänä esimerkkinä kiertotalouden käytäntöjen soveltamisesta. (YVA - Arviointiseloste, Espoon Datakeskus, 2024, s. 357). Optimaalisissa olosuhteissa kaikki neljässä lohossa syntyvä lämmin ilma saadaan johdettua talteenottojärjestelmiin, jotta syntynyttä lämpöenergiaa ei tarvitse poistaa ollenkaan ulkoilmaan. (YVA - Arviointiseloste, Espoon Datakeskus, 2024 s. 24).

Talviaikaan tuleva jäähdytysilma kostutetaan, jotta jäähdytysilman kosteusaste on optimaalisella tasolla datakeskuksen jäähdytystä varten. Kosteuden lisäämiseen tarvittavaa vettä ei oteta suoraan vesijohtoverkosta, vaan käytetään aiemmin kerättyä sadevettä. Kokonaisuudessaan tämän kaltainen jäähdytysjärjestelmä kuluttaa murto-osan verrattuna perinteisten datakeskusten sähkönkulutukseen, on kuitenkin huomioitava, että jäähdytysteholtaan kyseinen menetelmä on noin 30 % heikempi verrattuna perinteisiin jäähdytystekniikoihin. (YVA - Arviointiseloste, Espoon Datakeskus, 2024 s. 25). Wahlroosin ja muiden (2018) mukaan datakeskusten sijoittaminen maailman pohjoisille alueille lisää vapaajäähdytyksen yleistymistä, kun vallitsevista ympäristöolosuhteista saadaan suurin mahdollinen hyöty kylmemmän ilmaston vuoksi.

Kiertotalouden näkökulmasta on kuitenkin huomionarvoista, että 75 % datakeskuksen hukkalämmöstä pystytään kierrättämään. Lämmön kierrättäminen kaukolämpöverkon tarpeisiin alueellisesti ei kuitenkaan ole ainut datakeskuksen kiertotalousratkaisuihin. Kestävän kehityksen merkeissä datakeskuksen sähköenergian tarve sisältäen jäähdytyksen ja laitteiston energiantarpeen käyttää uusiutuvaa sähköenergiaa toimiakseen. Lisäksi rakennusvaiheessa kestävään luonnonvarojen käyttämiseen ja kiertotalouden periaatteisiin on kiinnitetty huomiota esimerkiksi ylijäämä kivi- ja maainesten hyötykäytön suhteen. (*YVA - Arviointiseloste, Espoon Datakeskus, 2024, s. 77*).

Hankkeen energiahierarkia sisältää maininnan kiertotalouden käytäntöjen soveltamisesta aina kun se on mahdollista. Hankkeen edetessä pyritään kiertotalousajattelun mukaisesti kierrättämään, korjaamaan sekä hävittämään laitteiston koko hankkeen elinkaaren aikana. Datakeskuksen energiahierarkiaan sisältyy myös maininta kiertotalouden periaatteiden mukaisesta sisäisestä jätteen kierrätysohjelmasta. (*YVA - Arviointiseloste, Espoon Datakeskus, 2024, s. 364*).

Microsoftin datakeskuksen kiertotalousratkaisuja tarkistelemalla saadaan ymmärrystä siitä, miten kiertotalouden periaatteet on huomioitu uuden datakeskushankkeen kanssa. Uusi datakeskus eroaa selvästi vanhemmista keskuksista esimerkiksi energiatehokkuuden ja ympäristövaikutuksia hillitsevien kiertotalousratkaisujen osalta, joten voidaan sanoa tekoälyn ja datakeskusten päästöjen hallinnan olevan tulevaisuudessa suoraviivaisempaa, mikäli globaalisti keskitetään tekoälyn käyttö sekä oppimismallien koulutus moderneihin datakeskuksiin, joissa kestävä kehitys on ollut suuremmissa roolissa keskuksen suunnittelu- ja rakennusvaiheessa.

Esimerkkinä käsitellyn datakeskuksen kiertotalousratkaisut ovat ajankohtaisesti edistyneitä tällä hetkellä. Optimaalinen jäähdytystekniikka, viileän ilman hyödyntäminen jäähdytyksessä talviaikaan, riippumattomuus vesijohtoverkostosta sekä hukkalämmön kierrättäminen osaltaan luovat lisäarvoa hankkeelle kestävyuden ja kiertotalouden

näkökulmasta. Espoon datakeskuksen ottaa energiantarpeensa täyttämiseksi sähköenergiaa sähköasemalta, jota hallinnoi sähköverkkoyhtiö Fingrid (*YVA - Arviointiseloste, Espoon Datakeskus, 2024, s. 6*). Käytetty sähköenergia on sataprosenttisesti tuotettu uusiutuvilla menetelmillä, joten syntyvä hukkalämpö tarjoaa täysin päästötöntä lämpöenergiaa alueellisen kaukolämmön tarpeisiin. Näillä toimilla Microsoftin uusi datakeskus on globaalisti merkittävä esimerkki kiertotalousajattelun mallien kokonaisvaltaisesta hyödyntämisestä.

Vaikka kiertotalousratkaisuja hyödynnettäisiin laajasti uusissa datakeskushankkeissa, eivät yksityiskohdat ole täysin ongelmattomia kestävyys suhteen. Ongelmia voi aiheutua mm. sähkönjakelukatkosten tai järjestelmähäiriöiden aikana. Suurimmat haasteet kuitenkin liittyvät lämmönpoistoon ja jäähdytykseen, energiatehokkuuteen, skaalautuvuuteen sekä joustavuuteen (Patel, 2021, s. 665 - 666). Energiatehokkuuteen, lämmönpoistoon sekä jäähdytykseen liittyviä haasteita on Espoon datakeskushankkeen tapauksessa osattu enimmäkseen hallita. Kuitenkin herää kysymys mahdollisten vikatilanteiden aiheuttamista haasteista. Datakeskukset eivät voi toimia optimaalisesti, mikäli sisäiset ympäristöolosuhteet keskuksessa eivät ole optimaaliset, suurilla tiheyksillä operoivat keskuksat ovat taipuvaisia kohtaamaan merkittäviä lämmönsäätelyongelmia, ellei jäähdytysjärjestelmien optimointia suoriteta tehokkaasti (Patel, 2021, s. 665). Microsoftin tapauksessa visiot jäähdytyksestä voivat olla tehokkaita Suomessa valtaosan vuodesta, mutta ilmastonlämpenemisen aiheuttamat sään ääriolosuhteet tulevat oletettavasti lisääntymään, joka vaikuttaa hankkeen visioiden toteutumiseen tulevaisuudessa. Ääriolosuhteiden myötä myrskyt lisääntyvät sekä keskilämpötila kohoaa, lopputuloksena voi olla häiriöitä keskuksen sähkönjakelussa tai tehoton jäähdytys datakeskuksessa, joka osaltaan voi aiheuttaa lisää negatiivisia ympäristövaikutuksia.

Patelin (2021, s. 667) mukaan suuritiheyksisessä datakeskuksessa voi olla tarve nestemäisille jäähdytysvaihtoehdoille pakattujen kokonaisuuksien lämpökuorman hallitsemiseksi. Upotusjääditys tarjoaa tehokkaamman jäähdytyksen verrattuna

pelkkään ilmajäähdytykseen ja tekniikan skaalautuvuutta suuriin infrastruktuurikonaisuuksiin pidetään todennäköisenä. Microsoftin datakeskuksen tapauksessa kuitenkin nojaututaan suoraan ilmajäähdytykseen, mikä voi olla perusteltua datakeskuksen pohjoisen sijainnin vuoksi. Microsoftin datakeskushankkeen tapauksessa tiheys voi olla sellaisella tasolla, ettei nestejäähdytykselle ole nähty tarvetta.

Huomionarvoista on myös yleisesti käsitellyt haasteet suuritiheyksissä datakeskuksissa, joiden osuus globaalista energiankulutuksesta on kasvanut viimeaikoina (Patel, 2021, s. 667). Energiatehokkuuteen tuleekin kiinnittää huomiota, sillä se vaikuttaa tekoälyn aiheuttamiin päästöihin epäsuorasti. Energiatehokkaan datakeskussuunnittelun tulisi olla keskeinen painopiste innovoinnissa, sillä tehokas energiankäyttö ei saisi vähentää ICT-laitteiston suorituskykyä. Patel (2021, s. 667) toteaa, että resurssien energiatietoisuutta voitaisiin lisätä ottamalla käyttöön algoritmeja, jotka dynaamisella kohdennuksella optimoi laskentaresursseja hetkellisen työkuorman kysynnän perusteella. Siten voidaan merkittävästi vähentää keskuksissa turhaa tyhjäkäyntiä ja sen aikana aiheutuvaa virrankulutusta. Älykkäällä ja aktiivisella resurssienhallinnalla voidaan siten alentaa datakeskusten energiankulutusta, tekoäly voi itse olla osana kehittämässä näitä nimenomaisia algoritmeja, joten tekoälyn kestävyuden arviointiin käytetty malli kaksijakoisuudesta toteutuu.

### **3.5 Kestävämpi palvelinkeskusteollisuus & kiertotalous**

Kiertotaloudella on selkeä rooli kestävämmän digitaalisen infrastruktuurin mahdollistamisessa. Aihetta voidaan käsitellä kiertotalouden viitekehyksen alla lukuisista lähtökohdista.

Yksi keskeinen näkökulma kiertotalousmallin hyödyntämisestä on datakeskusten sivuvirtojen laajamittaisempi hyödyntäminen resursseina, josta jo hyvänä esimerkkinä hukkalämmön luovuttaminen kaukolämpöverkon tarpeisiin. Sivuvirtoihin sisältyy myös syntyvä elektroniikkajäte. Tekoälypalvelimien metallipitoinen elektroniikkajäte sisältää kolme komponenttiluokkaa: Piirilevyt, akusto sekä muut rakenneosat (Wang, 2024 s. 5 -

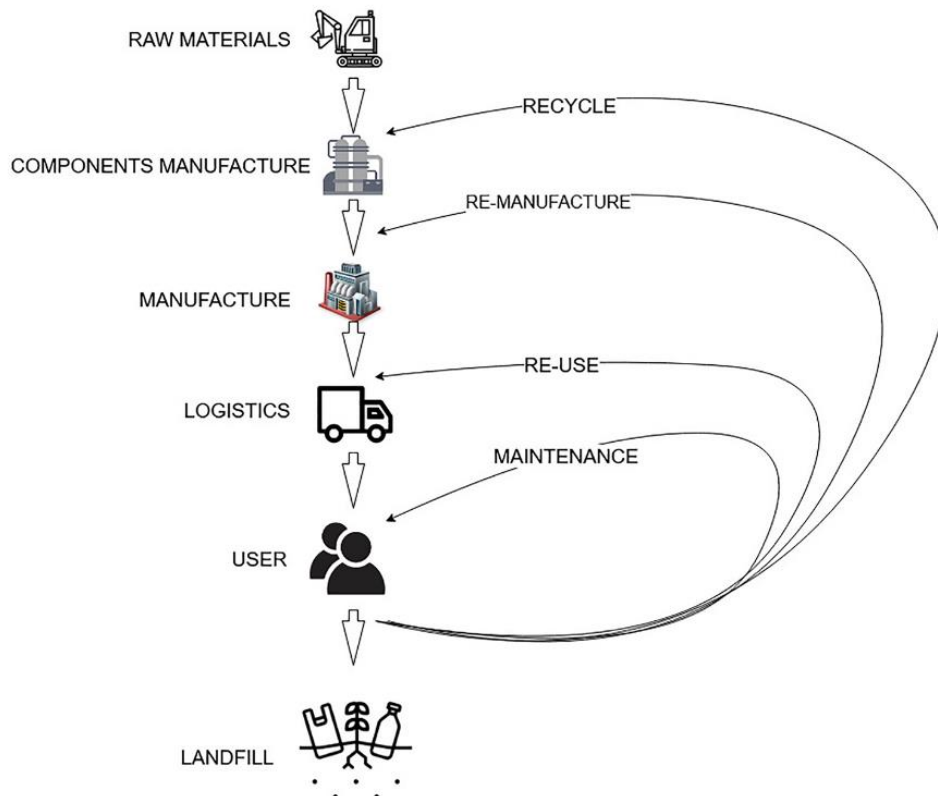
11). Nämä osat sisältävät erilaisia mm. kromia ja lyijyä, nämä voivat olla haitallisia ympäristölle, mikäli niiden kierrätystä ei ole hoidettu oikein. Asianmukaisella kierrätyksellä voidaan kuitenkin edistää kiertotaloutta elektroniikkateollisuuden alalla, mikä osaltaan vähentää suoraan raaka-aineina käytettyjen metallien louhintaa, ollen samalla edistämässä ekosysteemien suojelua (Wang, 2024 s. 5 - 11). Kierrättäminen ei kuitenkaan vain vähennä tarvetta uusien raaka-aineiden hankkimiselle, samalla vähenee esimerkiksi metallien louhimiseen vaadittavan energian määrä. Wangin (2024) mukaan asianmukainen kierrättäminen vähentää huomattavasti louhimiseen tarvittavasta energiasta, mikä johtaa pienempiin hiilidioksidipäästöihin. Sivuvirtojen laaja hyödyntäminen voi auttaa datakeskuksia edistämään kiertotalousmallin käyttämistä laajasti, siten tekoälyn epäsuorasti aiheuttama ympäristökuorma saadaan pienemmäksi. Samalla resurssien koko elinkaaren arvoketju yhdistyy kestävän kehityksen periaatteeseen.

Uudenlaiset mallit datakeskusten liiketoiminnassa ovat myös tarpeellisia. Kiertotalous ei datakeskusten viitekehityksessä ole ainoastaan tekninen näkökulma, resurssitehokkuutta voidaan edistää analysoimalla koko IT-laitteiston elinkaaren hallinnalla. Datakeskusteollisuuden laajamittainen siirtyminen kohti kiertotalousajattelua vaatii siis muutoksia myös ajattelumalleissa jo keskustusten suunnitteluvaiheessa. Elinkaariajattelu on tuotava aktiivisemmin mukaan päätöksenteossa ja suunnittelussa (Kerwin ja muut, 2022). Elinkaaren eri vaiheissa resurssien toimitusketju on riskialtis, sillä monet ICT-laitteiston vaatimat raaka-aineet joudutaan keräämään geopoliittisesti herkiltä alueilta. Laitteiston valmistusvaiheella tarkoitetaan kokonaisuutta raaka-aineiden louhinnan ja lopullisen laitteen käyttöönoton välillä. Jokainen vaihe jo valmistusvaiheessaan aiheuttaa haitallisia ympäristövaikutuksia ekosysteemeille; haitallisia vaikutuksia ovat hiilidioksidipäästöjen lisäksi sosioekonomiset vaikutukset. (Kerwin ja muut, 2022). Vaikka energiatehokkuudella onkin selkein ja näkyvin vaikutus ympäristöön, tulee myös harkita tarkasti muita ympäristövaikutuksia, jotta kiertotalouden periaatteiden noudattaminen ei jää pelkästään teknisen näkökulman varaan. Muutokset yritystoiminnassa ja ajatusmalleissa kaikissa sidosryhmissä tukee osaltaan kiertotalouden periaatteiden

näkyvää toteutumista, joka on helpommin havaittavissa verrattuna ajatusmallien muutokseen. Laitteiston elinkaariajattelua tukee myös poliittiset päätökset, Kerwinin (2022) mukaan ICT-laitteiden valmistajilta vaaditaan jo nyt tiettyjä vaatimuksia liittyen mm. energiatehokkuuteen ja tietoturvaan. Lisäksi on pystyttävä toimittamaan ajantasaiset käyttö- ja korjausoppaat, myöskään laitteiston korjaaminen on oltava mahdollista siten, ettei laitteen fyysiset ominaisuudet estä pääkomponenttien korjaamista, purkamista tai uudelleenkäyttöä. (Kerwin ja muut, 2022)

Kiertotalouden edistäminen teknisillä ratkaisuilla on havaittu ensiarvoisen tärkeäksi. Kuitenkin osansa mallin edistämiseksi luo systemaattinen standardisointi ja sertifiointitoimenpiteet. Kerwinin ja muiden (2022) tutkimuksen pohjalta saatiin selville, että tietyt palvelimet on suunniteltu määrättyyn pisteeseen asti siten, että korjaus ja uudelleent valmistus on mahdollista. Tällä hetkellä palvelinten kokonaissuunnittelussa ei ole laajaa standardisointia, mikä lisää kiertotalousmallin vastaista ajatusta siitä, ettei laitteiston osia voida vaihtaa eri mallisukupolvien välisesti. On ehdotettu, että palvelinlaitteiston suunnitteluvaiheessa tulisi painottaa erityisesti yleiskäyttöisiä palvelinkoteloita, joissa pystytään tulevaisuudessa käyttämään muidenkin valmistajien komponentteja. Osien fyysisten ominaisuuksien standardointi onkin ensiarvoisen tärkeää kaikilla kokoonpanotasoilla, jotta saadaan korjaamista tai purkamista estävät komponentit riisuttua laitteistosta. (Kerwin ja muut, 2022). Kun laitevalmistajille annetaan tarkat määräykset koskien laitteiston fyysisiä ominaisuuksia, saadaan sähkö- ja elektroniikkajätteen määrää vähennettyä, mikä osaltaan auttaa vähentämään datakeskusteollisuuden aiheuttamaa haitallista ympäristövaikutusta

Laajassa mittakaavassa kiertotalouden tulisi tulevaisuudessa integroitua entistä enemmän datakeskusten elinkaaren arvoketjuun. Nykyisin on jo olemassa erilaisia arviointimenetelmiä osana kiertotalouden hyödyntämistä (Hoosain ja muut, 2023, s. 179). Siirtymää kohti kiertotaloutta laitteiston arvoketjussa kuvataan kuviossa 4, jossa on havainnollistettu, kuinka kaatopaikan tulisi kiertotalouden nojalla olla viimesijainen vaihtoehto hyödykkeiden elinkaaren missään vaiheessa.



**Kuvio 4, Kiertotalouden arvoketju (Hoosain ja muut, 2023, s. 178)**

Keinoja kiertotalouden laajempaan integroitumiseen ovat esimerkiksi elinkustannuslaskenta, elinkaariarviointi, materiaalien kiertotaloudellinen indikaattori sekä ns. materiaalipassit (Hoosain ja muut, 2023, s. 179). Kolmeen tyyppiin jakautuva elinkustannuslaskenta analysoi laskennallisesti hyödykkeen resurssit, operaation sekä palvelun kokonaiskustannukset. Elinkaariarvioinnin perustana taas on tuotantoprosessin, käytön sekä hallintaan liittyvien toimintojen aiheuttamien ympäristöpäästöjen arviointi. Päätöksentekoprosessina materiaalien kiertotalouden indikaattori arvioi hyödykkeen siirtymää lineaarisesta mallista kohti kiertotalousmallia. Materiaalipassit toimivat arvoketjussa arvonseurantatyökaluna, jonka avulla tuodaan hyödykkeen jäännösarvo takaisin markkinoille, tämän vaiheen toteuttaminen vaatii useiden sidosryhmien aktiivista yhteistyötä. (Hoosain ja muut, 2023, s. 179).

Arvoketjussa tekoälyn hyödyntämisellä on tehostava vaikutus tiedon keräämisessä sekä käsiteltyssä, mikä auttaa kiertotalousajattelun mukaisten toimien suunnittelussa. Tekoälyn hyödyntäminen esimerkiksi lajittelussa ja säännösten noudattamisen valvonnassa on myös tärkeä yksityiskohta kestävämmän datakeskustulevaisuuden saralla. (Hoosain ja muut, 2023, s. 186).

Edellä mainittujen toimintojen nojalla voidaan todeta, että kiertotalouden omaksuminen laajasti on välttämätöntä digitaalisen infrastruktuurin pidemmän aikavälin kestävyuden varmistamiseksi. Mikäli datakeskusten laitteiston ja energiankulutuksen osalta saavutettaisiin kestävämpiä ratkaisuja, tekoälyn negatiivista ympäristövaikutusta saataisiin tulevaisuudessa pienemmäksi. Resurssit eivät globaalisti ole loputtomia ja jatkuvasti kasvava datakeskusteollisuus edellyttää resurssien kannalta viisaita ratkaisuja, joille kiertotalouden periaatteet voivat tarjota lupaavan viitekehysten.

## 4 Yhteenveto ja pohdinta

Tämän osion tarkoituksena on pohtia keskeisiä löydöksiä sekä vastauksia asetettuihin tutkimuskysymyksiin. Lisäksi pohditaan löydösten merkitystä ja esitetään aiheita mahdolliselle jatkotutkimukselle.

Kiertotalouden avulla saadaan aikaan selkeitä edistysaskelia, kun halutaan edesauttaa tekoälyä kohti kestävämpää tulevaisuutta. Kirjallisuuskatsauksen pohjalta saadut tulokset osoittivat, että tekoälyn ympäristövaikutusten tarkastelu on haasteellista viitekehyksen monimutkaisuuden vuoksi. Valtaosa tekoälyn aiheuttamista päästöistä syntyy epäsuorasti datakeskuksissa, joissa tekoälyn koulutukseen ja käyttöön liittyvä laskennallisia toimintoja suoritetaan, sillä tekoälyn määrittelyn nojalla kyse on ohjelmistosta, jonka käyttöä voidaan soveltaa useilla eri osa-alueilla. Olennaista on tiedostaa, että tekoälyn toiminnan kannalta datakeskukset ovat kriittisiä toiminnan mahdollistamiseksi. Datakeskuksissa suoritetaan myös muita toimintoja, kuin tekoälyn vaatimia, joten tutkielman rajauksen takia keskusten kokonaispäästöjä ei arvioitu. Kuitenkin tekoälyn käytön kasvaessa jatkuvasti, kasvaa datakeskusten kuormitustaso ja siten energiankulutus. Tekoälyn nopean kehityksen myötä myös laitteiston uusimiseen liittyvät ympäristövaikutukset on otettava huomioon. Tekoälyn kestävyiden sekä kiertotalousmallien hyödyntämisen yhteisvaikutus datakeskuksissa nouseekin ensiarvoisen tärkeäksi, kun tavoitteena on löytää parempia ratkaisuja kestävämmän tulevaisuuden tarpeisiin ICT- sektorilla. Tekoälyn on ennustettu voivan kasvattaa bruttokansantuotetta globaalisti jopa seitsemällä prosentilla, kuitenkin mikäli tekoälyllä korvataan miljoonia työntekijöitä, on tekoälyn käytöllä osaltaan myös eettisiä haasteita.

Energiantarpeen arviointi tekoälyn suhteen ei ole yksiselitteistä. Kirjallisuuskatsauksen aikana saatiin kuitenkin selville koko ICT- sektorin energiankulutus sekä päästöt globaalisti. Koko ICT- sektori kuluttaa vuosittain noin 1000 TWh edestä sähköenergiaa. Tekoälyn arvioitujen päästöjen perusteella sen osuudeksi saadaan 23 TWh, mutta suoraviivaista arviota pelkkien päästöjen pohjalta voidaan pitää vain suuntaa antavana, sillä tekoälyn päästöjen arviointiin lukeutuu myös useita muita toimintoja koko

elinkaaren aikana. Tämän arvion pohjalta voidaan saada selville, missä mittakaavassa tekoälyn energiankulutuksesta voidaan puhua.

Tekoälyn koulutuksesta ja käytöstä aiheutuvia päästöjä arvioidessa lähdemateriaalin pohjalta, selvisi niiden olevan 1,8–2,5 % koko ICT- sektorin päästöistä globaalisti. ICT-sektoriin sisältyy myös datakeskukset, joten lähdemateriaalin pohjalta saatu arvio kattaa kaikki aiheutuvat päästöt. Arvioksi koko ICT- sektorin päästöistä saatiin lähdemateriaalin pohjalta 1,4 % kaikista maailman hiilidioksidipäästöistä. On huomattava, että arvio koko ICT- sektorin päästöistä pohjautuu lähteeseen vuodelta 2020, joka on julkaistu ennen tekoälyn laajamittaista lanseeraamista kaikkien saataville. Voidaan siten olettaa koko sektorin päästöjen nousseen viiden vuoden aikana tekoälyn laajamittaisemman implementoinnin vuoksi. Laskennallisesti edellisen arvion mukaan hiilidioksidiekvivalenteja syntyy vuosittain 17,5 miljoonan tonnin edestä. Tämä vastaa noin 0,3 % kaikista globaaleista hiilidioksidipäästöistä. Yhden oppimismallin koulutusvaiheessa aiheutuvat päästöt ovat tekoälyn kokonaispäästöistä noin 1,6 %. Oppimismalleja koulutetaan jatkuvasti lisää, joten jokainen oppimismalli on omiaan lisäämään kokonaispäästöjä. Tutkimuskysymykseen liittyen tekoälyn päästöihin löydettiin vastauksia, joiden nojalla selviää sekä energiankulutuksen- että päästöjen suuruusluokka. Tarkempien arvioiden selvittäminen vaatisi laajaa empiiristä tutkimustyötä useilla eri osa-alueilla, sillä tekoälyn elinkaaren ainutlaatuisuuden vuoksi arvioiden tekeminen ei ole täysin yksiselitteistä.

Kaiken muun lähdemateriaalin ohella tutkielmassa käsiteltiin Microsoftin datakeskushanketta Espoossa. Datakeskushankkeen ollessa uusi, jo sen suunnitteluvaiheessa on perehdytty negatiivisen ympäristökuorman pienentämiseen. Kestävyysajattelun mukaisissa toimissa on huomioitu eritoten kiertotalousmallin mukaisia toimintamalleja kestävyden edistämiseksi juuri tässä nimenomaisessa datakeskushankkeessa. Näkyvin kiertotalousratkaisu Microsoftin hankkeessa on syntyvän hukkalämmön hyödyntäminen. Datakeskuksissa syntyy merkittävästi hukkalämpöä, sillä keskuksen sisäiset olosuhteet tulee olla jatkuvasti laitteiston kannalta

optimaaliset. Valmistuessaan Espoon datakeskus luovuttaa syntyvää hukkalämpöä alueellisen kaukolämpöverkon tarpeisiin yhteistyössä Fortumin kanssa. Tämän ansiosta voidaan mahdollisesti luopua jopa kokonaan kivihiilen käytöstä kaukolämpöverkon alueella. Keskusta suunnitellussa energiatehokkuudella on kuitenkin merkittävä rooli. Innovatiiviset ja joustavat ICT- järjestelmät sekä tehokas ilmanvaihtosuunnittelu auttavat merkittävästi pienentämään mahdollisia sähköjakeluhäiriöitä. Microsoftin datakeskushankkeessa jäähdytys on toteutettu suoralla ilmajäähdytyksellä, tämä malli ei kuitenkaan lähdemateriaalin perusteella ole kaikista optimaalisin suurien datakeskusten jäähdytyksessä. Suoran ilmajäähdytyksen käyttäminen voi kuitenkin olla perusteltua Suomessa vuoden keskilämpötilan perusteella. Sähköenergiansa datakeskus saa Fingrid:in sähköverkosta. Toimitettava sähköenergia on täysin päästötöntä, osaltaan tukien kiertotalousmallia kestävän energiankäytön osalta. Datakeskus minimoi puhtaan veden käyttötarvetta hyödyntämällä sadevettä, jolloin puhdasta vettä voidaan käyttää tärkeämpiin tarkoituksiin, eikä vesijohtoverkosta kuormiteta turhaan. Rakennusvaiheessa keskitytään erityisesti kestävien luonnonvarojen käyttämiseen ja kiertotalouden hyödyntämiseen ylijäävän maa- ja kiviaineksen osalta. Laitteiston elinkaaren hallinta sisältää myös maininnan kiertotalouden käytäntöjen soveltamisesta kaikissa elinkaaren vaiheissa, sisältäen asianmukaisen kierrättämisen, korjaamisen sekä viimekädessä hävittämisen.

Näiden ratkaisujen nojalla voidaan todeta uusien keskusten hyödyntävän kiertotalousmallin mukaisia käytäntöjä useissa elinkaaren vaiheissa. Vaikka datakeskuksissa suoritetaankin tekoälyn toimintojen lisäksi muitakin toimintoja, on selvää, että datakeskusten kiertotalousratkaisut vievät tekoälyä jatkuvasti kestävämpään suuntaan. YVA- selostetta käytettiin tutkielmassa esimerkinomaisesti, kun käsiteltiin käytännön kiertotalousratkaisuja datakeskuksissa. Kyseisen keskuksen ollessa vielä rakennusvaiheessa tieteellistä näyttöä keskuksen kiertotalousratkaisuista ei vielä ole olemassa. Seloste on kuitenkin lakisääteinen sekä tieteelliseen faktaan ja asiantuntija-arvioihin perustuva, joten voidaan olettaa ratkaisujen toteutuvan myös käytännössä.

Tekoälyn käytöstä epäsuorasti syntyneitä päästöjä voidaan vähentää kiertotalousmallin mukaisesti erityisesti datakeskuksissa. Kuitenkin tekoälypohjainen analytiikka esimerkiksi IT- laitteiston elinkaaren pidentämisen ja tehokkaamman resurssien hyödyntämisen osalta on hyvä esimerkki kiertotalouden edistämisestä. Tekoälyn kestävyyttä käsitellessä tulee huomata, että kestävyysarvointi on kaksijakoinen sisältäen tekoälyn kestävyuden sekä tekoälyn työkaluna kaiken kestävyuden tehostamisessa. Lähdemateriaalin pohjalta selvisi, että tekoäly voi itsessään myös toimia merkittävänä digitaalisen kiertotalouden edistäjänä. Uudet ja tehokkaat oppimismallit sekä lisääntyvä automaatio erityisesti IT-sektorilla voivat vähentää negatiivisia ympäristövaikutuksia samalla kasvattaen taloudellista kannattavuutta. Tekoälyä on mahdollista optimoida toimimaan myös vanhemmalla laitteistolla esimerkiksi mallien karsimisella ja kvantisoinnilla, kuitenkin heikentämättä laitteiston optimaalista toimintaa.

Tekoälyn ympäristökuormaa voidaan hallita skaalaamalla kiertotalous laajemmin IT-sektorille uusien digitaalisten teknologioiden avulla. Näkyvät uudistukset esimerkiksi datakeskuksissa eivät kuitenkaan ole ainoita ratkaisuja. Myös ajattelumallien muutokset ovat tärkeitä kaikkien sidosryhmien välillä. Uusien teknologioiden avulla koko kiertotalouden kehittymistä edesauttaa elinkaaren läpinäkyvyyttä kasvattaminen. Myös elinkaarimallien analysoinnin tärkeys nousee tärkeäksi seikaksi, kun IT- sektori siirtyy laajemmin kohti kiertotalousmallia. Arvoketjujen tulisi vielä merkittävämmiin integroitua osaksi koko elinkaarta, olemassa olevia arviointimenetelmiä tulisi kehittää entisestään. Tekoälyn kasvu johtaa kuitenkin uusien ICT- laitteiden kehittämiseen ja käyttämiseen, mikä voi pahimmassa tapauksessa johtaa siihen, että epälineaariset hiilidioksidipäästöt nousevat, vaikka tekoälyä muuten kehitettäisiin kestävä kehityksen periaatteiden mukaisesti. Kiertotalouden laajamittaisen hyödyntämisen avuksi on jo kehitetty arviointimenetelmiä, koskien erityisesti datakeskuksia, nämä sisältävät esimerkiksi elinkaarikustannuslaskenta. Kiertotalouden viitekehityksellä on siis erinomaiset edellytykset sulautua entistä vahvemmin osaksi koko tekoälyn elinkaarta. Sulautumista edistää sosiaalisten- ja teknisten järjestelmien yhteiskehitys, kun energiatransition avulla päästään kohti kiertotalousmallia. Datakeskuksien kiertotalousratkaisut ovat

suoraviivaisempia verrattuna itse tekoälyn ratkaisuihin, toistaiseksi puutteellinen datan saatavuus sekä laajamittaisen standardoinnin puute tekee kiertotalouden soveltamisesta toisinaan haasteellista nimenomaan tekoälyn osalta. Tekoälyinnovaatioiden ja kestävän kehityksen välillä on kuitenkin jännitteitä, mikäli hiilidioksidipäästöt johtuen laitteistosta ja energiankulutuksesta pääse kasvamaan entisestään. Huomionarvoista on kuitenkin, että matka kohti kestävämpää tekoälyä on vasta alkutekijöissään. Tulevaisuudessa alan kehittyessä sekä vaikutusten arviointi, että niiden hillitseminen on yksiselitteisempää.

Tutkielmassa rajoittavana tekijänä oli sen valmistelu pelkkänä kirjallisuuskatsauksena. Empiirinen tutkimustyö esimerkiksi olemassa olevien datakeskusten parissa olisi tuonut tutkielmaan vielä enemmän käytännönläheisyyttä. Lähdemateriaalin pohjalta saadaan kuitenkin kattava yleiskäsitys tekoälyn päästöistä sekä kiertotaloudesta kestävämmän tulevaisuuden mahdollistajana. Tutkielmassa ei myöskään syvennytty datakeskusten kokonaispäästöihin, kun käsiteltiin ainoastaan tekoälyn aiheuttamaa ympäristökuormaa. Datakeskusten kokonaispäästöjen osalta olisi voitu tarkemmin selvittää kiertotalousratkaisujen kokonaisvaikutusta datakeskuksissa. Selvittämällä datakeskusten kokonaispäästöt sekä ennen, että kiertotalousratkaisujen käyttöönoton jälkeen, olisi saatu tarkkaa tietoa, kuinka mainitut haasteet liittyen esimerkiksi standardointiin voivat vaikuttaa saatuihin hyötyihin. Tutkielman aikana saadut löydökset osoittivat, että tekoälyn ympäristökuormaa voidaan teoriassa hallita usein eri kiertotalouden keinoin. Löydösten merkittävyyttä osaltaan lisää, että kiertotaloutta voidaan tuoda laajasti mukaan erityisesti datakeskusten osalta. Jatkossa tutkielman pohjalta voisi tutkia tarkemmin joidenkin tiettyjen kiertotalouden osa-alueiden soveltamista sekä tekoälyn-että datakeskusten osalta, esimerkiksi innovaatiomallien merkitystä kiertotalouden soveltamisessa datakeskusten laitteiston osalta. Lisäksi jatkossa voisi tarkastella, kuinka erilaiset arviointimenetelmät sopivat yhteen tekoälyn ainutlaatuisen elinkaaren arviointiin. Lisäksi nopeasti kehittyvässä viitekehyksessä on jatkuvasti uusia mahdollisuuksia tehdä laajaa tieteellistä tutkimusta ja parhaassa tapauksessa soveltaa niitä käytännössä paremman ja kestävämmän tulevaisuuden takaamiseksi.

## Lähteet

- Ahmed, K. M. U., Bollen, M. H. J., & Alvarez, M. (2021). A Review of Data Centers Energy Consumption and Reliability Modeling. *IEEE Access*, *9*, 152536–152563. IEEE Access. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3125092>
- Ajayi, O. (2021). Data centre day-ahead energy demand prediction and energy dispatch with solar PV integration. *Energy Reports*, *7*, 3760–3774. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.06.062>
- Andrews, D., Newton, E. J., Adibi, N., Chenadec, J., & Bienge, K. (2021). A Circular Economy for the Data Centre Industry: Using Design Methods to Address the Challenge of Whole System Sustainability in a Unique Industrial Sector. *Sustainability*, *13*(11), Article 11. <https://doi.org/10.3390/su13116319>
- Cao, Y., Li, S., Liu, Y., Yan, Z., Dai, Y., Yu, P. S., & Sun, L. (2023). *A Comprehensive Survey of AI-Generated Content (AIGC): A History of Generative AI from GAN to ChatGPT* (No. arXiv:2303.04226). arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2303.04226>
- Chen, X. (2023). Efficient Techniques for Minimizing Energy Usage in AI Model Training. *Journal of Big Data and Smart Systems*, *4*(1), noudettu 23.3.2025 osoitteesta: <https://universe-publisher.com/index.php/jbds/article/view/38>
- Chien, A. A., Lin, L., Nguyen, H., Rao, V., Sharma, T., & Wijayawardana, R. (2023). Reducing the Carbon Impact of Generative AI Inference (today and in 2035). *Proceedings of the 2nd Workshop on Sustainable Computer Systems*, 1–7. <https://doi.org/10.1145/3604930.3605705>
- Dash, S. (2025). Green AI: Enhancing Sustainability and Energy Efficiency in AI-Integrated Enterprise Systems. *IEEE Access*, *13*, 21216–21228. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3532838>
- Euroopan Parlamentti. (30.6.2023). *Mitä kiertotalous on ja miksi sillä on merkitystä?* Noudettu 1.3.2025 osoitteesta: <https://www.europarl.europa.eu/topics/fi/article/20151201STO05603/mita-kiertotalous-on-ja-miksi-silla-on-merkitysta>
- European Parliament. Directorate General for Parliamentary Research Services. (2020). *Artificial intelligence: How does it work, why does it matter, and what we can do*

- about it?* Noudettu 3.3.2025 osoitteesta:  
<https://data.europa.eu/doi/10.2861/44572>
- Feuerriegel, S., Hartmann, J., Janiesch, C., & Zschech, P. (2024). Generative AI. *Business & Information Systems Engineering*, 66(1), 111–126.  
<https://doi.org/10.1007/s12599-023-00834-7>
- Fraga-Lamas, P., Lopes, S. I., & Fernández-Caramés, T. M. (2021). Green IoT and Edge AI as Key Technological Enablers for a Sustainable Digital Transition towards a Smart Circular Economy: An Industry 5.0 Use Case. *Sensors*, 21(17),  
<https://doi.org/10.3390/s21175745>
- Geng, H. (2014). Data Centers—Strategic Planning, Design, Construction, and Operations. Teoksessa *Data Center Handbook* (s. 1–14). John Wiley & Sons, Ltd.  
<https://doi.org/10.1002/9781118937563.ch1>
- Hoosain, M. S., Paul, B. S., Kass, S., & Ramakrishna, S. (2023). Tools Towards the Sustainability and Circularity of Data Centers. *Circular Economy and Sustainability*, 3(1), 173–197. <https://doi.org/10.1007/s43615-022-00191-9>
- Huang, R. (2024). *White Paper on Global Artificial Intelligence Environmental Impact*.  
<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.17090.39368>
- Kerwin, K., Andrews, D., Whitehead, B., Adibi, N., & Lavandeira, S. (2022). The significance of product design in the circular economy: A sustainable approach to the design of data centre equipment as demonstrated via the CEDaCI design case study. *Materials Today: Proceedings*, 64, 1283–1289.  
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.105>
- Kirkpatrick, K. (2023). The Carbon Footprint of Artificial Intelligence. *Communications of the ACM*, 66(8), 17–19. <https://doi.org/10.1145/3603746>
- Korhonen, J., Honkasalo, A., & Seppälä, J. (2018). Circular Economy: The Concept and its Limitations. *Ecological Economics*, 143, 37–46.  
<https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.06.041>
- Lu, T., Lü, X., Välisuo, P., Zhang, Q., & Clements-Croome, D. (2024). Innovative approaches for deep decarbonization of data centers and building space heating networks: Modeling and comparison of novel waste heat recovery systems for liquid cooling

- systems. *Applied Energy*, 357, 122473.  
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.122473>
- Mageswari, S. D. U., Suganthi, P., & Meena, M. (2022). Carbon Footprint of Information and Communication Technologies. *2022 International Conference on Edge Computing and Applications (ICECAA)*, 338–342.  
<https://doi.org/10.1109/ICECAA55415.2022.9936485>
- Mahesh, B. (2019). Machine Learning Algorithms -A Review. *Teoksessa International Journal of Science and Research (IJSR)* (Vsk. 9).  
<https://doi.org/10.21275/ART20203995>
- Malmodin, J., Lövehagen, N., Bergmark, P., & Lundén, D. (2024). ICT sector electricity consumption and greenhouse gas emissions – 2020 outcome. *Telecommunications Policy*, 48(3), 102701.  
<https://doi.org/10.1016/j.telpol.2023.102701>
- Mondal, S., Faruk, F. B., Rajbongshi, D., Efaz, M. M. K., & Islam, M. M. (2023). GEECO: Green Data Centers for Energy Optimization and Carbon Footprint Reduction. *Sustainability*, 15(21), <https://doi.org/10.3390/su152115249>
- Olabi, A. G. (2019). Circular economy and renewable energy. *Energy (Oxford)*, 181, 450–454. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.05.196>
- Okafor, C., Madu, C., Ajaero, C., Ibekwe, J., Otunomo, F., Okafor, C., Madu, C., Ajaero, C., Ibekwe, J., & Otunomo, F. (2021). Situating coupled circular economy and energy transition in an emerging economy. *AIMS Energy*, 9(4), Article energy-09-04-031.  
<https://doi.org/10.3934/energy.2021031>
- Patel, S. (2021). Challenges and Technological Advances in High- Density Data Center Infrastructure and Environmental Matching for Cloud Computing. *International Journal of Advanced Research in Science Communication and Technology*, 12, 662–670.
- Sharifani, K., & Amini, M. (2023). *Machine Learning and Deep Learning: A Review of Methods and Applications* (SSRN Scholarly Paper No. 4458723). Social Science Research Network. <https://papers.ssrn.com/abstract=4458723>

- Strubell, E., Ganesh, A., & McCallum, A. (2019). *Energy and Policy Considerations for Deep Learning in NLP* (No. arXiv:1906.02243). arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1906.02243>
- Van Wynsberghe, A. (2021). Sustainable AI: AI for sustainability and the sustainability of AI. *AI and Ethics*, 1(3), 213–218. <https://doi.org/10.1007/s43681-021-00043-6>
- Wahlroos, M., Pärssinen, M., Rinne, S., Syri, S., & Manner, J. (2018). Future views on waste heat utilization – Case of data centers in Northern Europe. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 1749–1764. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.058>
- Wang, P. (2024). E-waste challenges of generative artificial intelligence. *Nature Computational Science*, 4(11), <https://doi.org/10.1038/s43588-024-00712-6>
- Wu, C., & Buyya, R. (2015). *Cloud Data Centers and Cost Modeling: A Complete Guide To Planning, Designing and Building a Cloud Data Center*. Morgan Kaufmann.
- Ympäristövaikutusten arviointi*. (n.d.). Noudettu 30.3.2025, osoitteesta <https://www.ymparisto.fi/fi/osallistu-ja-vaikuta/ymparistovaikutusten-arviointi>
- YVA – Arviointiseloste, Espoon Datakeskus. (2024). Microsoft Oy.
- Zhang, T. (2022). *Circular Economy*. IntechOpen.