



**TURUN
YLIOPISTO**
Kauppakorkeakoulu

Digitaaliset innovaatiot kiertotalouden mahdollistajina yrityksissä

Tietojärjestelmätieteen kandidaatintutkielma

Laatija: Elina Arasjärvi

Ohjaaja:
KTT Jonna Järveläinen

7.12.2023

Turku

Turun yliopiston laatu järjestelmän mukaisesti tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -järjestelmällä.

Kandidatutkielma

Oppiaine: Tietojärjestelmätieteet

Tekijä: Elina Arasjärvi

Otsikko: Digitalisaation vaikutus kiertotalouden implementoinnissa yritysten liiketoiminnassa

Ohjaaja: KTT Jonna Järveläinen

Sivumäärä: 30 sivua

Päivämäärä: 7.12.2023

Tutkielman tarkoitus on tutkia, millainen rooli digitaalisilla innovaatioilla on kiertotalouden mallien implementoinnissa, ja miten eri teknologiat tätä implementointia tukevat. Tutkielmassa keskitytään kiertotalouden teemoihin ja malleihin yritysten näkökulmasta, ja digitaalisten innovaatioiden mahdollisuuksiin vaikuttaa kiertotalouden implementointiin. Tutkielma on toteutettu kirjallisuuskatsauksena.

Tutkielman tutkimuskysymykset:

1. Millä tavoin yritykset voivat hyödyntää kiertotalouden malleja yritysten toiminnassa?
2. Millaisia yleisimpiä digitaalisia innovaatioita kiertotalouden mallien hyödyntämisessä voidaan käyttää?
 - a. Minkälainen merkitys digitalisaatiolla on yritysten mahdollisuuksiin implementoida kiertotalouden periaatteita liiketoimintamalleissaan?

Ensimmäiseen kysymykseen vastataan määrittelemällä kiertotalous yritysten näkökulmasta ja esittelemällä kolme erilaista mallia, joita voidaan hyödyntää kiertotalouden implementoinnissa. Toiseen kysymykseen vastataan tarkastelemalla digitaalisia innovaatioita, niiden mahdollisuuksia, haasteita ja rooleja kiertotalouden implementoinnissa. Toisen tutkimuskysymyksen alakysymykseen vastataan tarkastelemalla digitalisaation vaikutusta kiertotalouden implementointiin infrastruktuurin, toimintojen tehokkuuden ja materiaalin vähentämisen näkökulmasta.

Avainsanat: Kiertotalous, digitalisaatio, digitaaliset innovaatiot, teollisuus 4.0

SISÄLLYS

1	Johdanto	7
2	Kiertotalouden strateginen implementointi	8
	2.1 Kiertotalouden teorioiden kehitys	8
	2.2 Uudelleenkehitys	9
	2.3 Uudelleenvalmistus ja korjaus	10
	2.4 Kierrätys	11
3	Digitaaliset innovaatiot kiertotalouden implementoinnissa	13
	3.1 Digitaalinen kiertotalous	13
	3.2 Lohkoketjut	15
	3.3 Esineiden Internet	17
	3.4 Tekoäly	18
	3.5 Muita mahdollisia innovaatioita	19
4	Yhteenveto ja johtopäätökset	23
	4.1 Yhteenveto	23
	4.2 Johtopäätökset	24
	Lähteet	27

KUVIOT

Kuvio 1 Kiertotalouden ja T4.0:n implementoinnin muutosvaikutukset 14

TAULUKOT

Taulukko 1 Teknologisten innovaatioiden hyödyntäminen 22

1 Johdanto

Digitaalisten teknologioiden on yhä enemmän väitetty mahdollistavan kiertotalouden liiketoimintamalleja (Ranta ym. 2021). Kiertotaloudella on mahdollisuuksia muuttaa nykyhetken liiketoimintamalleja hyvin eri tavalla toimiviksi. Kiertotaloudella on potentiaalia samanaikaisesti parantaa yrityksen ympäristön kestävyyttä ja taloudellisia aspektejia järjestelmällisen resurssitehokkuuden parantamisen kautta. (Ghisellini ym. 2016.) Tutkielman tarkoituksena on tutkia, millainen rooli digitaalisilla innovaatioilla on kiertotalouden mallien implementoinnissa, ja miten eri teknologiat tätä implementointia tukevat.

Digitalisaation vaikutusympäristöystävällisempiin liiketoimintamalleihin ja -prosesseihin ja lisääntyvä tietämys alasta ja sen ilmiöistä oikeuttavat aiheen tutkimisen. Näiden aiheiden yhdistäminen tuntuu siksi luonnolliselta. Laaja-alaisemman käsityksen saaminen siitä, miten digitaalisten innovaatioiden käyttö voi vaikuttaa yritysten kykyyn tai halukkuuteen implementoida kiertotalouden malleja omiin liiketoimintamalleihinsa, on mahdollisesti hyödyllistä myös tulevaisuudessa.

Tutkimuskysymykset:

1. Millä tavoin yritykset voivat hyödyntää kiertotalouden malleja yritysten toiminnassa?
2. Millaisia yleisimpiä digitaalisia innovaatioita kiertotalouden mallien hyödyntämisessä voidaan käyttää?
 - a. Minkälainen merkitys digitalisaatiolla on yritysten mahdollisuuksiin implementoida kiertotalouden periaatteita liiketoimintamalleissaan?

Tutkielmassa keskitytään enemmässä määrin kiertotalouden ja kestävä kehityksen teemoihin ja malleihin yritysten näkökulmasta. Lisäksi keskitytään digitaalisten innovaatioiden mahdollisuuksiin vaikuttaa kiertotalouden implementointiin yritysten liiketoimintamalleissa, erityisesti teollisuus 4.0:aa (engl. Industry 4.0, I4.0) käsitteleviin innovaatioihin ja siihen liittyviin teemoihin.

2 Kiertotalouden strateginen implementointi

Käsitteelle kiertotalous (engl. circular economy, CE) voidaan käyttää monenlaisia määritelmiä. Tässä tutkielmassa keskitytään kiertotaloudesta puhuttaessa sen päämäärään vähentää materiaalin kulutusta, lisätä tuotteiden ja palveluiden uudelleenkäyttämistä, sekä tehostaa käyttökelvottoman jätteen kierrätystä (Awan ym. 2022, 371). Kiertotalous voidaan nähdä suljettuna silmukkana, jossa maksimoidaan materiaalin arvo ja tuotteiden elinkaari. Keskeistä on talouskasvun irrottaminen lisääntyvästä resurssien käytöstä ja haitallisten ympäristövaikutusten vähentäminen. (Fogarassy ja Finger, 2020, 2.) Kiertotalouden vastakohtana voidaan nähdä lineaarinen talous (engl. linear economy, LE), jossa keskitytään pääosin materiaalin hankintaan, sen valmistamiseen valmiiksi tuotteeksi, ja lopulta tuotteen hävitykseen. Linearisessa taloudessa ei keskitytä tuotteiden arvon palauttamiseen niiden elinkaaren loppupuolella. (Sharma ym. 2021, 1803.)

Li ym. (2023, 1180) ovat käyttäneet tutkimuksessaan kiertotaloudesta jaottelua kolmeen eri päämuotoon: uudelleenkäyttö, uudelleentuotanto ja korjaus sekä kierrätys. Tässä tutkimuksessa käytetään näitä kolmea päämuotoa jaottelemaan kiertotalouden malleja. Näihin syvennytään alaluvuissa 2.2, 2.3 ja 2.4.

2.1 Kiertotalouden teorioiden kehitys

Kuten todettu, kiertotalous-termillä on useita merkityksiä. Termin historia ei ole suoraviivainen, vaan sen kehitykseen ovat vaikuttaneet useat eri koulukunnat ja ajattelutavat. Käsite on saanut alkunsa teollisesta ekologiasta ja ympäristötaloustieteestä. (Esmailian ym. 2020, 2.) Kiertotalouden kehitykseen ja kehittämiseen ovat vaikuttaneet lainsäädäntö ja erilaiset asetukset. Euroopan Unionin toimintaohjelmat ovat kehittäneet kiertotalouden käsitettä, ja työstäneet sen tieteellistä taustaa ja ratkaisuja (Agrawal ym. 2022, 751).

Pohjaa kiertotalouden teorialle ovat luoneet myös muut mallit. Yksi näistä malleista on cradle to cradle (c2c), jonka ideana on kaksi erillistä kiertokulkua, biologinen ja tekninen, joiden sfäärissä resurssit liikkuvat. Biosfäärin materiaalit palautuvat käytön jälkeen takaisin luonnon kiertokulkuun, kun taas teknosfäärin eli teknisen kierron materiaaleja voidaan purkaa ja koota uudestaan, ja näin käyttää jatkuvasti uudelleen. Tämän seurauksena käsite ”jäte” on vanhentunut ja tarpeeton. (Griefahn 2022, 110.) Toinen

pohjaa luonut teoria on biomimmiikka, joka perustuu ihmisten ongelmien ratkaisuun jäljittelemällä luonnon malleja ja strategioita, esimerkiksi miten linnut osaavat lentää ilman fossiilisia polttoaineita. Pohjaa kiertotalouden teorialle on luonut myös teollinen ekologia, jossa keskitytään teollisen ekosysteemin toimijoiden välisiin yhteyksiin, ja niillä pyritään luomaan suljetun kierron prosesseja, joissa jäte toimii lähtöaineena, jolloin ei-toivottuja sivutuotteita ei synny. (Ellen McArthur Foundation 2023.)

Kiertotalouden viitekehysten teemat alun perin kehitti Ellen McArthurin säätiö (EMF). Tämä viitekehys on Euroopassa, kuten myös kasvavissa määrin muualla maailmassa, ollut vaikuttajana Euroopan Unionin poliittisen kehittämisen ja yhteistyön tukemisessa. (Hopkinson ym. 2018, 71.) Euroopan komissio (Euroopan parlamentti, 2023) ehdotti vuonna 2020 toimintasuunnitelman koskien kiertotalouden käytäntöjä, jossa erityisesti kiinnitetään huomiota resurssi-intensiivisiin aloihin, kuten elektroniikkaan, muoveihin, tekstiileihin ja rakennusalaan. Toimintasuunnitelma esitti ehdotuksia esimerkiksi tuotesuunnitteluun ja jätteiden käsittelyyn liittyen.

Tämän ehdotuksen jälkeen noin vuosittain Euroopan komissio on julkaissut ehdotuksia tai toimenpidepaketteja kiertotalouteen liittyen, viimeisimpänä 2022 marraskuussa, jonka tavoitteena on vähentää pakkausjätteitä ja parantaa pakkausten suunnittelua. Helmikuussa 2021 Euroopan parlamentti hyväksyi päätöslauselman, jossa vuoteen 2050 mennessä saavutettaisiin hiilineutraali, ympäristön kannalta kestävä ja myrkytön kiertotalous. (Euroopan parlamentti, 2023.)

Toimintaohjelmissa esitetty kiertotalousmalli on pohjimmiltaan teollinen palvelujärjestelmä, joka korvaa klassisen, yksisuuntaisen elinkaarikäsitteen tarjoamalla materiaalivirtojen uudelleensuunnittelua auttamalla uusiutuvien energialähteiden käytössä (Fogarassy ja Finger, 2020, 2). Kiertotalouden liiketoimintamallien innovointi on yksi Euroopan unionin kehitysprioriteeteista. Kiertotalouden käsitteen tulkinta ja hallinta voi olla myös haastavaa kohdistaa oikeisiin kohteisiin, ja alaan liittyvä markkinamuutostutkimus on melko uutta. (Fogarassy ja Fingeri 2020, 2.)

2.2 Uudelleenkehitys

Uudelleenkehityksen ajatuksena on suunnittelun kautta miettiä tapoja tuottaa helpommin muokattavia ja korjattavia tuotteita, joiden päivittäminen ja kehittäminen onnistuisi paremmin uusien liiketoimintamallien avulla (Li ym. 2023, 11). Kiertotalouden

perusperiaatteita on hyödykkeiden elinkaaren pidentäminen ja kokonaisvaltaisempi hyödyntäminen. Uudelleenkehityksen näkökulmasta voidaan jo suunnitteluvaiheessa ottaa huomioon näiden piirteiden priorisointi, ja pyrkiä kehittämään kestävämpiä ja innovatiivisempia ratkaisuja. Tällä tavalla voidaan suunnitella, että tuotteet ja materiaalit ovat syklisiä, joiden ei ole tarkoitus elinkaaren lopussa päätyä jätteeksi. Singh ym. (2016, 350) tunnistivat neljä suuren skaalan haastetta, joita suunnittelu kiertotalouden mallien mukaisesti kohtaa: tuotteiden käytön ja elinkaaren loppuvaiheen epävarmuustekijöiden hallinta, tuotteiden laadun ylläpito koko tuotteen elinkaaren ajan, kierrätysmateriaaleista valmistettujen tuotteiden laadun varmistus ja ylläpito, sekä kysymykset tuotteiden edustamiseen ja omistukseen liittyen.

Esimerkkinä tällaisista uudelleenkehitysinnovaatioista toimii vuonna 2012 Kaliforniassa perustettu Apeel-yritys. Apeel tuottaa myytävälle hedelmille ja vihanneksille syötävän, hajuttoman ja mauttoman suojakuoren, joka auttaa pitämään kosteuden hedelmässä ja hidastaa hapettumisen aiheuttamaa pilaantumista. Vaikka suojamuovit toimisivat vihannesten suojaamisessa, ne aiheuttavat muovijätettä. Ratkaisua on lähdetty etsimään uudelleensuunnittelun avulla. Apeelin suojakuori on valmistettu muun muassa puhdistetuista mono- ja diglyserideistä, jotka on saatu GMO-vapaista kasviöljyistä, jotka jäljittelevät kaikissa hedelmissä ja vihanneksissa jo olevaa luonnollista suojaa. Innovaation ideana on vähentää sekä ruokahävikkiä että ruuan muovipakkauksista aiheutuvaa jätettä. (Apeel 2023.) Ratkaisussa on ajatustapaa muutettu niin, että jo suunnitteluvaiheessa tartutaan siihen, miten voitaisiin ehkäistä turhan jätteen tuottamista.

2.3 Uudelleenvalmistus ja korjaus

Uudelleenvalmistus ja korjaus liittyvät valmistusprosessin kierrätyspotentiaalilin lisäämiseen ja jätteiden vähentämiseen joko materiaalien tai prosessien puolesta. Näillä keinoilla pyritään kasvattamaan tuotteiden taloudellista arvoa. (Li ym. 2023, 11.) Kiertotalouden periaatteina erilaiset tuotteiden ylläpitoon perustuvat palvelut, uudelleenvalmistus ja korjaus voisivat olla ratkaisuja, joilla olisi vähemmän ympäristölle haitallisia vaikutuksia, ja ne perustuisivat uusiutuvaan energiaan. Tämä olisi saavutettavissa suunnittelemalla ja optimoimalla tuotteita niin, että tehokas uudelleenkäyttö, tuotteiden purkaminen osiksi ja kunnostaminen karsisi tuotteista aiheutuvaa jätettä. (Singh ym. 2016, 343.) Singhin ym. (2016, 343) mukaan kiertotalouden periaatteet kannattavat kierrätettyjen materiaalien erillistä keräämistä saman tuoteketjun

sisällä. Tämän avulla voitaisiin saavuttaa suurimmat hyödyt niin materiaalin, talouden ja ympäristön osalta. Tätä tukee kollektiivinen hallinnointi ja jakaminen edellä mainittujen toimintojen osalta tietyn tuotteen arvoketjun eri tekijöiden tai toimijoiden kesken.

Tanskalainen rahtiyhtiö Maersk on kehittämässä tapoja, miten rakentaa kierrätettäviä aluksia. Silloin alukset voitaisiin purkaa niin, että materiaalit pystyttäisiin käyttämään uudelleen uusien alusten rakennuksessa. Maersk on kertonut, että noin 85 % kaikista laivoista puretaan Etelä-Aasiassa huonokuntoisissa laitoksissa, vaikka iso osa varustamoista onkin ottanut käyttöön vastuullisen kierrätyspolitiikan. (Euroopan Unioni EP.) Merenkulkuala on riippuvainen tällä hetkellä erityisesti polttoaineesta ja teräksestä. Maersk tutkii, miten laivoja valmistetaan laadukkaaseen kierrätykseen jo valmistusvaiheessa, ja kehittää materiaaleille Cradle to cradle-passia. Se on online-tietokanta, jota voidaan hyödyntää luetteloimaan, tunnistamaan ja kierrättämään materiaalit nykyistä laadukkaammin uusien laivojen materiaaleiksi. (Ellen McArthur Foundation 2021a.)

2.4 Kierrätys

Kierrätys käsitteenä viittaa tuotteiden potentiaaliin uudelleenkäyttöä, kunnostusta ja uudelleenvalmistusta varten, jonka avulla tuotteen käyttöikä pitenee (Li ym. 2023, 11). Oleellinen kysymys tuotteiden kierrätyksessä on, ovatko uudelleenvalmistetut tuotteet, joissa käytetään itsessään jo kierrätettävää materiaalia, tuottamisen arvoisia? Materiaalilla voi olla jo olemassa toimiva kierrätysjärjestelmä. Uudelleenvalmistus kuluttaa yleensä vähemmän energiaa prosessissaan ja lopputuote on arvokkaampi kuin normaalista materiaalin kierrätyksestä saatu tuote. Uudelleenvalmistus on siksi yleisesti toivottavampi pyrkimys kuin kierrätys kiertotalouden näkökannalta. (Singh ym. 2016, 348.)

Resortecs on belgialainen yritys, joka on lähtenyt ratkaisemaan isoa ongelmaa vaatteiden kierrätyksen tehostamiseksi. Tällä hetkellä alle 1 % kaikista vaatteista kierrätetään laadukkaasti. Loput vaatejätteistä päätyy poltettavaksi tai ne viedään kaatopaikalle, joka merkitsee 100 miljardin dollarin materiaalihävikkiä vuosittain. (Ellen McArthur Foundation 2021b.) Resortecs on kehittänyt korkeassa lämpötilassa liukenevat tikkaukset, joiden avulla vaatteita voidaan purkaa helpommin osiin, ja materiaalit saadaan kierrätettyä paremmin. Resortecs väittää tikkaustensa avulla purkamisprosessin olevan viisi kertaa nopeampaa kuin perinteisten menetelmien avulla, ja jopa 90 % materiaalista

voidaan innovaation avulla saada kierrätettyä. Tämän teknologian käyttöönotolla voidaan säästää vettä, materiaalin kulutusta ja hillitä hiilidioksidipäästöjä. (Resortecs 2023.)

3 Digitaaliset innovaatiot kiertotalouden implementoinnissa

Digitalisaatio voidaan nähdä yhtenä tärkeänä kiertotalouden mahdollistajana, sillä se parantaa näkyvyyttä ja ymmärrystä tuotteista ja resursseista. Digitaalisten innovaatioiden avulla voidaan saada tietoa tuotteiden ja materiaalien sijainnista, kunnosta ja saatavuudesta. (Antikainen ym. 2018, 46.) Resurssien reaaliaikaisen sijainnin tiedostaminen lisää resurssin lähestyttävyyttä ja parantaa näin ollen sen kierrätys- ja kunnostusmahdollisuuksia (Agrawal, 2022, 752). Kiertotalouden periaatteiden lähestyminen ja toteuttaminen digitaalisten teknologioiden avulla mahdollistaa vähitellen synergioiden kehittämisen ja uusien järjestelmien luomisen, joissa yhdistyvät kiertotalouden ja teollisuus 4.0:n vahvimmat piirteet, ja tämän avulla ne tukevat toinen toisiaan (Voulgaridis ym. 2022,8).

3.1 Digitaalinen kiertotalous

Kiertotalouden periaatteiden mukaan energiavirtojen ja materiaalien kiertokulun sijaan liiketoimintaprosessit muutetaan kestäviksi resurssijärjestelmiksi. Digitaalisten innovaatioiden ja työkalujen soveltaminen kiertotaloudessa auttaa tätä kautta poistamaan jätettä ja vähentämään haitallisia ympäristövaikutuksia. (Agrawal, 2022, 752.)

Disruptiiviset digitaaliset innovaatiot teollisuus 4.0:n alalla edistävät uudenlaisia liiketoimintamalleja ja mahdollisuuksia muun muassa teollisuusyrityksille (Esmaeilian ym. 2020, 1). Teollisuus 4.0 tunnetaan tuotantoteollisuudessa myös nimellä älykäs tuotanto (Ghoreishi ja Happonen, 2019, 4). Yksi mahdollisuus näissä uudenlaisissa liiketoimintamalleissa on kiertotalouden implementoinnissa. Digitaaliset teknologiat, erityisesti teollisuus 4.0:n liittyen ovat tunnistettu potentiaalisiksi kiertotalouden liiketoimintamallien mahdollistajiksi. Digitalisaation avulla tiedonhallinta ja sen jakaminen eri tahojen välillä helpottuu. (Ranta ym. 2021, 1.)

Digitaalisten teknologioiden merkitystä korostetaan vihreän tuotekehityksen kannalta, koska ne toimivat liitännä perinteisten valmistustekniikoiden rajapinnassa (Vouldaridis ym. 2022, 8). Kuviossa 1 on esitetty jaottelu viiteen eri osa-alueeseen, joihin teollisuus 4.0:n teknologioiden hyödyntämisellä voidaan vaikuttaa ja ajaa kiertotalouden periaatteiden implementointia liiketoimintamalleihin. Kuvion 1 muutosvaikutukset on kerätty tutkimuksissa tunnistetuista mahdollisista vaikutusalueista (Vouldaridis ym. 2022, 8). Kaikki nämä viisi osa-alueita voidaan jakaa kiertotalouden mallien

strategioihin, joissa tavoitteena on parantaa prosessien kestävyyttä. Muutosvaikutukset tukevat kiertotalouden implementointia teollisuus 4.0:n teknologisten innovaatioita hyväksi käyttäen.

Elinkaaren hallinta	Tilanteisiin sopivien teknologioiden avulla on mahdollista lisätä yleistä tehokkuutta kiertotalouden toiminnoissa, energiankulutuksen hallinnassa ja tuotekehityksen optimoinnissa.
Uudelleenvalmistus	Hyödyntämällä päätöksentekoa tukevia apuohjelmia voidaan edistää kustannusten pienentämistä mutta säilyttää suorituskyky ja innovointi, johon liittyvät kestävät liiketoimintamallit. Näillä malleilla voidaan parantaa palvelun ja jälkimyynnin yleistä toimivuutta.
Resurssitehokkuus	Luonnonvarojen ja jätteiden hallintaa optimoimalla materiaalien purkamisen ja uudelleenkäytön periaatteet ja keräämällä niistä samalla tietoja. Muutos voisi mahdollistaa myös älykkäät materiaalit, jossa hyödynnetään tarvittavan materiaalin tyyppiä ja määrää, ja avustetaan elinkaaren hallintaa optimoimalla tuotteiden käyttöaika.
Omaisuuksien käyttö	Laitteiden helpompi päivittäminen ja komponentteihin sisällytettävät sensorit tukevat reaaliaikaista tiedonkeruuta ja varastojen hallintaa. Vastaavat apuohjelmat avustavat kysynnän seurannan vaiheita, jolloin voidaan vähentää liiallista materiaalin kulutusta.
Laadun parantaminen	Tuotteiden, palvelujen ja prosessien yleisen laadun parantuminen. Toimitusketjuja optimoidaan laadukkaiden tuotteiden ja pidemmän elinkaaren saavuttamiseksi. Tuottavuus paranee myös vähentämällä rutiininomaista työtä digitalisoitujen toimintojen avulla.

Kuvio 1 Kiertotalouden ja T4.0:n implementoinnin muutosvaikutukset (Voulgaridis ym. 2022)

Näihin teknologioihin liittyy kuitenkin myös riskitekijöitä, jotka ovat otettava huomioon ja suhteutettava niiden tarjoamiin mahdollisiin suurempiin hyötyihin ja etuihin verrattuna perinteisempiin vaihtoehtoihin ilman teknologisten innovaatioiden hyödyntämistä (Goreishi ja Happonen 2019, 2). Kolme keskeistä estettä teollisuus 4.0:n implementointiin ovat epävarmuus taloudellisista hyödyistä, infrastruktuurin ja välineiden puute sekä muutosvastarinta organisaatiossa. Epävarmuus taloudellisesta näkökulmasta saattaa aiheuttaa käyttöönottoa epävarmassa ilmapiirissä, joka taas voi puolestaan ajaa epäselviin arvioihin alhaisesta tuotto prosentista ja voi aiheuttaa taloudellisia menetyksiä. (Durmaz & Budak 2022, 6677.) Tutkimustulokset myös osoittavat, että taloudellisten resurssien puute teollisuus 4.0:ssa on merkittävämpi ongelma kuin yleinen suunnitelmallisuuden puute, ja taloudellisten resurssien rajallinen saatavuus on merkittävä este yritysten digitaaliselle muutokselle (Aoun ym. 2021, 5).

Teollisuus 4.0:n implementointi aiheuttaa suuria kustannuksia organisaatioiden tekniseen infrastruktuuriin, tutkimukseen ja kehitykseen, tekniseen koulutukseen ja tietotekniikan tukitoimintoihin. Investointien puutteen tai liian vähäisen resurssien hallinnoinnin takia voi infrastruktuuri jäädä puutteelliseksi, jolloin se ei pysty palvelemaan tarpeeksi tehokkaasti teollisuus 4.0:n teknologioiden tehokasta käyttöönottoa. (Da Silva ym. 2020, 331.) Muutosvastarinta on merkittävin sosiaaliseen näkökulmaan liittyvä este teollisuus 4.0:n implementoinnissa. Myös muun muassa sidosryhmien luottamuksen ja varmuuden puute teollisuus 4.0:n teknologioihin on keskeinen este teknologisten innovaatioiden käyttöönotossa. (Durmaz & Budak 2022, 6664.)

3.2 Lohkoketjut

Digitaalisten verkostojen rakentaminen materiaalien ja toimitusketjujen tietojen jakamiseksi voi johtaa uudelleenkiertäviin resurssivirtoihin, jätteen vähentämiseen ja parempiin tietokantoihin, joiden avulla yritykset voivat tehdä päätöksiä implementoidakseen kiertotalouden malleja liiketoimintamalleihinsa (Böckel ym. 2021, 525). Kiertotalouden malleja hyödynnettäessä on hyödyllistä tietää, millaisia resursseja missäkin on käytössä, ja tällainen kartoitus ja sen tiedon kokoaminen voi olla hankalaa ja työlästä. Esmaelien ym. (2020, 3) kertovat, kuinka lohkoketjujen potentiaali piilee siinä, että jokainen sopimus, maksu ja transaktio jättää digitaalisen kirjauksen lohkoketjuun. Nämä kirjat voidaan sitten varmentaa ja jakaa yksilöiden, koneiden, algoritmien ja organisaatioiden kesken.

Lohkoketjuja hyödyntäen voitaisiin rakentaa yhteinen tietoinfrastruktuuri, jonka teknologia voi mahdollistaa uudestaan hyödynnettävien resurssien hankinnan ja tukea niiden tehokkuutta. Se voisi myös auttaa materiaalien talteenotossa, erityisesti kunnostuksen ja kierrätyksen yhteydessä. Teknologia voisi seurata materiaali- ja resurssivirtoja eri toimitusketjujen ja kulutusvaiheiden kautta valmistajilta ja kuluttajilta. (Böckel ym. 2021, 528.) Lohkoketjuteknologia tukee kiertotalouden strategisia malleja, joissa materiaalit ja niiden uudelleenkierto ovat pääosassa. Sivutuotteiden ja elinkaaren päässä olevien materiaalien kierrätys ja hyödyntäminen voi helpottaa.

Useasti turvallisuus on mainittu lohkoketjuteknologian integroinnin tärkeänä etuna (Alammery ym. 2019, 8). Yleisesti liiketoiminnan tietoturvan osalta olisi parempi, jos yritykset eivät säilyttäisi asiakkaidensa henkilötietoja. Tämä vaatisi kuitenkin uusia tietokantoja, kuten lohkoketjujen tietokantoja, jotka mahdollistavat liiketoiminnan ilman

henkilötietojen käyttöä. (Raddatz ym. 2021, 1.) Lohkoketjujen etu turvallisuudessa on niiden hajautuneisuus. Kaikki lohkaketjuverkossa olevat osapuolet jakavat tietoja ja voivat kopioida ja säilöä tietoa yhteisestä rekisteristä. Näin ollen esimerkiksi vikatilanteessa tai hyökkäyksessä yhden osapuolen ollessa alhaalla muut osapuolet kuitenkin säilyttävät samaa tietoa. Jotta hyökkääjä hallitsisi lohkaketjuverkkoa, hänen pitää hallita siitä 51 % palvelimista eli solmuista. (Aoun ym. 2021, 7.)

Lohkoketjuteknologialla on kuitenkin myös rajoitteensa ja kritiikkinsä. Suurena haasteena on kehittää toimiva suunnittelumalli lohkaketjuille, jota eri käyttäjät ja yritykset voivat helposti hyödyntää ja käyttää ilman asiantuntijuutta (Dapp 2018, 178). Vaikka lohkaketjujen avulla voidaan yhdistää maailmanlaajuisia ja monimutkaisia toimitusketjuja, järjestelmän käyttämiseen ja ylläpitoon vaativien taitojen puuttumisen tietoinfrastruktuurista saattaa estää tai hidastaa uusien käyttäjien saavuttamista. Puuttuva osaaminen lohkaketjuteknologian käytöstä ei välttämättä tue siitä saatavia hyötyjä, jolloin koko teknologian käyttöönotto voi olla turhaa. Käyttöönotto voi myös tuntua raskaalta tai hankalalta uusille käyttäjille, jolloin sitä saatetaan lykätä tai vastustaa kokonaan. Verkostoista saadaan siten resurssit paremmin kiertämään miten moninaisempia mahdollisia resurssien tarjoajia ja niitä tarvitsevia infrastruktuurissa on mukana. (Kamilaris ym. 2019, 648.)

Haasteista esiin nousee myös laki- ja säädösasioita koskevat kysymykset, jotka saattavat osaltaan rajoittaa lohkaketjujen käyttöönottoa myös kiertotalouden näkökulmasta. Vaikka aloitteita aiheesta on esitetty, tutkittuja liiketoiminnallisia esimerkkejä on vähän, koska niihin liittyy edelleen paljon epävarmuuksia teknologian uutuuden takia. Näin ollen lohkaketjujen pitkän aikavälin vaikutus hallintoon, talouteen, taloudelliseen kestävyYTEEN ja sosiaalisiin näkökohtiin on vielä arvioimatta. (Kamilaris ym. 2019, 648.) Luomatta ovat alustavat menetelmät, yhteiset käytännöt sekä teknologinen ja oikeudellinen semantiikka korkeimmalla hallinnollisella tasolla, jotta voidaan varmistaa oikeudellinen varmuus tuleville lohkaketjusovelluksille. Hallitusten on säädettävä nykyisten prosessien ja rakenteiden muutos, jotta mahdolliseen muutokseen oltaisiin valmiita. (Cagigas ym. 2021, 13917.) Lohkoketjun muuttumattomuus voi aiheuttaa ongelmia hallituksille tai virastoille, jotka tarvitsevat tietoja lakia ja järjestystä varten, tai jos hallitukset haluavat tehdä lakimuutoksia minkä tahansa järjestelmän jo määriteltyihin toimintatapoihin (Alamary ym. 2019, 14). Vielä on epäselvää, minkälainen oikeudellinen asema lohkaketjussa oleville tiedoille annettaisiin ja edellyttäisikö se jonkunnäköisiä lisäehtoja

(Cagigas ym. 2021, 13912). Lohkoketjujen käyttöönotosta aiheutuvat kustannukset voivat olla hyvin korkeat. Näiden täytäntöönpanokustannusten lisäksi myös monien lohkoketjuteknologioiden transaktio- tai laskentakustannukset ovat korkeat. (Alammary ym. 2019, 13.)

3.3 Esineiden Internet

Esineiden internet (engl. Internet of things, IoT) tuo mukanaan mahdollisuuden kerätä suuria määriä tietoa käytössä olevista tuotteista (Ingemarsdotter ym. 2019, 2). Teollisuuden uudella aikakaudella IoT on kasvattanut suosiotaan, jonka avulla koneita ja prosesseja voidaan valvoa ja ohjata paremmin. Koneiden välinen viestintä, viestintä koneen ja käyttäjän välillä sekä koneen ja hallinnon välinen tiedonsiirto ovat mahdollisia IoT:n avulla, jossa nopea viestintä ja tietotekniikka ovat avainasemassa. (Ramadoss ym. 2018, 57.) IoT ja kiertotalous nähdään mahdollistajina kustannusten alentamisen, resurssien seurannan tehostamisen tuotteiden ja palvelujen elinkaaren aikaisen korkean laadun ylläpitämisen malleille ja järjestelmille (Voulgaridis ym. 2022, 1).

Ramadossin ym. (2018, 62) mukaan kiertotalouden ja IoT:n välinen yhteys voi helpottaa kiertotalouden implementointia. IoT:n mahdollistama kiertotalous voisi synnyttää "tulevaisuuden tehtaan" mallin, jossa kustannukset laskevat, tehokkuus kasvaa ja laadukkaat, nopeasti valmistettavat 'yhden kappaleen erät' tulevat mahdollisiksi. Jos yrityksen tavoitteena ovat tuottavuus ja kestävä tuotanto, IoT voi auttaa mahdollistamaan nämä tavoitteet tietojen analysoinnin ja tekoälyn avulla. Kun tehokkuutta seurataan automaattisesti valmistusprosessin aikana ja käyttöjakson lopussa, kaikki arvoketjun osat voivat kasvattaa tehokkuuttaan. (Ramadoss ym. 2018, 62.)

Tehokas omaisuudenhallinta kiertotaloudessa on mahdollista IoT-konseptin avulla upottamalla antureita uudelleenkäytettäviin tuotteisiin tai laitteisiin. IoT:n käyttöönotto kiertotalouden implementoinnissa lisää käyttöönottokustannuksia, mutta IoT mahdollistaa prosessin, jonka avulla voidaan tuottaa hyvin vähäisistä olemattomaan määrään jätettä, ja joka pystyy kierrättämään materiaaleja. IoT, jossa käytetään edullisia RFID- tai QR-antureita, voi auttaa resurssien palauttamisessa tuotteen elinkaaren loppuvaiheessa, jotta ne voidaan kierrättää osiksi tai uudelleenhyödynnettäväksi. (Ramadoss ym. 2018, 62.)

IoT:stä voi olla hyötyä myös kehitettäessä uusia arviointimenetelmiä, joilla kvantifioidaan älykkäisiin infrastruktuureihin liittyviä ympäristövaikutuksia, uusia energianhallintatyökaluja tai uusia Internet-alustoja, joilla hallitaan tuotteiden elinkaaritietoa. (Rosa ym. 2020, 1673.) IoT on myös arvokas innovaatio luonnonvarojen hallinnassa, ja sitä voidaan esimerkiksi hyödyntää uusien jätehuoltostrategioiden mahdollistamiseksi älykkäissä kaupungeissa (Rosa ym. 2020, 1673; Esmaeilian ym. 2018, 178).

IoT:n hyödyntäminen kiertotaloudessa pitää sisällään myös omat haasteensa, erityisesti turvallisuuskysymysten osalta. Laite, joka muodostaa yhteyden internetiin, saa osakseen myös tietotekniikan tietoturvariskit. Näin ollen on otettava huomioon jotkin esineiden internetin perusturvavaatimukset, kuten valtuutus, todennus, luottamuksellisuus ja tietoturva. (Elkhodr ym. 2016, 92.) IoT-järjestelmien toiminnot perustuvat erilaisten tietojen keräämiseen ja käsittelyyn, joista iso osa voi olla yksityistä, arkaluonteista tai merkittävää liiketoiminnan kannalta. Tällaiset olosuhteet edellyttävät luotettavia lähestymistapoja tietoturvan ja yksityisyyden toteutumiseen sekä kerättyjen tietojen suojaamiseksi että käyttäjän suojelemiseksi. (Voulgaridis ym. 2022, 5.) Esineiden tuottamat tiedot on kerättävä, analysoitava, tallennettava, lähetettävä ja esitettävä aina turvallisella tavalla (Elkhodr ym. 2016, 92).

Vaatimukset ovat poikkeuksellisen tärkeitä kiertotalouden periaatteita toteuttaville organisaatioille. Resurssien tai tuotteiden kiertoketjun sidosryhmien suojeleminen ja yksityisyys on taattava, jotta IoT:n hyödyntäminen olisi järkevää. Lisäksi esimerkiksi tunkeutuminen kiertotietojen seurannan, tuotannon, toimitusketjujen tai loppukäyttäjien tietoihin voivat aiheuttaa yritykselle paljon vahinkoa. (Voulgaridis ym. 2022, 6.)

3.4 Tekoäly

Kiertotalouden mallien tukemisessa tekoäly (engl. Artificial Intelligence, AI) voi mahdollistaa tuotantoprosessin tehokkuuden kasvattamisen ja lopputuotteen elinkaaren automaattisen etäseurannan. Nopea uusien prototyyppien luominen, oppimisprosessin helpottaminen ja uudelleensuunnittelumahdollisuudet ovat taloudellisen tuotantomallin keskeisiä piirteitä. (Ronaghi 2023, 14362.) Tekoälyn suhteellinen etu, teknologian turvallisuus, oppimisen helppous, helppokäyttöisyys ja integroitumisaste muihin teknologioihin vaikuttavat tekoälyn käyttöönoton omaksumiseen (Ronaghi 2023, 14369).

Ghoreishi ja Happonen (2019) jakavat tekoölyn vaikutuksen mahdolliseksi aikaisemmin esitettyihin kiertotalouden malleihin. Ensimmäinen malli on uudelleenkehitys ja -arviointi, jossa koneoppimisen avulla parannetaan tuotteiden ja niiden komponenttien suunnittelua ja kehittämistä sekä hallitaan jätteiden syntymistä. Toisessa ja kolmannessa mallissa tekoöly voi parantaa tuoteprosessien lajittelua ja purkamista, komponenttien jäljentämistä ja materiaalien kierrätystä. Lisäksi tekoöly voi auttaa maksimoimaan liikevaihtoa yhdistämällä reaaliaikaisia ja historiallisia tietoja käyttäjistä ja tuotteista sekä luoda älykästä varastonhallintaa hintojen ja kysynnän ennustamisen avulla. (Ghoreishi ja Happonen 2019, 7.)

Chidepatil ym. (2020) ovat tutkineet, miten tekoölyä voidaan hyödyntää muovin kierrätyksessä. Heidän tutkimuksessaan tekoölyä hyödynnetään antureiden ja erilaisten kameroiden avulla, jotka keräävät muovijätteestä tietoja, kuten väri, fysikaalinen ja kemiallinen koostumus ja muoto. Näitä ominaisuuksia käytetään muovien erotteluun sen kierrätysvaiheessa. Tekoölyn tehtävänä on minimoida epävarmuustekijät ja mahdollistaa tehokas ja älykäs erottelu. Tekoölyn avulla voidaan esimerkiksi kouluttaa erottelujärjestelmä tunnistamaan kaksi samantyyppistä muovipulloa, vaikka toinen niistä näyttäisi hyvin erilaiselta kuin toinen. Kun otetaan huomioon myös sekä nopeus että tarkkuus, joita teollisen mittakaavan asetukset lajittelussa edellyttävät, tekoölyavusteisella tekniikalla voidaan saavuttaa lähes 99 prosentin tarkkuus väripohjaisessa erottelussa. Tämän lisäksi tutkimuksessa yhdistettiin lohkoketjuteknologiaa luottamukselle perustuvana alustana muovijätteen erottelijoiden, kierrättäjien ja kierrätetyn raaka-aineen ostajien välillä. Lohkoketjuverkon avulla digitaalista tietoa on voinut jakaa sidosryhmien kesken. (Chidepatil ym. 2020, 10.)

3.5 Muita mahdollisia innovaatioita

Materiaalien jatkuva kierto edellyttää, että tuotteiden, komponenttien ja materiaalien suunnittelussa otetaan huomioon enemmän ominaisuuksia, kuten purkaminen, päivitettävyys tai kierrätysmahdollisuudet. Kun näihin ominaisuuksiin lisätään materiaalivalikoiman laajuus ja rakenteiden muokkausmahdollisuudet 3D-tulostuksen ja muiden valmistustekniikoiden avulla, suunnitteluvaihtoehtoja on lukemattomia. Tekoölyteknologia voi olla hyödyllinen työkalu, jonka avulla suunnittelijat voivat hallita tätä monimutkaisuutta päätöksiä tehdessään. (Ellen McArthur-säätiö, 2019, 12.)

3D-tulostus mahdollistaa pienten erien tai jopa yksittäisten räätälöityjen yksiköiden taloudellisen valmistuksen, joten voisi olla mahdollista järjestää valmistusjärjestelmä uudelleen hajautetuiksi 3D-tulostuslaitoksiksi, jotka voisivat käyttää paikallisia materiaaleja (Garmulewicz ym. 2018, 113). 3D-tulostuksen joustavuus prosesseissa perustuu siihen, että tuotteiden mallinnukset ovat digitaalisessa muodossa. Jos tuotteen elinkaaren keskivaiheilla tapahtuu odottamattomia vikatilanteita tai käytössä muuten ilmenee korjaustarpeita, mallinnuksia voidaan muuttaa mahdollisuuksien mukaan, ja 3D-tulostuksella voidaan uudelleentalmistaa tarvittavia osia ja tarjota huoltopalveluita. (Kerin & Pham 2019, 3.) 3D-tulostus perustuu digitaaliseen tuotantoon ja muokattavuuteen, jossa digitaalisia tuotetiedostoja voidaan mukauttaa muuttuviin tarpeisiin, mikä on välttämätöntä tuotteen elinkaaren pidentämiseksi. 3D-tulostuksen haasteina on kehittää materiaaleja, jotka mahdollistavat kestävästä käytön ja säilyttävät arvonsa uudelleenkäytössä. Lisäksi monoliittiset ja rakenteellisesti monimutkaiset osat, jotka tukisivat uudelleenkäytön ja kierrätettävyyden suunnittelua, saattavat olla haaste arvon säilyttämisen kannalta. On tärkeää, että 3D-tulostuksen mahdollistamat kestävästä valinnat tuotteen useita elinkaaria, kun suunnitellaan kiertotalouden näkökulmasta. (Sauerwein ym. 2019, 1148.)

Lisätty todellisuus (engl. augmented reality, AR) ja virtuaalitodellisuus (engl. virtual reality, VR) voivat auttaa korjausprosesseissa, joiden ansiosta tuotteiden elinkaarta voidaan pidentää. Virtuaalitodellisuus hyödyntää tietokonegrafiikkaa, jonka avulla käyttäjät voivat tarkastella 3D-tuotteita tai -ympäristöjä, ja lisätty todellisuus on tähän 3D-kuvantamiseen laajennus, jossa tietokoneella luotu tieto asetetaan päällekkäin reaali maailman kohteiden kanssa (Kerin & Pham 2019, 2). Lisätyn todellisuuden tapauksessa henkilökuntaa, jolla ei ole vahvaa teknistä osaamista, voidaan siitä huolimatta ohjata korjaamaan tai vaihtamaan tuotteiden varaosia vaikeapääsyisissä paikoissa. Sekä lisätyn todellisuuden että virtuaalitodellisuuden tarjoama virtuaalikokemus voi mahdollistaa syvemmän ymmärryksen ongelmista tai olosuhteista, joita olisi muuten vaikeampi hahmottaa tai tunnistaa. Näin voidaan esimerkiksi tarkastella innovaatioita ja mahdollisuuksia ilman, että niitä tarvitsee valmistaa turhaan ja kuluttaa resursseja. (PwC, 2019, 31.)

Virtuaalitodellisuuden käyttöä on myös suunniteltu yhdistettävään automaattiseen purkamisjärjestyksen suunnitteluun (engl. disassembly sequence planning, DSP), jonka avulla suunnittelijat voivat arvioida eri mallien purkamismahdollisuuksia. Sitä voidaan

hyödyntää suunnitteluvaiheessa laadittujen purku- ja kokoonpanosääntöjen vaatimusten täyttämässä. Tässä virtuaalitodellisuus voi käyttää reaaliaikaisia resurssitietoja prosessin parametrien laskemiseen. (Kerin & Pham 2019, 5). Robotiikka, puettavat laitteet (engl. wearables) ja lisätty todellisuus, jotka perustuvat rakennus-, elintarvike-, valmistus- ja vapaa-ajan teollisuuteen, voivat mahdollisesti muuttaa toimitusketjun, logistiikan ja omaisuuden hallinnan tekniikoita tekoälyn ja IoT:n konseptin avulla (Ramadoss ym. 2018, 62).

Kaaviossa 1 on esitetty eri teknologisten innovaatioiden, pääosin teollisuus 4.0 teknologioiden käyttömahdollisuuksia siihen, miten kiertotalouden periaatteiden implementointia voitaisiin niiden avulla tukea. Kaikilla teknologioilla on omat vahvuutensa ja alueensa, missä niiden käyttöönoton avulla voitaisiin saada mahdollisimman tehokas hyöty irti. Kuitenkin monet teknologioista tukevat vahvasti toisiaan, ja laajempialainen siirtymä ja teknologioiden käyttöönotto avaa paljon enemmän mahdollisuuksia, miten teknologioita voitaisiin hyödyntää. Esimerkiksi IoT:n keräämästä datasta tekoälyä hyödyntäen voidaan mahdollisesti saada paljon tehokkaammin tunnistettua organisaatiolle hyödyllinen tieto.

Teknologia	Käyttö kiertotalouden implementoinnissa
Lohkoketjut	Mahdollistaa näkyvyyttä, läpinäkyvyyttä/avoimuutta, lisää jäljitettävyyttä, älykstä sopimuksentekoa, edistää turvallisuutta transaktioiden ja tietojen omistajuutta koskevien ratkaisujen avulla.
IoT	Tukee liiketoimintamalleja, tuotteiden ja resurssien seurantaa, tuotteiden kunnan ja logistiikan seurantaa, elinkaaren seurantaa, toimitusketjujen optimointia ja jätahuoltoa, edistää älykkäiden teollisuusympäristöjen käyttöönottoa ja yhteistyötä.
Tekoäly	Tukee data-analytiikkaa, tuotesuunnittelun resurssien optimointia, liiketoimintamallien parantamista, prototyyppien nopeampaa kehittämistä, koneoppimista, jätteiden lajittelun ja materiaalien uudelleentuotantoavustusta.

Robotiikka	Kasvattaa tehokkuutta ja tuottavuutta
3D tulostus	Mahdollistaa monenlaisten erilaisten materiaalien käytön ja mallinnusten muutokset myöhemmässä vaiheessa, pienentää valmistuseriä vähentäen jätteiden määrää
AR ja VR	Uusien innovaatioiden tarkastelu ilman niiden valmistusta, valmistus- ja purkamisprosessin suunnitteluapu, avustaa ja tukee ihmisen prosesseja, auttaa syvällisemmässä oppimisessa

Taulukko 1 Teknologisten innovaatioiden käyttö kiertotalouden implementoinnissa

Tästä voidaan siis päätellä, että teollisuus 4.0:n teknologiat tarjoavat merkittävää tukea kiertotalouden periaatteiden hyödyntämisessä ja edistämässä. Teknologioita hyödyntämällä organisaatiot voivat pyrkiä tehostamaan prosesseja ja resurssien hallintaa, ja minimoida jätteiden määrää. Automaatio ja tiedon nopea käsittely voivat vahvistaa valvontaa ja mahdollistaa suuremman skaalan kierrätysprosesseja. Integroimalla teknologioita toisiinsa, voidaan optimoida kokonaisuutta. Mitä tehokkaammin teknologiat edistävät kestäviä ratkaisuja prosesseissa, sitä enemmän ne tukevat oletettavasti ympäristön kestävä tulevaisuutta.

4 Yhteenveto ja johtopäätökset

4.1 Yhteenveto

Tutkielman tarkoituksena oli tutkia, millainen rooli digitaalisilla innovaatioilla on kiertotalouden mallien implementoinnissa, ja miten eri teknologiat tätä implementointia tukevat. Näihin aiheisiin syventyminen jaettiin kolmeen aihetta käsittelevään tutkimuskysymykseen:

1. Millä tavoin yritykset voivat hyödyntää kiertotalouden malleja yritysten toiminnassa?
2. Millaisia yleisimpiä digitaalisia innovaatioita kiertotalouden mallien hyödyntämisessä voidaan käyttää?
 - a. Minkälainen merkitys digitalisaatiolla on yritysten mahdollisuuksiin implementoida kiertotalouden periaatteita liiketoimintamalleissaan?

Ensimmäiseen tutkimuskysymykseen vastattiin ensimmäisessä pääluvussa. Luvussa määriteltiin tutkielmassa käytetty määritelmä kiertotaloudesta yritysten näkökulmasta, ja käytiin läpi tämän periaatteiden kehitystä. Pääluvussa myös jaoteltiin kiertotalouden mallit kolmeen eri jaotteluun, joita yritykset voivat implementoida liiketoimintamalleissaan. Tämä pääpiirteinen jaottelu nosti esille yleisimmät osa-alueet, jossa kiertotalouden malleja voidaan hyödyntää. Luvussa annettiin myös esimerkkejä siitä, miten näitä malleja konkreettisesti voidaan hyödyntää ja implementoida.

Toiseen tutkimuskysymykseen vastattiin toisessa pääluvussa, jossa käytiin läpi teollisuus 4.0:n yleisimpiä teknologisia innovaatioita. Luvussa käytiin läpi näiden teknologioiden mahdollisuuksia ja haasteita, ja sitä miten niitä voitaisiin hyödyntää kiertotalouden implementoinnissa, ja miten ne voisivat tukea organisaatioita kestävämmissä liiketoimintaprosesseissa. Luvussa puhuttiin myös näiden eri teknologioiden integroitumisesta infrastruktuuriksi, jossa eri teknologiat kattavat prosessien eri osa-alueita ja tukevat toistensa toimintoja.

Toisen tutkimuskysymyksen alakysymykseen vastattiin myös toisessa pääluvussa, jossa käsiteltiin digitalisaation ja digitaalisten innovaatioiden vaikutusta kiertotalouden implementoinnissa. Luvussa käsiteltiin teollisuus 4.0:n eri teknologioiden käyttöönoton

avulla syntyvää infrastruktuuria, joka voi osaltaan edesauttaa kiertotalouden mallien implementoinnissa. Lisäksi pohdittiin digitalisaation mahdollistamaa tiedonhallintaa ja sen jakamisen helpottumista, joka on merkityksellistä kiertotalouden implementoinnissa. Luvussa käsiteltiin sitä, miten digitalisaatiolla voidaan parantaa tehokkuutta kiertotalouden toiminnoissa ja vähentää materiaalien kulutusta.

4.2 Johtopäätökset

Kiertotalous on vielä suhteellisen uusi termi, vaikka yleisestä kestävyydestä ja ympäristöystävällisyydestä puhutaankin enemmän. Organisaatioiden päätökset toimia vastuullisemmin lähtevät yleensä pienistä askeleista liikkeelle, ja siksi yritykset, jotka toimisivat täysin tai suurilta osin kiertotalouden mallien mukaan, onkin vielä suuri vähemmistö. Muutos lineaarisesta talousmallista sykliseen ei ole pieni, ja siksi tämä muutos ei tapahdukaan hetkessä. Onnistumiset tällaisessa muutoksessa myös taloudellisesti voivat näyttää esimerkkiä siitä, että siirtymä on kannattava. Kiertotalouden periaatteena resurssien ja materiaalien kierto vaatii myös organisaatioiden verkostoa, jossa useammat tahot tarjoavat tai tarvitsevat materiaaleja, jonka avulla nämä voivat kierrättää. Tarvitaan materiaalin käyttäjää, käytetyn materiaalin kerääjää, ostajaa ja sen uutta valmistajaa. Mitä useampi organisaatio implementoi kiertotalouden periaatteita liiketoimintamalleihinsa, sitä kattavampi verkostosta tulee, ja sitä sujuvammaksi toiminta muuttuu.

Uusien teknologioiden käyttöönottoon liittyy aina paljon seikkoja, joita tulee ottaa huomioon, ja isommat investoinnit tällä saralla saattavat maksaa erittäin paljon, mitä laaja-alaisemmasta käyttöönotosta on kyse. Ensimmäinen huomio digitaalisten innovaatioiden hyödyntämisessä kiertotalouden implementointiin on nimenomaan tässä digitaalisessa infrastruktuurissa. Tähän vaikuttaa pitkälti se, kuinka yleisiä nämä teknologiat yrityksissä ovat, ja mihin tahtiin mahdollista siirtymää viedään eteenpäin. Mitä enemmän integroituneena yleisesti digitaaliset teknologiat ja liiketoimintaprosessit ovat, sitä paremmin myös uusia teknologioita voidaan lisätä portfolioon.

Kiertotalouden periaatteiden ja digitaalisten innovaatioiden hyödyntämisen muutos liiketoiminnassa on käynnissä, mutta mallien implementointi digitaalisten innovaatioiden avulla on pitkälti vielä teoriatasolla. Teoreettista tutkimusta aiheesta on tehty, ja paljon on löydetty hyötyjä ja mahdollisuuksia tästä yhdistelmästä. Konkreettisia, jo pidempään käynnissä olleita tutkimuksia kuitenkin on huomattavasti vähemmän. Tällä hetkellä aihe

on vielä sen verran uusi, että isomman skaalan käyttöönoton vaikutuksista ei ole selvää tietoa.

Kiertotalouden implementointi digitaalisten innovaatioiden avulla kehittyy, kun nähdään kiertotalouden ja digitalisaation kehittävän ja edistävän toinen toisiaan. Mitä enemmän digitaalista infrastruktuuria on käytössä, sitä helpommin sitä voidaan hyödyntää pohjana, jolle rakentaa liiketoimintamalleja kiertotalouden suuntaan. Kun taas mitä useampi organisaatio haluaa implementoida kiertotalouden malleja liiketoiminnassaan, sitä helpompi on lähteä mukaan esimerkiksi lohkoketjuteknologian käyttöönottoon mukaan, jos se helpottaa tätä implementointia.

Lähteet

- Agrawal, R., Wankhede, V. A., Kumar, A., Upadhyay, A., & Garza-Reyes, J. A. (2022). Nexus of circular economy and sustainable business performance in the era of digitalization. *International Journal of Productivity & Performance Management*, 71(3), 748–774.
- Alammary, A., Alhazmi, S., Almasri, M., & Gillani, S. (2019). Blockchain-based applications in education: A systematic review. *Applied Sciences*, 9(12), 2400.
- Antikainen, M., Uusitalo, T. & Kivikytö-Reponen, P. (2018). Digitalization as an enabler of circular economy. *Procedia CIRP*, Vol. 73, pp. 45–49.
- Aoun, A., Ilinca, A., Ghandour, M., & Ibrahim, H. (2021). A review of Industry 4.0 characteristics and challenges, with potential improvements using blockchain technology. *Computers & Industrial Engineering*, 162, 107746.
- Apeel. (2023, lokakuu). Peel'd Back-kotisivu. <<https://www.apeel.com/peeld-back>> haettu 18.10.2023
- Awan, U., Gölgeci, I., Makhmadshoev, D., & Mishra, N. (2022). Industry 4.0 and circular economy in an era of global value chains: What have we learned and what is still to be explored? *Journal of Cleaner Production*, 371.
- Böckel, A., Nuzum, A.-K., & Weissbrod, I. (2021). Blockchain for the Circular Economy: Analysis of the Research-Practice Gap. *Sustainable Production and Consumption*, 25, 525–539.
- Cagigas, D., Clifton, J., Diaz-Fuentes, D., & Fernández-Gutiérrez, M. (2021). Blockchain for public services: A systematic literature review. *IEEE Access*, 9, 13904–13921.
- Chidepatil, A., Bindra, P., Kulkarni, D., Qazi, M., Kshirsagar, M., & Sankaran, K. (2020). From Trash to Cash: How Blockchain and Multi-Sensor-Driven Artificial Intelligence Can Transform Circular Economy of Plastic Waste? *Administrative Sciences*, 10(2), 23.
- Da Silva, V. L., Kovaleski, J. L., Pagani, R. N., Silva, J. D. M., & Corsi, A. (2020). Implementation of Industry 4.0 concept in companies: empirical evidences. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 33(4), 325–342.
- Dapp, M. M. (2018). Toward a sustainable circular economy powered by community-based incentive systems. *Business Transformation through Blockchain*, Vol. II 153–181.

- Durmaz, N., & Budak, A. (2022). Analysing key barriers to Industry 4.0 for sustainable supply chain management. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 43(5), 6663–6682.
- Ellen MacArthur Foundation (2019). Artificial intelligence and the circular economy - AI as a tool to accelerate the transition.
<<https://www.ellenmacarthurfoundation.org/artificial-intelligence-and-the-circular-economy>> haettu 13.11.2023
- Ellen McArthur Foundation. (2021a, elokuu). Using Product Passports to improve the recovery and reuse of shipping steel: Maersk Line.
<<https://www.ellenmacarthurfoundation.org/circular-examples/using-product-passports-to-improve-the-recovery-and-reuse-of-shipping-steel>> haettu 18.10.2023
- Ellen McArthur Foundation. (2021b, kesäkuu). Dissolvable stitches that improve clothing recycling: Resortecs.
<<https://www.ellenmacarthurfoundation.org/circular-examples/dissolvable-stitches-that-improve-clothing-recycling-resortecs>> haettu 29.11.2023
- Ellen McArthur Foundation. (2023). Schools of thought that inspired the circular economy. < <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/schools-of-thought-that-inspired-the-circular-economy>> haettu 5.12.2023
- Esmailian, B., Sarkis, J., Lewis, K. & Behdad, S. (2020). Blockchain for the future of sustainable supply chain management in Industry 4.0. *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 163, 105064.
- Esmailian, B., Wang, B., Lewis, K., Duarte, F., Ratti, C., & Behdad, S. (2018). The future of waste management in smart and sustainable cities: A review and concept paper. *Waste management*, 81, 177–195.
- Euroopan Parlamentti. (2023, Lokakuu). Mitä kiertotalous on ja miksi sillä on merkitystä? Euroopan parlamentin julkaisu 30.6.2023
<<https://www.europarl.europa.eu/news/fi/headlines/economy/20151201STO05603/mita-kiertotalous-on-ja-miksi-silla-on-merkitysta>> haettu 18.10.2023
- Euroopan Unioni. (pvm). Maersk: designing ships that can be dismantled and reused. European Union circular economy stakeholder platform.
<<https://circulareconomy.europa.eu/platform/en/good-practices/maersk-designing-ships-can-be-dismantled-and-reused>> haettu 27.10.2023

- Fogarassy, C., & Finger, D. (2020). Theoretical and Practical Approaches of Circular Economy for Business Models and Technological Solutions. *Resources*, 9(6), 76.
- Garmulewicz, A., Holweg, M., Veldhuis, H., & Yang, A. (2018). Disruptive Technology as an Enabler of the Circular Economy: What Potential Does 3D Printing Hold? *California Management Review*, 60(3), 112–132.
- Ghisellini, P., Cialani, C. & Ulgiati, S. (2016). A review on circular economy: The expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. *Journal of Cleaner Production*, 114, 11–32.
- Griefahn, N. S. (2022). Cradle to Cradle: Why we need to rethink the way we produce. *Journal of Business Chemistry*, 19(3), 110–115.
- Hopkinson, P., Zils, M., Hawkins, P., & Roper, S. (2018). Managing a Complex Global Circular Economy Business Model: Opportunities and Challenges. *California Management Review*, 60(3), 71–94.
- Ingemarsdotter, E., Jamsin, E., Kortuem, G., & Balkenende, R. (2019). Circular Strategies Enabled by the Internet of Things—A Framework and Analysis of Current Practice. *Sustainability*, 11(20), 5689.
- Kamilaris, A., Fonts, A., & Prenafeta-Boldó, F. X. (2019). The rise of blockchain technology in agriculture and food supply chains. *Trends in food science & technology*, 91, 640–652.
- Kerin, M., & Pham, D. T. (2019). A review of emerging industry 4.0 technologies in remanufacturing. *Journal of Cleaner Production*, 237.
- Li, Y., Hu, Y., Li, L., Zheng, J., Yin, Y. & Fu, S. (2023). Drivers and outcomes of circular economy implementation: evidence from China. *Industrial Management & Data Systems* Vol. 123 No. 4, pp. 1178–1197.
- PwC (2019). The road to circularity: Why a circular economy is becoming the new normal. <<https://www.pwc.de/de/nachhaltigkeit/pwc-circular-economy-study-2019.pdf>> haettu 7.11.2023
- Raddatz, N., Coyne, J., Menard, P., & Crossler, R. E. (2023). Becoming a blockchain user: understanding consumers' benefits realisation to use blockchain-based applications. *European Journal of Information Systems*, 32(2), 287–314.
- Ramadoss, T. S., Alam, H., & Seeram, R. (2018). Artificial intelligence and Internet of Things enabled circular economy. *The International Journal of Engineering and Science*, 7(9), 55–63.

- Ranta, V., Aarikka-Stenroos L. & Väisänen, J. (2021). Digital Technologies Catalyzing Business Model Innovation for Circular economy—Multiple Case Study. *Resources, conservation and recycling*, 164, 105155.
- Resortecs. (2023, marraskuu). Resortecs, recycling made easy: Impact. <<https://resortecs.com/impact/>> haettu 29.11.2023
- Ronaghi, M. H. (2023). The influence of artificial intelligence adoption on circular economy practices in manufacturing industries. *Environment, Development & Sustainability*, 25(12), 14355–14380.
- Rosa P., Sassanelli C., Urbinati A., Chiaroni D. & Sergio Terzi (2020). Assessing relations between Circular Economy and Industry 4.0: a systematic literature review, *International Journal of Production Research*, 58(6), 1662–1687.
- Sauerwein, M., Doubrovski, E., Balkenende, R., & Bakker, C. (2019). Exploring the potential of additive manufacturing for product design in a circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 226, 1138–1149.
- Sharma, N. K., Govindan, K., Lai, K. K., Chen, W. K., & Kumar, V. (2021). The transition from linear economy to circular economy for sustainability among SMEs: A study on prospects, impediments, and prerequisites. *Business Strategy & the Environment*, 30(4), 1803–1822.
- Singh, J., & Ordoñez, I. (2016). Resource recovery from post-consumer waste: important lessons for the upcoming circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 134, 342–353.
- Voulgaridis, K., Lagkas, T., Angelopoulos, C. M., & Nikolettseas, S. E. (2022). IoT and digital circular economy: Principles, applications, and challenges. *Computer Networks*, 219, 109456.