

Elias Tuominen

TEOLLISUUS 4.0 KIERTOTALOUS- SIIRTYMÄN MAHDOLLISTAJANA

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Tarkastaja: Jussi Valta
Toukokuu 2020

TIIVISTELMÄ

Elias Tuominen: Teollisuus 4.0 kiertotaloussiirtymän mahdollistajana
(Industry 4.0 as an Enabler for the Circular Economy Transition)
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Teknis-taloudellinen, TkK
Toukokuu 2020

Kiertotalous on laaja käsite, mutta erityisesti sen voidaan nähdä pyrkivän edistämään kestävyttä rajallisten resurssien alaisessa taloudellisessa toiminnassa. Tässä työssä tutkitaan kiertotaloutta ja sen suhdetta teollisuuden neljännen vallankumouksen valmistavaan teollisuuteen keskittyvän osaan, eli teollisuus 4.0:aan. Tarkoituksena on selvittää, millä tavalla teollisuus 4.0 ja siihen liittyvät teknologiat mahdollistavat kiertotaloussiirtymän.

Työssä on kaksi pääkappaletta. Ensimmäisessä keskitytään täysin kiertotalouteen ja sen tämänhetkiseen tilaan maailmalla. Kiertotalouden taustojen lisäksi käydään läpi sen etuja suhteessa lineaariseen talousmalliin erityisesti 3R:n (vähentäminen, uudelleenkäyttö ja kierrättäminen) kautta. Lisäksi kiertotaloussiirtymää tarkastellaan sen eri kokoluokissa: yksittäisen ihmisen tai yrityksen, yritysverkostojen ja makrotason näkökulmasta. Lopuksi käydään läpi syitä, miksi kiertotalous ei ole toistaiseksi kyennyt saavuttamaan aidosti merkittävää asemaa lineaarisen talousmallin korvaajana.

Toisessa kappaleessa esitellään teollisuus 4.0 ja siihen liittyviä teknologioita, erityisesti esineiden internetiä, big data -analytiikkaa, pilvipalveluita ja 3D-tulostamista. Uusiin teknologioihin liittyen nostetaan esille myös kirjallisuudessa havaittuja etuja ja haasteita, joita nämä tuovat valmistusprosesseihin. Lisäksi näitä teknologioita ja niiden tuomia mahdollisuuksia verrataan kiertotalouden tarpeisiin ja pyritään tunnistamaan yhteisiä hyötyjä.

Työssä havaitaan, että teollisuus 4.0:n luomat mahdollisuudet hyödyttävät myös kiertotaloussiirtymän tehokkaampaa etenemistä. Teollisuus 4.0 helpottaa omistamiseen perustuvien liiketoimintamallien korvaamista resurssitehokkaammilla vaihtoehdoilla. Reaaliaikaisen ja tarkan tiedon kerääminen mahdollistaa runsaasti etuja niin resurssitehokkuuden kuin materiaalien kierrossa pitämisen edistämiseksi. Nämä ovat kiertotalouden keskeisimpiä arvонуonin lähteitä. Myös erityisesti tuote-elinkaaren alussa ja lopussa voidaan uusilla toimintatavoilla ratkaista nykyisiä kiertotaloussiirtymän ongelmia. Teollisuus 4.0:n kiertotalousyhteydestä tunnistettiin myös haasteita, erityisesti avoimeen yhteistyöhön, tiedon jakamiseen ja tietoturvaan liittyen.

Avainsanat: Kiertotalous, teollisuus 4.0, kestävyys, älykäs valmistaminen, esineiden internet

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. KIERTOTALOUS	3
2.1 Lähtökohdat	3
2.2 Kiertotalouden pääperiaatteet	5
2.2.1 3R: Vähentäminen, uudelleenkäyttö ja kierrätys.....	5
2.2.2 Arvonluonnin lähteet	6
2.3 Maantieteelliset erot	8
2.4 Kiertotalouden mahdollisuudet ja siirtymä eri kokoluokissa	9
2.4.1 Yksittäinen kuluttaja tai yritys	10
2.4.2 Yritysverkostot	10
2.4.3 Makrotaso	11
2.4.4 Irtikytkeä	13
2.5 Kiertotalouden vaatimia muutoksia.....	13
3. TEOLLISUUS 4.0:N ROOLI KIERTOTALOUSSIIRTYMÄSSÄ	15
3.1 Teollisuus 4.0:n tärkeimmät teknologiat	16
3.2 Digitaalisten teknologioiden hyödyntäminen kiertotaloussiirtymässä ..	20
4. PÄÄTELMÄT.....	24
4.1 Näkökulmia johtamistyölle.....	24
4.2 Jatkotutkimusaiheita.....	25
LÄHTEET.....	27

1. JOHDANTO

Niin Suomessa kuin maailmallakin puhutaan nykyään paljon ilmastonmuutoksen lisääntyvistä vaikutuksista ympäristöön, luonnonvarojen kestävämmästä kulutuksesta sekä siitä, miten nämä ongelmat tulisi ratkaista. Lähes kaikki vaikuttavat olevan jo yhtä mieltä siitä, että jotain täytyy tehdä, mutta ratkaisuista ei olla kovin yksimielisiä. Yksilön, suur yritysten ja julkisen hallinnon vastuut ovat monella tapaa vielä kiistelyn kohteena, eikä vaadittavaa nopeaa päätöksentekoa helpota aiheen poliittisuus tai globaalius.

Kiertotalous on yksi asemansa vakiinnuttanut käsite, johon suuri osa ratkaisuista nykyään perustuu. Ajatus on varsin yksinkertainen: pidetään nykyiset luonnonvarat ja resurssit kierrossa, jotta voidaan minimoida uusien luonnonvarojen tarve ja jätteen synty. Tätä voidaan pitää hyvin tehokkaana ja taloudellisestikin kannattavana tapana edistää kestävä kehitystä, mutta kiertotalous ei tästä huolimatta ole kyennyt saavuttamaan merkittävää asemaa yhteiskunnassamme ja luonnonvaroja kulutetaan edelleen yhä enemmän. (Ellen MacArthur Foundation, 2012; Ghisellini et al., 2016; Tseng et al., 2018)

Kiertotalouden laajamittaiseen käyttöön vaaditaan uusia innovaatioita niin prosesseihin ja liiketoimintamalleihin kuin tuotesuunnitteluunkin. Tuotteet tulee kyetä valmistamaan niin, että korjaaminen on mahdollisimman helppoa ja materiaalit palautettavissa uudelleen raaka-aineiksi (Ellen MacArthur Foundation, 2012; Lopes de Sousa Jabbour et al., 2018). Tässä työssä tutkitaan, voiko digitalisaatio, tai tarkemmin älykäs valmistaminen, toimia tämän ja monen muun kiertotalouden haasteen ratkaisemisessa.

Tässä työssä siis tarkastellaan erityisesti sitä, miten teollisuus 4.0:aan liitettävät uudet teknologiat mahdollistavat kiertotaloussiirtymän. Lopullisen totuuden löytäminen ei ole mahdollista aiheen tuoreuden, laajuuden ja moninaisuuden vuoksi, mutta kirjallisuuden perusteella on mahdollista tehdä suuntaa antavia havaintoja ja päätelmiä. Tavoitteena työssä on perehtyä kiertotalouden ja teollisuus 4.0:n aihepiireihin, tutustua niistä tehtyyn tutkimukseen sekä tarkastella niiden yhteyttä ja tarjota tuoreita näkökulmia aiheeseen.

Tietoa työhön on haettu painottuen Scopus-tietokantaan hakusanoilla ”circular economy” ja ”industry 4.0”. Tämä haku tuotti 43 englanninkielistä tieteellistä artikkelia, joten aiempaa kirjallisuutta aiheesta löytyi. Teollisuus 4.0 korvattiin toisessa haussa lähes samaa tarkoittavalla hakusanalla ”smart manufacturing”. Käsitteenmäärittelyä varten kiertotaloutteen sekä teollisuus 4.0:aan haettiin Scopusista vielä erikseen molempiin viitatuimpia

artikkeleita. Näin löydettiin kumpaankin aihealueeseen liittyen johtavia tutkimuksia, joiden ympärille käsitteenmäärittely rakentui. Haulla "circular economy" + "industry 4.0" löytyneet artikkelit sisälsivät myös paljon hyviä artikkeleita omissa lähdeviitteissään ja näitäkin on työssä hyödynnetty.

Työ rakentuu kahden pääluvun varaan. Luvussa 2 käsitellään vain kiertotaloutta. Kiertotalous on yleisesti hyväksytty termi kuvaamaan uutta kestävämmälle pohjalle rakentuvaa talousjärjestelmää, joten sen tarpeellisuutta ei varsinaisesti lähdetä haastamaan, vaan kappale keskittyy esittelemään kiertotalouden tuomia etuja ja siihen liittyviä haasteita. Koko luku 2 on rakennettu pitkälti kahden keskeisen ja laajan kiertotaloutta monipuolisesti käsittelevän tekstin varaan. Ensimmäinen on Ghisellinin et al. (2016) artikkeli Journal of Cleaner Production -lehestä ja toinen Ellen MacArthur Foundationin (2012) laaja kiertotaloustutkimus, jota monet työtä varten luetuista artikkeleista käytti alkuperäislähteenään.

Luku 3 on työn toinen pääluku. Se keskittyy teollisuus 4.0:aan, siihen liitettäviin teknologioihin ja näiden teknologioiden tuomiin mahdollisuuksiin ja haasteisiin erityisesti kiertotalouden näkökulmasta. Luku 3 sisältää suurimman osan työn artikkeliviitteistä, koska siinä käsiteltyjä aiheita on käsitelty kirjallisuudessa monesta eri näkökulmasta. Lopuksi luvussa 4 vedetään yhteen keskeisimmät havainnot luvusta 3 ja esitetään lopullisia päätelmiä ja arvioidaan työn vaikuttavuutta.

2. KIERTOTALOUS

Kiertotalous perustuu kolmeen pääteemaan, joihin englanninkielisessä tutkimuksessa viitataan termillä 3R (*reduce, reuse, recycle*). Tällä viitataan siis vähentämiseen, uudelleenkäyttöön ja kierrätykseen (Ghisellini et al., 2016; Tseng et al., 2018), jotka ovat tärkeysjärjestyksessä tärkeimmästä vähiten tärkeään. Eräs kiinalaiseen kiertotaloutta edistävään lakiin kirjattu määritelmä kiertotaloudelle onkin, että se pyrkii vähentämiseen, uudelleenkäyttämiseen ja kierrättämiseen kaikessa tuotannossa ja kulutuksessa (Ghisellini et al., 2016). Kiertotalouden näkeminen vain kierrättämisenä ei siis ole täysin todenmukaista.

Yksi maailman johtavista kiertotaloutta edistävästä järjestöistä, Ellen MacArthur Foundation (2012), määrittelee omassa raportissaan kiertotalouden systeeminä, joka on jo perusluonteeltaan suunniteltu vahvistavaksi ja uudistavaksi ja tähtää tuotteiden, komponenttien ja materiaalien arvon ja hyödyn säilyttämiseen. Kokonaisuudessaan kiertotalous voidaan siis nähdä pyrkimyksenä siirtyä pois lineaarisesta talousmallista, jossa luonnonvaroja otetaan luonnosta, valmistetaan niistä tuotteita ja heitetään pois käytön jälkeen (Ellen MacArthur Foundation, 2012; Bressanelli et al., 2018; Garcia-Muiña et al., 2018).

Garcia-Muiña et al. (2018) korostaa kiertotalouden tuomia etuja lineaariseen malliin verrattuna. Lineaarinen malli ei huomio saasteiden vaikutuksia, luonnonvarojen rajallisuutta tai panosten muuntonopeutta tuotoksiksi, joten artikkeli pitää nykyistä järjestelmää sopimattomana kestävyysajattelun edistämiseksi. Ongelma ei siis ole se, etteivätkö lineaarisen kulutusmallin ongelmat olisi laajasti tiedossa. Joka vuosi kymmeniä miljardeja tonneja luonnonvaroja tuodaan raaka-aineeksi teollisiin prosesseihin, ja määrät kasvavat vuosittain. Yritykset altistuvat kasvaville riskeille, kun raaka-aineiden hinnat ovat kääntyneet nousuun ja hintakehitys on ennalta-arvaamatonta. Tämä lisää yhä edelleen kiinnostusta järjestelmään, jossa liikevaihdon kasvattaminen ei enää vaatisi lähes systemaattisesti myös sisään laitettavan materiaalipanoksen kasvattamista. Tällainen järjestelmä on kiertotalous. (Ellen MacArthur Foundation, 2012)

2.1 Lähtökohdat

Kiertotalouden juuret ovat viime vuosisadan loppupuolella, kun ympäristön ja talouden yhteistoimintaan ryhdyttiin kiinnittämään enenevässä määrin huomiota (Ghisellini et al., 2016). Yksi esimerkki löytyy Ghisellinin et al. (2016) mukaan vuodelta 1990 Pearcen ja

Turnerin kirjasta *Economics of Natural Resources and the Environment*, joka esittää kiertävyyteen perustuvaa talousmallia lineaarisen korvaajana. Kirja perusteli tarvetta jo pelkästään termodynamiikan toisella pääsäännöllä entropiasta, eli materiaalin ja energian laadun jatkuvasta heikkenemisestä. Kirjassa nostettiin esille myös ajatus siitä, kuinka erikoista on, ettei yritystoiminnan vaikutuksista ympäristölle, esimerkiksi puhtaalle ilmalle tai vedelle, ole olemassa selkeitä markkinoita tai hintoja, vaikka niille on selvästi olemassa kysyntää ja arvo.

Idean uudistavasta suunnittelusta (*regenerative design*), joka on pohjana edellä esitellylle Ellen MacArthur Foundationin (2012) määritelmälle kiertotaloudesta, nähdään syntyneen jo 1970-luvulla. Sen voidaan nähdä syntyneen, kun yhdysvaltalainen professori John Lyle käynnisti jatko-opiskelijoidensa kanssa haasteen, jossa heidän tuli ideoida yhteiskunta ilman kuormitusta luonnolle. Idea oli siis hyvin yksinkertainen: Kaiken käytetyn luonnosta otetun materiaalin ja energian olisi oltava uusiutuvaa, eikä niitä tulisi olla mahdollista kuluttaa enempää, kuin niitä on mahdollisuus tuottaa. Tällainen yhteiskunta vaatisi käyttöönsä uudistavia prosesseja, jotka saavat itse tuotettua käyttämänsä energian ja materiaalin. (Ellen MacArthur Foundation, 2012) Käytännössä tämän voidaan nähdä tarkoittavan nyky-yhteiskunnassa täysimittaisen kiertotalouden käyttöönottoa.

Eräs kiertotaloutta edeltänyt ajatus on myös teollinen ekologia (*industrial ecology*), joka syntyi vastustamaan ajatusta, että teolliset toiminnot ja niiden ympäristövaikutukset tulisi pitää erillään (Ghisellini et al., 2016). Sen sijaan ajateltiin, että näitä tulisi tarkastella yhtenäisenä ekosysteeminä, jossa materiaalit, energia ja tieto kulkevat. Teollinen ekologia tutkii kolmea pääteemaa: analyttistä, metodologista ja ennakoivaa. Näiden avulla vastattavia kysymyksiä ovat siis se, miten yritykset toimivat ja miten niitä säädellään, toiminnan vaikutukset ympäristölle, sekä voidaanko nämä vaikutukset huomioiden saavuttaa parempia päätöksiä niin tuottavuuden kuin kestävyyskannalta. (Erkman, 1997) Tämän voidaan suoraan nähdä olevan askel kohti kiertotaloutta, jossa materiaalien kulutusta harkitaan kestävyyskannalta, yritysverkostojen yhteisvaikutuksia mietitään ja jätteenkäsittelyä parannetaan (Frosch, 1992). Frosch (1992) esittelee ajatuksen, että teollisessa ekologiassa ”mitään saatavilla olevaa energiaa tai materiaalia ei hukata”.

Ympäristötaloustieteen, uudistavan suunnittelun ja teollisen ekologian lisäksi Ghisellini et al. (2016) ja Ellen MacArthur Foundation (2012) esittelevät kiertotaloutta tarkastelevissa tutkimuksissaan lähtökohtia muun muassa yleisestä systeemiteoriasta (*general system theory*), suorituskykytaloudesta (*performance economy*) sekä biomimetiikasta (*biomimicry*). Kokonaisuudessaan voidaan sanoa, että kiertotalouden perusta on laajasti eri lähtökohdissa, jotka pyrkivät kaikki parantamaan kestävyttä optimaalisemmilla prosesseilla.

2.2 Kiertotalouden pääperiaatteet

Kiertotalouden perustana on siis ajatus 3R:stä: vähentämisestä, uudelleenkäytöstä ja kierrättämisestä. Koska 3R on hyvin laaja käsite, on sen merkitystä hyvä avata tarkemmin sekä tarkastella millaisia periaatteita, alakäsitteitä ja arvonluonnin lähteitä se sisältää.

2.2.1 3R: Vähentäminen, uudelleenkäyttö ja kierrätys

Vähentäminen tarkoittaa yleisesti pyrkimystä pienentämiseen niin primäärienergian ja raaka-aineiden kulutuksessa kuin syntyvässä jätemäärissäkin. Tämä on monella tapaa haasteellinen tehtävä, ja ongelmaan palataankin myöhemmissä luvuissa tarkemmin. Uusien teknologioiden, lähtien tiiviimmistä ja kevyemmistä tuotteista, tuoman valmistuksen ja kulutuksen tehostamisen lisäksi yksi toimivimmista keinoista on ylipäätään yksinkertaisempi elämäntyyli. (Ghisellini et al., 2016) Ihmisten elämäntyylien yksinkertaistumisesta ei ole kuitenkaan erityisesti viitteitä, joten muita ratkaisuja kaivataan.

Uudelleenkäyttö on tuotteiden tai komponenttien käyttämistä uudelleen samaan tarkoitukseen, kuin mihin ne on lähtökohtaisesti suunniteltu (Ghisellini et al., 2016). Uudelleenkäytöllä on mahdollista saavuttaa merkittäviä materiaali-, energia- ja työmääräsäästöjä verrattuna uusiin, jopa kierrätetyistä materiaaleista valmistettuihin tuotteisiin, joten se on hyvin tärkeä osa kiertotaloutta. (Ellen MacArthur Foundation, 2012; Castellani et al., 2015). Jotta uudelleenkäyttö saavuttaa kiertotaloudessa potentiaalinsa, tarvitaan ensin kysyntää uusiokäyttötuotteille, jotka on suunniteltu kestävämmän useamman elinkaaren ajan. Lisäksi tarvitaan kannustimia, joilla saadaan yritykset ostamaan käytettyjä tuotteita takaisin ja vielä markkinoimaan niitä kuten uusiakin tuotteitaan (Ellen MacArthur Foundation, 2012).

Toisaalta uudelleenkäyttö on käsitteenä edelleen hyvin laaja, joten Ellen MacArthur Foundationin raportti (2012) määrittelee sen tarkemmin alakategorioihin. Tuotteiden **kunnostaminen** (*refurbishment*) on tuotteen palauttamista toimivaksi vaihtamalla tai korjaamalla tärkeitä komponentteja, jotka ovat hajonneet tai lähellä hajoamista, ja tämän lisäksi yleisesti tuotteen ulkonäön päivittämistä esimerkiksi puhdistamalla tai maalamalla uudelleen. **Uudelleenvalmistaminen** (*remanufacturing*) puolestaan viittaa käytetyn tuotteen purkamiseen komponentteihin, jolloin laadunvarmistamisen kautta voidaan löytää toimivat osat ja siirtää ne uusiin ehjiin tuotteisiin. Kolmas olennainen termi on **ketjuttaminen alaspäin** (*cascading*), millä viitataan materiaalien ja energian hyödyntämiseen laadun laskiessa kiertomäärien kasvaessa ketjuissa eri arvoketjujen välillä. Tämä

perustuu siis käytön aikana lisääntyvän entropiaan, ja hyvänä esimerkkinä toimii puuvillakuitu. Sitä voidaan käyttää vaatteena ja uusiokäyttövaatteena, sen jälkeen huonekaluteollisuudessa verhoiluna ja viimeisenä asuntorakentamisessa eristeenä. Näin se jokaisessa uudessa kierron vaiheessa vähentää neitseellisten luonnon raaka-aineiden tarvetta. (Ellen MacArthur Foundation, 2012)

Kierrättäminen on tuotteen tai materiaalin käsittelyä, jossa se elinkaarensa lopussa palautetaan takaisin raaka-aineeksi. Kierrättäminen on osa kiertotaloutta, mutta kiertotalouden mieltäminen vain laajamittaisena kierrättämisenä on erityisen harhaanjohtavaa sen ollessa sekä ympäristövaikutuksiltaan, että taloudellisesti vähentämistä tai uudelleenkäyttöä vähemmän kestävä ratkaisu (Bressanelli et al., 2018). Ensinnäkään monia materiaaleja, kuten paperin valmistuksessa käytettävää sellua, ei ole mahdollista kierrättää loputtomasti. Toisena ongelmana on materiaalien kierrättäminen ilman häviöitä, mikä ei entropian kasvamisen seurauksena ole mahdollista. Kierrätykseen liittyy myös muita ongelmia. Näitä ovat esimerkiksi harvinaisten metallien kierrättämisen kannattamattomuus pienten määrien takia tai muoviseosten kierrättämisen vaarallisuus niiden sisältämien väriaineiden ja metallijäämien takia. (Ghisellini et al., 2016) Nämä ongelmat eivät ole ylitsepääsemättömiä, mutta vaativat selkeitä muutoksia ja yhteistyötä eri toimijoiden välillä.

2.2.2 Arvonluonnin lähteet

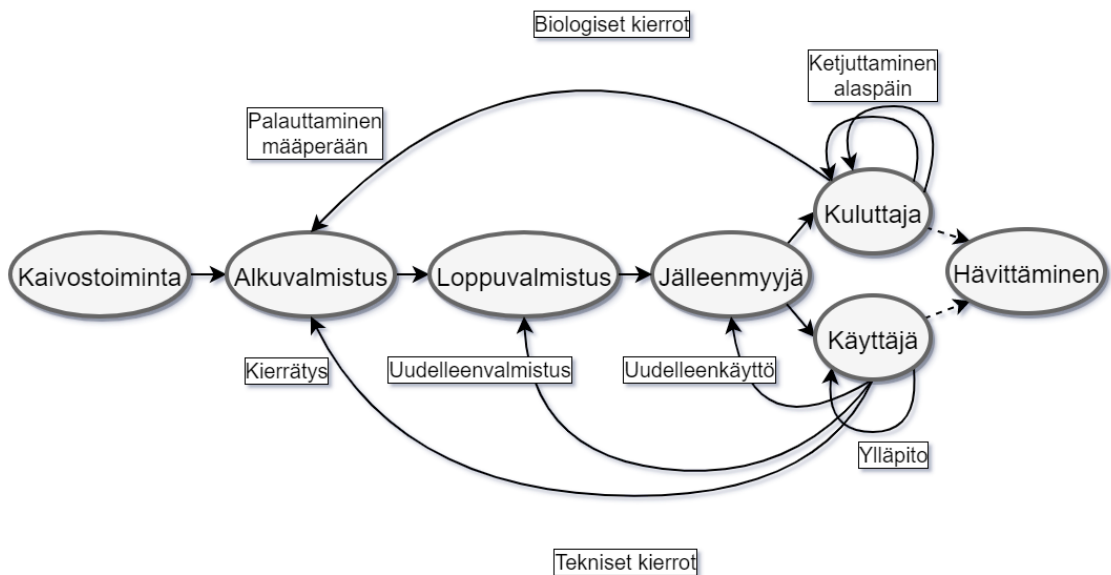
Jotta kiertotalouteen voidaan päästä, vaatii se tiettyjen perusajatusten sisällymistä kaikkien toimintaan. Ensin on omaksuttava ajatus, että jätettä ei ole olemassa. Tuotteiden on oltava jo suunnitteluvaiheessa luotuja purettaviksi ja uudelleenkäytettäviksi. Näin toimimalla vältytään kierrättämisestä ja erityisesti jätteestä syntyviltä turhilta häviöiltä niin energiassa kuin työmäärissäkkin. (Ellen MacArthur Foundation, 2012)

Toinen tärkeä muutos kiertotalouteen mentäessä on tuotteissa syntyvä selkeä jako kulutus- ja kestokomponentteihin. Kulutuskomponentin erikoispiirteenä kiertotaloudessa on biopohjaisuus, jolloin tuote ei ole myrkyllinen, mahdollisesti jopa päinvastoin. Näin se on turvallinen ohjattavaksi käytön jälkeen takaisin biosfääriin. Kestotuote taas on tehty biohajoamattomista materiaaleista, kuten metallista tai muovista. Tällaiset tuotteet tulee luoda jo suunnitteluvaiheessa uudelleenkäytettäväksi. (Ellen MacArthur Foundation, 2012) Tähän liittyen voidaan todeta, että nykyinen ”osta ja kuluta” -talousmalli ei enää toimi kestotuotteiden myynnissä. Kuluttamisen tulee muuttua käyttämiseksi, jolloin kestävien tuotteiden leasing, vuokraaminen ja jakaminen ovat vallitsevia liiketoimintamalleja (Ellen MacArthur Foundation, 2012; Ghisellini et al., 2016). Mikäli näitä tuotteita myydään

omistettaviksi, on tärkeää kyetä luomaan myyjille ja valmistajille kannustimia kerätä tuotteensa takaisin tuote-elinkaaren päättyessä. Vain näin tuotteiden ja komponenttien uudelleenkäyttö on mahdollista. (Ellen MacArthur Foundation, 2012)

Kolmantena muutoksena on uusiutuvaan energiaan siirtyminen. Kiertojen pyörimisen on tapahduttava puhtaalla energialla, sillä näin varmistetaan joustava järjestelmä. Kiertotalous ei ylipäätään voi olla riippuvainen uusiutumattomista luonnonvaroista. (Ellen MacArthur Foundation, 2012)

Näitä periaatteita noudattamalla voidaan luoda arvonluonnin perusta kiertotaloudessa. Koko systeemin on perustuttava toisiaan vahvistaville kierroille, jotka pyritään pitämään mahdollisimman tiiviinä, pitkinä, alaspäin ketjuuntuneina sekä puhtaina (Ellen MacArthur Foundation, 2012). Kuvassa 1 havainnollistetaan tätä tarkemmin.



Kuva 1: Kiertotalouden havainnekuva (mukailtu Ellen MacArthur Foundation 2012, s. 24)

Kuvassa keskellä vasemmalta oikealle kulkevat perinteisen lineaarisen mallin vaiheet, lähtien raaka-aineiden hankkimisesta ja päätyen jätteenpolttoon tai kaatopaikalle loppusijoitukseen. Kiertotalouden tavoitteen voidaan nähdä olevan keskivillillä olevien ensimmäisen ja viimeisen vaiheen tarpeellisuuden katoaminen. Kuvasta voidaan myös havaita tuotteiden selkeä jako teknisiin kestotuotteisiin ja biopohjaisiin kulutustuotteisiin, sekä muita edellä esiteltyjä käsitteitä.

Tiiviimmän kierron vaikutus näkyy kuvassa 1 eri kokoisina kiertoina. Huomio saattaa kiinnittyä ensin suuriin kiertoihin, mutta tärkeimpiä kiertoja ovat kaikkein pienimmät. Niissä energia, materiaalit, työ sekä pääoma pysyvät kaikki parhaiten hyödynnettävissä. Mitä

pienemmillä muutoksilla tuote voidaan välittää sen vanhalta käyttäjältä uudelle, sitä vähemmän tuotteeseen sitoutuu myös muita ulkoisvaikutuksia, kuten kasvihuonekaasupäästöjä. (Ellen MacArthur Foundation, 2012)

Kiertojen kesto, alaspäin ketjuttaminen ja kiertojen puhtaus ovat olennaisia arvonluonnin keinoja kiertotaloudessa. Tuotteiden on oltava laadukkaita, jotta ne pystyvät kiertämään useampia peräkkäisiä ja pitkäkestoisia kiertoja, oli kyseessä sitten uudelleenkäyttö tai kierrättäminen. Kiertojen ketjuttaminen alaspäin taas vaatii yhteistyötä yli toimialarajojen, jotta eri arvoketjut kykenevät keskenään järjestelemään materiaalien hyödyntämisen optimaalisesti, kuten edellä esitetty puuvillaesimerkki osoittaa. Kiertojen on oltava myös puhtaita. Kun myrkyllisistä tai muuten saastuneista materiaalseoksista päästään eroon, tulee materiaalien kierrossa pitämisestä kannattavampaa, tehokkaampaa sekä turvallisempaa. (Ellen MacArthur Foundation, 2012) Tähän liittyen on kuitenkin hyvä tiedostaa, että yrityksillä on usein edessään kompromisseja, jotka pakottavat valitsemaan esimerkiksi paremman suorituskyvyn ja tuotteen myrkyllisyyden väliltä (Ghisellini et al., 2016).

2.3 Maantieteelliset erot

Kiertotalouteen on suhtauduttu maailmalla eri tavoin ja sen käyttöönottoon on pyritty hyvin erilaisilla keinoilla. Ghisellini et al. (2016) tarkastelee artikkelissaan näitä eroja. Kiinassa kiertotaloussiirtymän keinona on käytetty ylhäältä alaspäin ohjautuvaa valtioveitoista ohjelmaa markkinavetoisuuden sijaan, kun Yhdysvalloissa, Euroopassa ja Japanissa toimeen on lähdetty alhaalta ylöspäin jätteenkäsittely- ja ympäristölainsäädäntöä kehittämällä. Tätä eroa voi selittää kulttuurillisten tekijöiden lisäksi se, että kehittyneiden maiden teollistuminen tapahtui aikana, jolloin luonnonvarojen kasvavaa kuluttamista ei nähty ongelmana. Tämän takia kehittyneiden maiden teollistumista hallinnutta uusklassista taloustiedettä ei ole Kiinassa tai muissakaan maissa enää lähitulevaisuudessa soveliasta käyttää.

Maantieteellisiä eroja tarkastellaan yksittäisten yritysten tasolla myös Rannan et al. (2018) artikkelissa, joka tutkii erityisesti kiertotalouteen pyrkivien yritysten toiminnan ajureita ja muutoksen esteitä valmistavassa teollisuudessa sekä jätehuoltoalalla. Artikkelii esittää, että Kiinassa kiertotalouden ajureina julkisissa yrityksissä eivät toimi niinkään ylhäältäpäin tulevat määräykset, koska niiden noudattamista ei valvota, vaan enemmänkin kestävyteen pyritään yrityksen sidosryhmien paineesta. Esteenä kiertotaloussiirtymälle on näissä tilanteissa erityisesti uudelleenkäytön kannustimien puute.

Eri maissa on erilaisia näkökulmia myös siihen, mitä kiertotalous tarkalleen tarkoittaa ja mitkä asiat siinä merkitsevät. Kiina on alussa esitetyn määritelmänsä mukaan määrittänyt kiertotalouden vahvasti pohjautumaan 3R:n periaatteisiin, mutta silti vähentämisen sijaan kaikki toiminta on pyrkinyt jatkuvasti kasvattamaan valmistamista ja kuluttamista. Euroopan ja Yhdysvaltojen kiertotaloudessa on saavutettu sektorikohtaisesti edistysaskelia, erityisesti jätteenkäsittelyn saralla. Jätettä on onnistuttu siirtämään kaatopaikoilta hyötykäyttöön ja vaarallisen jätteen käsittelyssä on edistytty. (Ghisellini et al., 2016) On kuitenkin selvää, että nämä ovat vasta alkua systeemisen ongelman korjaamiseksi. Euroopan ja Yhdysvaltojen kaltaista kehitystä on tapahtunut myös muualla ympäri maailmaa, tehokkaampaan resurssien uusiokäyttöön ja kestävyyyteen pyrkivää lainsäädäntöä on säädetty niin Australiassa ja Uudessa Seelannissa kuin Aasiassakin, Japanin lisäksi esimerkiksi Vietnamin ja Koreassa (Ghisellini et al., 2016).

Ranta et al. (2018) nostaa jätteenkäsittelyn suhteen esiin eron Kiinan ja Euroopan sekä Yhdysvaltojen välillä. Kiinassa on yleisempää tunnistaa uudelleenkäyttöön soveltuvan materiaalin sisältämä arvo jo ajoissa, kun Euroopassa prosessi on puolestaan optimoitu lajitellun kotitalousjätteen hyödyntämiseen kierrättämällä. Tässä prosessissa vielä usein poltetaan suuri osa jätteestä, mikä luo esteen kiertotalouden edistämiseksi. Yhdysvalloissa uudelleenkäytön esteenä nähdään esimerkiksi ajatus uusiomateriaaleista valmistettujen tuotteiden heikommasta laadusta.

Kiertotalouteen siirtyminen on suuri muutos, jonka olisi hyvä tapahtua nopeasti, joten tarvitaan myös yhtenäinen poliittinen linja. Poliittiset päätökset voivat olla vaikeita saada aikaan, mutta verotusta, ympäristölupia ja muita taloudellisia kannustimia on kyetty luomaan kaikkialla maailmassa (Ghisellini et al., 2016). Aikaansaannoksissa on ollut kuitenkin selkeitä nopeuseroja. Japanissa kiertotalouslakia muistuttavia säännöksiä on pystytty muodostamaan jo vuosituhatvuotisen vaihteessa, Euroopan Unionissa aikaansaannoksia on syntynyt 2010-luvulla, mutta Yhdysvallat on edelleen ilman koko liittovaltion kattavaa kiertotaloutta edistävää lainsäädäntöä. Kiinassa on edellä mainittuihin verrattuna hyvin erilainen tilanne, muttei valtiovetoinen talouden ja ympäristön yhteensovittaminen sekään ole sujunut ongelmitta. Tämä on toki ymmärrettävää nopeasti kehittyvälle taloudelle. Kiinassa kaatopaikat ovat esimerkiksi edelleen jätteen pääasiallinen loppusijoituspaikka. (Ghisellini et al., 2016)

2.4 Kiertotalouden mahdollisuudet ja siirtymä eri kokoluokissa

Kiertotalouden sisältämiä mahdollisuuksia on luonnollisesti noussut esille jo runsaasti. Seuraavaksi niitä konkretisoidaan vielä tarkemmin, niin yksittäisen kuluttajan tai yrityk-

sen näkökulmasta, kuin suurempienkin kokonaisuuksien kautta. Kiertotalouden yhteydessä puhutaan usein niin sanotuista ekoteollisuuspuistoista (*eco-industrial park*), jotka suurina yrityskeskittyminä saavuttavat kiertotalouteen vaadittavia mittakaavoja materiaalien kiertoon helpommin kuin yksittäiset toimijat. Lisäksi tarkastellaan kiertotaloutta suurten kokonaisuuksien eli kaupunkien ja yleisen talouden näkökulmasta.

2.4.1 Yksittäinen kuluttaja tai yritys

Yksittäiselle kuluttajalle kiertotalouden selkein ja helpoiten havaittava muutos on kestävämmät ja laadukkaammat tuotteet. Valinnanvara lisääntyy, kun tuotteiden ominaisuudet ja asiakassuhteen kesto voidaan sopia joustavasti asiakkaan tarpeen mukaan. Tämän lisäksi kiertotaloudesta syntyy epäsuoria hyötyjä, kun tuotteet suunnitellaan entistä paremmin vastaamaan haluttuun tarpeeseen ja keskittyen turvallisuuteen. Tietenkin yksi suurimmista hyödyistä on myös pitkäkestoisempien ympäristövaikutusten väheneminen. (Ellen MacArthur Foundation, 2012)

Toisaalta onnistunut kiertotaloussiirtymä vaatii myös kulutustottumuksiin muutoksia. Yhtenä kulutuksen ohjaamisen keinona ovat ympäristövaikutuksista kertovat pakkausmerkinnät, joiden tehtävänä on ohjata ostajaa kestävään suuntaan. Merkintöjä onkin otettu käyttöön jo ympäri maailmaa. Pakkausmerkinnät toimivat parhaiten, mikäli niiden taustalla toimii julkinen sektori, sillä se lisää luottamusta. Lisäksi on selvää, että toimiakseen nämä merkinnät perustuvat aitoihin tuotteiden elinkaarivaikutuksiin ja laskelmiin, jotka suoritetaan asiantuntijoiden toimesta. (Ghisellini et al., 2016)

Yksittäisen yrityksen kannalta kiertotalous luo säästöjä esimerkiksi materiaali- ja vakuutusmaksuihin. Pitkäkestoisiksi ja helposti korjattaviksi rakennetut tuotteet sekä käytettyjen tuotteiden uudelleenmyynti ja varaosiksi palauttaminen parantavat toiminnan tehokkuutta. Asiakassuhteet muuttuvat keskustelelevammiksi ja avoimemmiksi, kun kuluttajista tulee käyttäjiä, joille tuotteita myydään yhä enemmän suorituskyky- tai leasingpohjaisilla sopimuksilla. Tuotteiden sopivuus ja asiakassuhteiden jatkuvuus parantuvat. Tuotteista tulee yhä yksinkertaisempia hallita niiden rakentuessa selvemmin ydinkomponenttien ja niihin yhdisteltävien lisäosien joustavista kokonaisuuksista. (Ellen MacArthur Foundation, 2012)

2.4.2 Yritysverkostot

Yritysverkostot ovat useampien organisaatioiden muodostamia kokonaisuuksia. Kiertotalouden yhteydessä yritysverkostot ovat usein fyysisesti samaan paikkaan keskittyviä ekoteollisuuspuistoja. Ekoteollisuuspuistoissa pyritään savuttamaan taloudellisia etuja

yhdistämällä avoimesti yritysten materiaali-, vesi-, energia- ja sivutuotevirtoja keskenään. Tätä eri resursseilla käytävää vaihtokauppaa kutsutaan teolliseksi symbioosiksi (*industrial symbiosis*). Luonnollisesti tällä symbioosilla saavutetaan samalla myös ympäristökuormaa pienentäviä vaikutuksia kiertotalouden muodossa. Ekoteollisuuspuistojen muodostuminen voi tapahtua markkinavetoisesti, jolloin yhteistyön hyödyt löydetään spontaanisti, mutta ylhäältäpäin ohjautuvalla suunnittelullaan Kiina on saavuttanut edelläkävijän aseman niiden luomisessa. (Ghisellini et al., 2016)

Yritysverkostoista saavutettavia hyötyjä voi osallistuvien yritysten näkökulmasta olla niin suoraan yhteistoimintaan liittyen kuin epäsuorastikin. Suoria vaikutuksia liiketoimintaan ovat tuotot sivutuotteiden myynnistä, säästöt jätteen synnyn vähentymisestä, vähentyvät kuljetukset sekä yhteistyöyrityksiltä ostettujen sivutuotteiden luonnon raaka-aineita halvemmat hinnat. Epäsuoria etujakin on tutkimuksissa löydetty runsaasti. Niitä ovat muun muassa pienentyvä investointitarve, parantuva tuotantovarmuus ja joustavuus, vastuullisen toimijan maine, innovatiivisuuden kasvu sekä työntekijöiden löytämisen ja pitämisen helpottuminen. (Ghisellini et al., 2016)

On ymmärrettävää, että markkinavetoisesti tapahtuvia ekoteollisuuspuistojen muodostumisia hidastaa ennen kaikkea optimaalisten yhteistyökumppaneiden löytäminen. Yhteistyön täytyy olla tehokasta ja luottamuksen riittävällä tasolla. (Ghisellini et al., 2016) Kiertotalouden näkökulmasta ongelmallista voi olla myös se, että energian, materiaalien ja sivutuotteiden jakamisen sijaan yritykset keskittyvät vain tiedon, toimitusketjujen ja riskien jakamiseen (Veleva et al., 2015).

Kokonaisuudessaan Ghisellini et al. (2016) toteaa ekoteollisuuspuistoilla olevan potentiaalia saavuttaa merkittävää edistystä sekä talouden että ympäristön kannalta kiertotaloudessa. Toistaiseksi sivutuotteiden jakamisen on havaittu kuitenkin olevan ainoa olennainen askel resurssien jakamisessa, energia- ja vesiyhteistyön ollessa vähäisempää. Tämän voidaan olettaa johtuvan lähinnä jälkimmäisten vaatimista kalliista infrastruktuuri-investoinneista. Voidaankin todeta, että hyötyjä olisi mahdollista saavuttaa enemmän, mutta se vaatisi yhteistyösuhteiden syventämistä.

2.4.3 Makrotaso

Kokonaisten talousalueiden tasolla kiertotalouden mahdollisuudet ovat pitkälti samoja kuin yksittäisille yrityksillekin. Materiaaleja kuluu vähemmän, järjestelmän joustavuus lisääntyy, riskit hinta- ja tarjontaepävakauteen liittyen vähenevät ja syntyy uusia työllistymismahdollisuuksia. (Ellen MacArthur Foundation, 2012; Ghisellini et al., 2016) Ellen

MacArthur Foundationin (2012) raportissa tehtyjen skenaariolaskelmien perusteella pelkästään Euroopan Unionissa voitaisiin saavuttaa satojen miljardien Yhdysvaltain dollarien suuruiset säästöt pelkästään materiaaleissa vuosittain. Nämä arviot on vielä mahdollista lähes tuplata, mikäli yritykset ovat valmiita ottamaan riskejä, joilla irtaannutaan nykyisestä lineaarisesta talousjärjestelmästä tehokkaammin (Ellen MacArthur Foundation, 2012; Ghisellini et al., 2016). Kehittyvissä talouksissa kulutus on kehittyneitä maita materiaali-intensiivisempää, joten kiertotalouden potentiaali on vielä suurempaa. Lisäksi infrastruktuuri ei ole vielä rakentunut lineaarisen mallin mukaiseksi, mikä lisää kiertotalouden potentiaalia kehittyvissä maissa entisestään. (Ellen MacArthur Foundation, 2012)

Kiertotalous voi tuoda runsaasti myös sosiaalisia suuren mittakaavan etuja. Tuotteiden omistamisen vaihtuminen käyttämiseksi lisää palveluliiketoimintamahdollisuuksia. Tämä puolestaan parantaa innovatiivisuutta, työllisyyttä ja pääoman tuottavuutta (Ellen MacArthur Foundation, 2012). Yhteiskäyttöiset tuotteet puolestaan lisäävät sosiaalista yhtenäisyyttä ja kaupungistumisen hyötyjä (Ghisellini et al., 2016). Toisaalta voidaan miettiä, kuinka suuri haaste on luopua omistajuudesta, kun siihen on nykyisessä kuluttamismallissa totuttu.

Ghisellinin et al. (2016) mukaan Stahel esittää kirjassaan *The Performance Economy* yhteiskäyttöön perustuvan liiketoiminnan parantavan työllisyyttä ja materiaalitehokkuutta. Kirjassa esitetään, että valtioiden tulisi lisätä verotusta, joka perustuu uusiutumattomien resurssien kulutukseen, ja keventämään kaikkea uusiutuvan toiminnan verotusta. Tämä sisältää ihmisten tekemän työn, minkä perusteella voisi esittää, että palveluliiketoimintaan tai ylipäättäen työhön kohdistuvaa verotusta olisi perusteltua keventää kiertotaloussiirtymän edistämiseksi.

Kaupunkien mittakaavassa kiertotalouteen siirtyminen lähtee yleensä jätehuollon uudistamisesta (Ghisellini et al., 2016). Ongelmat jätteenkäsittelyyn liittyen ilmenevät yleensä yhteiskunnan kehittyessä, ja globalisaatio on usein lisännyt ongelmia (Song et al., 2015). Japanin kaltaiset niukkojen luonnonvarojen ja rajallisen kaatopaikkakapasiteetin valtiot ovat ymmärrettävästi ensimmäisinä kiinnostuneet jätehuollon optimoinnista. Ympäristövaikutusten kannalta on selvää, että kaatopaikalle sijoitettu jäte on epätehokkain mahdollinen jätteenkäsittelyn muoto (Caprile & Ripa, 2014).

Jätteenkäsittelyn uudistaminen vaatii kotitalouksien sitouttamista mukaan järjestelmään. Kuten mainittua, ideaalitalanne on jätteen yhteiskunta (Ellen MacArthur Foundation, 2012; Ghisellini et al., 2016). Jätteen ohjaamiseksi hyötykäyttöön pois kaatopaikoilta auttavat verotus, tuet ja lopullisena ratkaisuna täyskiellot (Ghisellini et al., 2016). Ranta et

al. (2018) nostaa kuitenkin esiin ongelmia tehokkaampaan jätteen hyödyntämiseen liittyen. Esimerkiksi Kiinassa lukuisten ihmisten toimeentulo liittyy jätevirtojen hyödyntämiseen, ja systeemin muuttaminen tehokkaammaksi voi näin saada vastustusta.

2.4.4 Irtikykentä

Kiertotalouden tuomista mahdollisuuksista kenties tärkein on niin kutsuttu irtikykentä (Ghisellini et al., 2016; Bressanelli et al., 2018). Suhteellinen irtikykentä kuvaa tilannetta, jossa taloudellinen tuotanto kasvaa nopeammin kuin sen aiheuttama ympäristökuorma. Absoluuttisessa irtikykennässä taas taloudellisten tuotosten kasvaessa niiden ympäristökuorma ei kasva tai jopa pienenee. Jälkimmäinen vaatii resurssitehokkuudelta siis vähintään yhtä nopeaa kehitystä, kuin jolla taloudellinen kasvu tapahtuu. (Jackson & Senker, 2011)

Joillain toimialoilla on kyetty saavuttamaan suhteellista, mutta myös absoluuttista irtikykentää. Kuten määritelmistä käy ilmi, pyrkimys on kuitenkin pyrkiä kaikessa toiminnassa absoluuttiseen irtikykentään, jossa taloudellinen aktiivisuus ei siirry miltään osin ympäristökuormitukseen. Tämä on luonnollisesti vaikea tehtävä, johon lisähaastetta tuo entisestään resurssitehokkuudessa saavutettujen ympäristöhyötyjen osittainen kumoutuminen lisääntyvällä resurssien kuluttamisella, eli niin kutsuttu kimpoamisefekti (*rebound effect*). Toisaalta, koska absoluuttiseen irtikykentään on tietyillä sektoreilla jo päästy, voidaan siitä päätellä kimpoamisefektin olevan vain tiettyjen toimialojen ongelma. On kuitenkin myös hyvä tiedostaa, että aloilla, joilla edes tuottavuusharppauksilla ei kyetä saavuttamaan absoluuttista irtikykentää, ainoa kestävä vaihtoehto saattaa olla talouskasvusta luopuminen. (Ghisellini et al., 2016)

2.5 Kiertotalouden vaatimia muutoksia

Edellä on jo sivuttu monien kiertotalouden tuomien mahdollisuuksien ohessa sen leviämiseen liittyviä ongelmia, kuten kulutustottumuksiin ja tuotesuunnitteluun vaadittavat muutokset, yhteistyön syventämisen haasteet ja kimpoamisefekti. Tässä kappaleessa käsitellään tarkemmin, minkä asioiden on muututtava, jotta kiertotaloussiirtymä lähtee aidosti liikkeelle.

On selvää, että optimaalisesti toimivan kiertotalouden käyttöönotto vähentäisi materiaali- ja jätekujuja yrityksissä, mutta ongelmana on muuttaa nykyinen läpivirtaukseen perustuva liiketoimintamalli (Tseng et al., 2018). Ajatus siitä, että mitä enemmän tuotteita myydään, sitä suurempaa liikevaihtoa tehdään, ei toimi. Lisäksi tuotteiden hankkimisesta

käyttöön omistajuuden sijaan on kyettävä luomaan houkuttelevampaa. (Ellen MacArthur Foundation, 2012)

Ensimmäinen muutos tässä siirtymässä on tuotteita myyvien ja tuottavien yritysten vastuulla. Näiden toimijoiden ryhdyttävä hankkimaan takaisin myymiään tuotteita niiden ensimmäisen elinkaaren päätyttyä. Tällä hetkellä autoteollisuuden ulkopuolella vain harvat teollisuudenalat kykenevät palauttamaan edes neljäsosaa myymistään tuotteista takaisin uudelleenkäytettäväksi tai varaosiksi. Tämä askel on kriittinen, sillä se pienentää kierroja merkittävästi tuotteiden kierrättämiseen ja varsinkin jätteenpolttoon verrattuna. (Ellen MacArthur Foundation, 2012)

Lisäksi tarvitaan toimijoita, joiden ydinosaamista ovat käänteiset ja alaspäin ketjuuntuvat kierrot, millä varmistetaan tuotteiden kerääminen ja käsittely uudelleenkäyttöä varten. Nämä toimijat voivat olla myös kolmansia osapuolia, mutta tähän liittyy omia haasteitaan esimerkiksi kannattavuuden takaamiseksi, kun mittakaavat saattavat aluksi olla pieniä. Usein uusia laitteita valmistavat yritykset näkevät käytettyjen tai uudelleenvalmistettujen tuotteiden markkinan myös uhkana omalle liiketoiminnalleen, mikä lisää tehtävän vaikeutta. Toisaalta ristiin ketjuuntuvat kierrot vaativat yhteistyötä yritysten välillä jopa yli toimialarajojen. (Ellen MacArthur Foundation, 2012)

Tarvitaan uusia tuotteita ja liiketoimintamalleja. Tuotteiden osalta kiertotalous vaatii standardisointia, modulaarisuutta, puhtaita materiaaleja sekä mahdollisimman helpon osiin purkamisen ja vikojen paikantamisen mahdollisuuden. (Ellen MacArthur Foundation, 2012) Toisaalta yritykset haluavat usein salata mahdollisimman paljon omaa toimintaansa kilpailijoilta, joten vaaditaan jälleen motivointia yhteistyöhön. Bressanelli et al. (2018) tutkii omassa artikkelissaan käyttäjöpohjaista liiketoimintamallia kiertotaloudessa. Keskeisenä ongelmana esiin nousee tuotteiden nopeampi kuluminen, kun käyttäjä ei omista tuotetta ja on näin varomaton. Etuina puolestaan mainitaan muun muassa lisääntyvä resurssitehokkuus jakamisen myötä, paremmat lisäpalvelut kuten huollot, kestäviksi suunnitellut tuotteet sekä kiertojen tehostuminen tuotepalautussopimusten myötä. Siirtymää nopeuttavana tekijänä artikkeli mainitsee digitalisaation.

Kokonaisuudessaan voidaan siis sanoa, että kiertotalous on täynnä mahdollisuuksia, mutta muutoksia tarvitaan esimerkiksi yhteistyön lisäämiseksi. Tietoa kaikista toimitusketjun vaiheista, kuten materiaalien liikkeistä ja myytyjen tuotteiden reaaliaikaisesta kunnosta on nykyään helpompi kerätä ja jakaa kuin koskaan, minkä suhteen erityisesti tiedonvaihdon on esitetty olevan yksi suurimmista kiertotaloussiirtymän haasteista (Winans et al., 2017). Digitalisaatio ja älykäs valmistaminen saattavat siis hyvinkin olla kiertotalouden tärkeimpiä mahdollistajia.

3. TEOLLISUUS 4.0:N ROOLI KIERTOTALOUS-SIIRTYMÄSSÄ

Teollisuudessa sanotaan olevan käynnissä neljäs vallankumous. Ensimmäinen vallankumous lähti liikkeelle Iso-Britanniasta 1700-luvun loppupuolella, ja sen sai liikkeelle höyrykoneen kehittyminen. Toinen vallankumous tapahtui 1800-luvun lopulla ja sen mahdollistivat muun muassa sähkön ja massatuotannon avulla saavutetut tuottavuusharppaukset. Kolmantena vallankumouksena pidetään 1900-luvun lopulla tapahtunutta kehitystä, jossa automaatio- ja tietokonejärjestelmät kehittyivät esimerkiksi mikropiirien käyttöönoton myötä. (Kang et al., 2016) Neljäs vallankumous jatkaa samaa kehitystä, jonka kolmas aloitti. Automaattisesti toimivien järjestelmien lisäksi toimitaan älykkäästi, maksimoiden resurssien hyödyntämisaste valmistusprosessien ja teknologian yhteistyöllä (Kamble et al., 2018).

Teollisuus 4.0 on siis teollisuuden neljännen vallankumouksen valmistavaan teollisuuden keskittyvä osa, joka on konseptina varsin uusi. Termi sai alkunsa Saksassa vuonna 2011 ja sitä käytetään yleisnimityksenä tieto- ja viestintäteknologioiden yhdistämiselle digitaalisiin valmistusmenetelmiin (Kang et al., 2016). Lopes de Sousa Jabbour et al. (2018) määrittelee omassa tutkimuksessaan teollisuus 4.0:n tärkeimmäksi ominaisuudeksi yhteyden laitteiden, tilausten, työntekijöiden, toimittajien ja asiakkaiden välillä. Tämän yhteyden mahdollistaa esineiden internet (*internet of things*, IoT), jonka avulla yritykset voivat käyttää valmistuksessa hajautettua päätöksentekoa sekä autonomisia järjestelmiä. Trentesaux et al. (2016) korostaa, että teollisuus 4.0 mahdollistaa älykkään valmistamisen, jossa komponenttien, tuotteiden ja koneiden välisen yhteyden avulla saavutetaan parempaa suorituskykyä niin tuotesuunnittelun, valmistuksen kuin logistiikankin kannalta.

Kamble et al. (2018) määrittelee teollisuus 4.0:n mukaisesti toimivan systeemin kolmessa osassa. Ensimmäinen on järjestelmän kaksiosaisuus: tietokone on systeemin "aivot", laitteisto toimii "kehona". Kun järjestelmään tulee uutta tietoa, tietokone vastaanottaa sen ja tekee tarvittavat muutokset laitteistoon. Toinen osa on pilvipalvelu. Pilvipalvelua tietokone voi käyttää palveluntarjoajana, eli ikään kuin varastona, serverinä tai tietokantana. Sanaa "pilvi" käytetään yleensä tässä yhteydessä, koska tämä osa ei ole fyysisesti paikalla. Kolmas osa on IoT, joka siis tarkoittaa laitteiden välistä kommunikointia ilman ihmisen puuttumista. IoT:n osuus on kriittinen, sillä sitä jopa pidetään yksittäisenä tärkeimpänä teollisuus 4.0:n käynnistäjänä.

3.1 Teollisuus 4.0:n tärkeimmät teknologiat

Teollisuus 4.0 on pitkälti kehittyneen teknologian mahdollistamaa, ja usein sen synonyymina käytetäänkin älykstä valmistamista. Älykäs valmistaminen vaatii, että fyysiset laitteet yhdistyvät tietoa kerääviin ja lähettäviin laitteisiin, kuten sensoreihin ja RFID-etätunnistimiin (*radio frequency identification*). Tästä yhdistymisestä seuraa, että tuotannon arvoketjun jokainen osa kykenee kommunikoimaan ja tunnistautumaan. Tämä puolestaan mahdollistaa reaaliaikaisten muutosten tekemisen, mikä muuttaa radikaalisti perinteisen kysynnän ennustamiseen perustuvan tuotannon. (Kamble et al., 2018)

Kang et al. (2016) määrittelee tärkeimmiksi teknologioiksi teollisuus 4.0:ssa kyberfyysiset järjestelmät (*cyber-physical system*), IoT:n, big datan, pilvipohjaisen valmistamisen (*cloud manufacturing*) sekä 3D-tulostamisen. Näitä erilaisia teknologioita esitellään tarkemmin seuraavaksi. Lisäksi esitellään lyhyesti muitakin teknologioita, joita on kirjallisuudessa liitetty teollisuus 4.0.aan.

Kyberfyysinen järjestelmä on yleisnimitys teollisuus 4.0:aan liittyville kokonaisuuksille. Wang et al. (2015) kuvailee sitä reaaliaikaisen prosessinhallinnan ja valvonnan mahdollistajana. Tietoa hankitaan ja käsitellään tietoteknisissä järjestelmissä, jotka ovat tiiviissä yhteistyössä fyysisten tuotantolaitteiden ja prosessien kanssa. Kyberfyysinen järjestelmä nojautuu vahvasti muihin teknologioihin. (Kang et al., 2016)

IoT on teollinen ekosysteemi, jossa älykkäät ja itsenäiset koneet, kehittynyt ennakoiva analytiikka ja ihmisen ja koneen yhteistyö yhdistyvät ja näin saavutetaan parempaa tuotavuutta, tehokkuutta ja luotettavuutta (Kamble et al., 2018). IoT kerää tai varastoi tietoa ja luo verkostoja ohjelmistojen, sensoreiden ja koneiden välille (Kang et al., 2016). Sekin tukeutuu siis varsin vahvasti eri toimintojen yhteistyöhön.

Erityisesti **älykkäät sensorit** ja niiden yleistymisen valmistavan teollisuuden koneissa tukee IoT:n käyttöä, sillä sensorit mahdollistavat tiedon keräämisen, prosessoinnin ja kommunikoinnin niin ihmisille kuin toisille koneillekin (Kamble et al., 2018). Älykäs sensori on Kang et al. (2018) artikkelissa määritelty tärkeimmäksi fyysiseksi laitteeksi teollisuus 4.0:an liittyen, sillä yksinkertainenkin sensori kykenee keräämään ja hallitsemaan tietoa reaaliajassa. Bressanelli et al. (2018) mainitsee myös valmistajan ja asiakkaan välisen suhteen muutoksen olevan pitkälti sensoreiden mahdollistama. Kun tuotteen käytöstä voidaan saada paremmin tietoa, asiakassuhde muuttuu neuvottelevasta keskusteleväksi.

IoT:n ja sensoreiden avulla on mahdollista saavuttaa merkittäviä kehitysaskelia reaaliaikaisen mukautuvuuden suhteen valmistusprosesseissa. Näitä ovat muun muassa ennakoiva huoltotarpeen tunnistaminen, tuotannon jatkuvuuden takaaminen varastotasojen

tarkkailemalla sekä parempi kapasiteettisuunnittelu tuotteiden toimivuuden varmistaminen. Tuotekeskeistä prosessin kontrollointia helpottavat puolestaan RFID-etätunnistusmenetelmät, jotka esimerkiksi parantavat tuotannon joustavuutta. IoT:n on tunnistettu vaikuttavan myös muihin valmistuksen osiin: tuote- ja tietovirtojen tehokkaampaan koordinointiin, parempaan pääsyyn eri resursseihin, yhteistyön parantumiseen laajemmissa sosiaalisissa verkostoissa sekä tehokkaampaan toimitusketjujen hallintaan (Kamble et al., 2018)

Big data viittaa nimensä mukaisesti tietomääriin, jotka ovat suuria, laaja-alaisia ja rakenteeltaan monitahoisia ja näin vaativat perinteisistä tiedonkäsittelymenetelmistä eroavaa huomiota (Kang et al., 2016). Näiden tietomäärien analysointi-, tallennus-, visualisointi-, jakamis- ja löytämiskyky ovat kaikki pakollisia valmistavan teollisuuden toimijalle, joka haluaa pärjätä digitalisaation merkityksen kasvaessa (Kang et al., 2016; Kamble et al., 2018). Koko teollisuus 4.0:n voidaan nähdä perustuvan tietoon ja sen hallitsemiseen.

Jo nyt data-analytiikkaa käytetään paljon yrityksissä esimerkiksi tuotannon valvomiseen ja virheiden havaitsemiseen (Kamble et al., 2018). Bahrin et al. (2016) kuitenkin esittelee runsaasti muitakin sen tuomia mahdollisuuksia. Kun tietoa kerätään reaaliaikaisesti lukuisista lähteistä, minkä jälkeen siitä voidaan luoda heti yhtenäinen tulkinta, seuraa tästä mahdollisuus lähes välittömään reagointiin ja päätöksentekoon. Tästä taas seuraa parannuksia tuotannon joustavuuteen, tuotteiden laatuun, energiatehokkuuteen sekä palvelutasoon ennakoitujen huoltojen myötä.

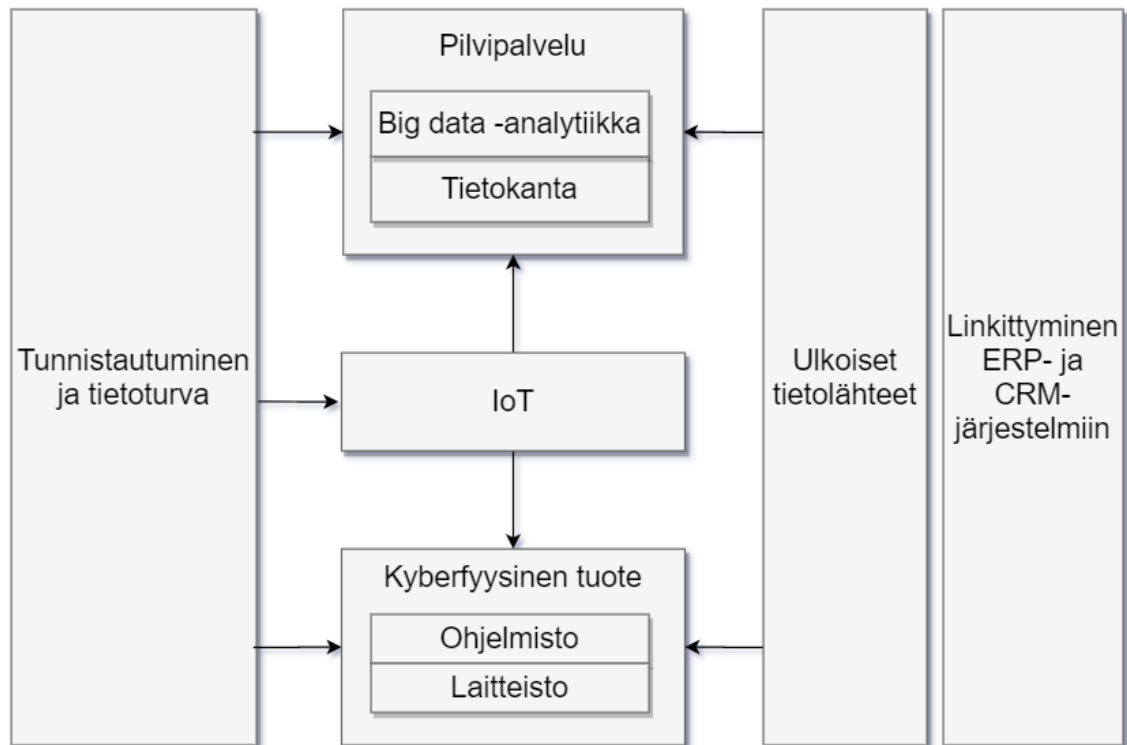
Myös muita etuja ja haasteita on havaittu. Kang et al. (2016) mainitsee eduista lisäksi tuotannon optimoinnin tiettyjen toistuvien kaavojen nopealla ja automatisoidulla tunnistamisella. Lopes de Sousa Jabbour et al. (2018) esittelee big datan käyttökohteiksi myös tuotekehityksen, kysynnän ennustamisen ja ympäristöystävällisemmät tuotantokäytännöt. Kamble et al. (2018) mainitsee haasteina big datan hyödyntämisessä pitkien ja monitahoisten toimitusketjujen hallinnan. Tiedon yhtenäisyys ja luottamuksellisuus on kyettävä varmistamaan.

Pilvipalvelut ovat työkaluja, jotka mahdollistavat kyberfyysisten järjestelmien linkittymisen toisiinsa vaivattomasti. Pilvessä voidaan muodostaa laajoja älykkäitä verkostoja, jotka koostuvat koneista ja tuotteista, palveluista, tiedosta sekä ihmisistä. Pilvipalvelut mahdollistavat teollisuus 4.0:n toimivan yhteistyön lisääjänä. Tietoa voidaan jakaa helposti myös yrityksen rajojen yli, mutta tämän lisäksi koko toiminnan suorituskykyä voidaan parantaa joustavuuden lisääntymisen myötä ja toimintaan sitoutuvien kustannusten määrä pienenee, kun toimitaan verkossa. (Kamble et al., 2018)

Myös **3D-tulostaminen** voidaan nähdä teollisuus 4.0:n teknologiana, vaikkei sen roolista olekaan kirjallisuudessa täyttä yksimielisyyttä. Rosa et al. (2019) pitää sitä yhtenä tärkeimmistä teollisuus 4.0:n teknologioista, kun taas Kang et al. (2016) ei näe sen kuuluvan kaikkein keskeisimpiin teknologioihin. Yksinkertaisuudessaan 3D-tulostaminen on tietokoneohjelmalle annetun kolmiulotteisen mallin muuttamista fyysiseksi esineeksi yhdistämällä materiaaleja valon, ultraäänivärähtelyn, laserin sekä elektronisuihkun avulla. Ei ole itsessään uusi idea tulostaa esineitä, mutta materiaali- ja laminointiteknologioiden kehittyminen on tehnyt siitä varteenotettavan vaihtoehdon valmistavaan teollisuuteen. (Kang et al., 2016)

Etuja, joita 3D-tulostamisesta voidaan saada perinteiseen valmistukseen verrattuna, ovat materiaali- ja muu resurssitehokkuus, joustavuus tuotteiden suhteen sekä joustavuus valmistuksen suhteen (Kang et al., 2016). Tiettyjä tuotteita on helppo valmistaa vain pieni määrä ja valmiit tuotteet ovat oikean mallisia ja kevyitä. Tarvittavat varuustarastomäärät pienenevät ja tarvittavat kuljetusmatkat lyhenevät. (Kamble et al., 2018) Haasteina Kang et al. (2016) nimeää kokorajoitukset, epätarkkuuden ja valmistamisen korkean hinnan. Kamble et al. (2018) puolestaan nostaa esiin kolme teknistä haastetta, jotka ovat sopivien materiaalien rajallinen määrä, epätarkkuus ja matala tuottavuus.

Kuten Rosa et al. (2019) kirjallisuuskatsauksessaan toteaa, ei ole yksiselitteistä linjausta siitä, mitkä kaikki teknologiat kuuluvat teollisuus 4.0:aan. Muita teknologioita, joita käsitteeseen liitetään kirjallisuudessa, ovat muun muassa robottijärjestelmät, simulaatiot, tietoturva (Kamble et al., 2018), koneoppiminen (Bressanelli et al., 2018), tekoäly (Rajput & Singh, 2019) sekä hologrammit ja näihin liittyvä virtuaalitodellisuus (Kang et al., 2016). Myös älykkäiden tuotteiden kautta aihetta lähestyvä artikkeli Porterilta ja Heppelmannilta (2014) nostaa esimerkiksi tietoturvan esille yhtenä tärkeänä komponenttina. Tämän artikkelin pohjalta luotu kuva 2 kokoaa yhteen yhden näkemyksen teknologioiden muodostamasta kokonaisuudesta.



Kuva 2: Teollisuus 4.0:n teknologioiden yhteys yrityksessä älykkään tuotteen kautta (mukailleen Porter & Heppelmann 2014, s. 7)

Kuvasta 2 nähdään, kuinka älykäs tuote linkittyy IoT:n avulla pilvipalveluun ja data-analytiikkaan, samoin muut kytkökset, jotka mahdollistavat nopean ja luotettavan tiedon siirtämisen sekä linkittymisen ulkopuolisiin systeemeihin, kuten toiminnanohjausjärjestelmään (*enterprise resource planning*, ERP). Porter ja Heppelmann (2014) korostavat, että tämä moniosainen kokonaisuus vaatii toimiakseen paljon osaamista, jota perinteisissä valmistavan teollisuuden yrityksissä ei välttämättä ole: ohjelmistokehitystä, systeemisuunnittelua sekä verkkoturvallisuuden asiantuntijuutta. Käytännössä tämä tarkoittaa, että yritysten on tehtävä merkittäviä investointeja. Toisaalta Kamble et al. (2018) mainitsee, että ratkaisuna tähän voisivat olla laadukkaat pilvipohjaiset alustat, joiden käyttöönotto olisi mahdollisimman yksinkertaista ja näin vähentäisi pienempien yritysten kynnystä investoinnille.

Kokonaisuudessaan voidaan todeta, että teollisuus 4.0 tuo mukanaan lukuisia uusia mahdollisuuksia. Tuotannon valvonta, etähallinta, optimointi ja kyky tehdä jopa itsenäisiä päätöksiä reaaliaikaiseen tietoon pohjautuen ovat kaikki erittäin tärkeässä roolissa, kun toimitusketjuja ja tuotantosysteemeitä ryhdytään siirtämään lineaarisesta talousmallista kohti kiertotaloutta. Seuraavaksi tätä yhteyttä tarkastellaan vielä tarkemmin.

3.2 Digitaalisten teknologioiden hyödyntäminen kiertotaloussiirtymässä

Teollisuus 4.0 ja sen teknologiat mahdollistavat siis tiedon reaaliaikaisen seurannan ja kontrolloinnin monen eri muuttujan suhteen. Näitä muuttujia ovat muun muassa yleinen tuotannon tila, energiankulutuksen taso, materiaalien virtaus, asiakastilaukset ja alihankkijatiedot. Lisäksi teknologia helpottaa asiakassuhteiden ylläpitämistä ja vuorovaikutusta tuottajan ja ostajan välillä. (Lopes de Sousa Jabbour et al., 2018) Kuten kappaleessa 2.5 nousi esiin, juuri nämä ovat asioita, joita kiertotalous vaatii kiertotalouksiin vaihtoehdoksi lineaariselle kuluttamismallille. Tässä kappaleessa käydään tarkemmin läpi, miten kiertotalous vahvistuu teollisuus 4.0:n mahdollistamana.

Alla esitetyt taulukot on luotu Bressanellin et al. (2018) ja Lopes de Sousa Jabbourin et al. (2018) artikkeleiden pohjalta. Taulukossa 1 nähdään tunnistettuja hyötyjä, joita uudet digitaaliset teknologiat mahdollistavat, sekä mitkä teknologiat näihin hyötyihin erityisesti liittyvät. Taulukkoon on valittu luvussa 3.1 esitellyt neljä teknologiaa: IoT, big data -analytiikka, pilvipalvelut sekä 3D-tulostaminen. Lisäksi hyödyt on lajiteltu alkutuotantoon, käyttövaiheeseen ja käytön jälkeiseen vaiheeseen. Bressanelli et al. (2018) määrittelee alkutuotantoon kuuluviksi tuotesuunnittelun ja valmistuksen, käyttövaiheeseen sisältyväksi logistiikan/jakelun, käytön, palvelut ja huollon, ja viimeisenä käytön jälkeiseen vaiheeseen uudelleenkäytön, korjaamisen, uudelleenvalmistamisen ja kierrätyksen.

Taulukko 1: Teollisuus 4.0:n tuomia etuja (mukaan Bressanelli et al., 2018, s. 9 sekä Lopes de Sousa Jabbour et al., 2018, s. 279)

Teollisuus 4.0:n luoma mahdollisuus	Vaikuttavat teknologiat				Tuote-elinkaaren vaihe
	IoT	Big data	Pilvipalvelu	3D-tulostus	
Tuotesuunnittelun parantaminen	x	x	x	x	Alkutuotanto
Kohdemarkkinan löytäminen	x	x	x		Alkutuotanto
Etävalvonta	x		x		Käyttövaihe
Teknisen tuen palvelut	x	x	x		Käyttövaihe
Ennaltaehkäisevä ja ennakoiva huolto	x	x	x		Käyttövaihe
Käytön optimointi	x	x			Käyttövaihe
Tuotteen päivittäminen	x		x	x	Käytön jälkeen
Käytönjälkeiset palvelut	x	x		x	Käytön jälkeen

Kuten taulukosta 1 nähdään, hyödyt linkittyvät vahvasti IoT:hen sekä sen ympärille linkittyvään data-analytiikkaan ja pilvipalveluun. Alkutuotantovaiheessa voidaan parantaa tuotesuunnittelua, kun tuotteiden käytöstä voidaan sensoreiden avulla kerätä tietoa, ja näin tiedetään paremmin, mistä asiakasarvo muodostuu. Näin tuotteet siis vastaavat paremmin aitoon tarpeeseen. Lisäksi tuotteen kohdemarkkina on helpompi tunnistaa ja kohdentaa markkinointia oikeaan suuntaan. (Porter & Heppelmann, 2014) Pilvipalveluilla

on tässä olennainen rooli kysynnän ja tarjonnan yhdistäjänä. Tarjontaan lisää joustavuutta tuo puolestaan 3D-tulostaminen, kun tuotteita on helpompi valmistaa tarpeeseen. (Lopes de Sousa Jabbour et al., 2018)

Käyttövaiheessa etävalvonta mahdollistaa niin teollisessa ympäristössä tapahtuvan valvonnan, kuin yleisesti helpomman jakamisalustojen, eli yhteiskäytön mahdollistavien työkalujen, hyödyntämisen myös kuluttajamarkkinoilla. Tuotteista, niiden tilasta ja sijainnista voidaan kerätä jatkuvasti tietoa ja jakaa se pilvipalvelun kautta, mikä helpottaa tuotteiden jakamista ja yhteiskäyttöä. Lisäksi tuotteen korjaaminen ja esimerkiksi varaosatarpeiden tunnistaminen helpottuvat IoT:n mahdollistaman kommunikoinnin myötä. Samalla voidaan tunnistaa huoltotarpeet ennakoivasti ja ennaltaehkäisevästi. (Bressanelli et al., 2018; Lopes de Sousa Jabbour et al., 2018) Tiedon kerääminen mahdollistaa myös tuotannon optimaalisemman toiminnan, kun älykäs prosessi tunnistaa kehittämistarpeet toiminnasta esimerkiksi energiankulutuksen pienentämiseksi. (Porter & Heppelmann, 2014) Lopes de Sousa Jabbour et al. (2018) mainitsee myös esimerkiksi IoT:n avulla tapahtuvan kuljetusreittien optimoinnin, mikä osaltaan lisää toiminnan kestävyyttä.

Ensimmäisen tuote-elinkaaren lopussa tärkeä teollisuus 4.0:n tuoma mahdollisuus syntyy tuotteiden ohjelmistojen päivittämisestä. Vaikka tuotteen fyysisessä laitteistossa ei olisi vielä vikaa, saattavat ohjelmistot vanhentua. Digitaalisten osien ohjelmistopäivitykset auttavat tässä (Ellen MacArthur Foundation, 2012; Bressanelli et al., 2018; Lopes de Sousa Jabbour et al., 2018). Toisaalta voidaan nähdä myös 3D-tulostamisen vaikuttavan, jos puhutaan laitteistojen uudelleenvalmistuksesta. Myös kierrättämisprosessien tehostamiseen on liitetty mahdollisuus 3D-tulostamisen hyödyntämiseen tulevaisuudessa. (Rosa et al., 2019) Tiedon kerääminen sijainnista ja tuotteen kunnosta IoT:n avulla puolestaan helpottaa tuotteiden kunnostamista, uudelleenvalmistamista sekä kierrättämistä (Bressanelli et al., 2018). Näitä suoria yhteyksiä kiertotalouteen tarkastellaan seuraavaksi tarkemmin taulukossa 2.

Taulukko 2: Teollisuus 4.0:n ja kiertotalouden arvonluonnin yhteys (mukailten Bressanelli et al., 2018, s. 16)

Teollisuus 4.0:n luoma mahdollisuus	Arvonluonnin keino kiertotaloudessa		
	Kasvava resurssitehokkuus	Tuote-elinkaaren pidentäminen	Kiertojen sulkeminen
Tuotesuunnittelun parantaminen		x	x
Kohdemarkkinan löytäminen	x	x	x
Etävalvonta	x	x	
Teknisen tuen palvelut		x	
Ennaltaehkäisevä ja ennakoiva huolto		x	
Käytön optimointi	x		
Tuotteen päivittäminen	x	x	
Käytönjälkeiset palvelut			x

Edellä sivuttiin jo jonkin verran myös sellaisia hyötyjä, jotka vaikuttavat suoraan myös kiertotalouden näkökulmasta. Taulukko 2 keskittyy nyt vain näihin hyötyihin. Taulukkoon on valittu kolme keskeistä arvonluonnin lähdettä kiertotaloudesta: kasvava resurssitehokkuus, tuotteiden elinkaarien pidentäminen sekä kiertojen sulkeminen. Luvussa 2.2.2 esiin nostetut arvonluonnin lähteet, kuten tiiviimmät, pidemmät ja puhtaammat kierrot liittyvät vahvasti samaan asiaan.

Alkutuotannossa tärkeintä kiertotalouden kannalta on tuotteiden suunnittelu alusta alkaen niin, että niitä on helppo huoltaa, päivittää ja uudelleenasettaa (Ellen MacArthur Foundation, 2012). Tämän lisäksi voidaan luoda kysyntää ja kohdentaa markkinointia, jotta asiakkaat löytävät esimerkiksi palveluun perustuvan vaihtoehdon omaksi ostamisen sijasta. Näin tuotteen alkutuotannossa voidaan luoda arvoa kaikilla kolmella keinolla. (Bressanelli et al., 2018) Lopes de Sousa Jabbour et al. (2018) tarkentaa jakamiseen syntyviä mahdollisuuksia nimenomaan erilaisiin sovelluksiin ja internetsivuihin, joilla kysyntä ja tarjonta saadaan kohtaamaan aiempaa helpommin.

Tuotteen käytön aikana kiertotaloudelle olennaiset jakamisalustat tarvitsevat reaaliaikaista tietoa tuotteen sijainnista, kunnosta ja tilasta. Lisäksi seuranta vähentää yhteiskäyttöisen tuotteen huolimatonta kohtelua. Käytönaikaista toiminnan optimointia voidaan lisätä kohdennetuilla neuvoilla käyttäjälle. Optimointi parantaa resurssitehokkuutta, mutta yleisesti käytön aikana voidaan ennen kaikkea vaikuttaa tuotteen elinkaaren pituuteen. (Bressanelli et al., 2018) Tähän liittyen on kuitenkin hyvä miettiä, miten halukkaita asiakkaat ovat käyttämään tuotteita, jotka jatkuvasti seuraavat ja keräävät tietoa käyttäjästä ja pyrkivät neuvomaan.

Käytön jälkeen tuotteen älykkäiden eli digitaalisten osien päivittäminen vähentää materiaalinkulutusta, kun fyysiset laitteet voidaan säilyttää käytössä. Tämä lisää siis laitteiston

elinikä. Lisäksi tämä säästää materiaaleja ja energiaa, joten myös resurssitehokkuus paranee. Myös, kuten tuotteiden jamisen yhteydessä, tieto tuotteen sijainnista ja komponenttien kunnosta parantaa uudelleenkäyttö ja -valmistusmahdollisuuksia tuotteen ensisijaisen käytön jälkeen ja näin edistää kiertojen sulkemista. (Bressanelli et al., 2018)

Myös muunlaisia mahdollisia yhteyksiä kiertotalouden ja teollisuus 4.0:n välillä on kirjallisuudessa tunnistettu. Rosa et al. (2019) mainitsee esimerkiksi kolme mielenkiintoista big data -analytiikan tuomaa mahdollisuutta: automatisoitu pyrkimys arvoa tuovien uusiokäyttömateriaalien tai luvussa 2.4.2 esille nousseiden teollisten symbioosien löytämiseen, avointen uudelleenkäytön edistämiseen pyrkivien työkalujen tai palveluiden kehittäminen sekä innovatiivisten liiketoimintamallien integroitu arvioiminen. Tulevaisuudessa big data -analytiikka voisi siis mahdollistaa hyvin edistyksellisiä kestävyttä parantavia asioita, joita tällä hetkellä on vaikea täysin hahmottaa. IoT:n yhteydessä samassa artikkelissa mainitaan jättesuunnittelun uudistaminen älykkäissä kaupungeissa sekä metallurgisten prosessien kiertävyyden lisääminen.

On kuitenkin olemassa myös esteitä sille, mikseivät teollisuus 4.0 ja kiertotalous välttämättä saavuta edellä kuvattuja hyötyjä, vaikka potentiaalia löytyykin. Lopes de Sousa Jabbour et al. (2018) mainitsee kiertotaloussiirtymään osallistuvien yritysten yhdeksi keskeisimmistä ongelmista sen, kuinka löytää yhteistyökumppaneita ja näin rakentaa laajempaa verkostoa toimintaan. Tästä voi seurata vaikeuksia saavuttaa mittakaavoja, joilla uusiomateriaalien käytöstä tulee ylipäätään kannattavaa. Muita artikkelissa mainittuja haasteita ovat organisaation sisäinen kommunikointi, tietoturva, osaamisen puute, etäyhteyksien luotettavuus sekä tiedon keräämisen ongelmat. Kaikkiaan voidaan todeta avoimen tiedon jakamisen olevan teollisuus 4.0:n ja kiertotalouden keskeisin mahdollistaja, mutta samalla niiden olevan haasteellisia savuttaa.

Kokonaisuudessaan havaitaan, että kiertotalouden vaatimat muutokset erityisesti kiertojen sulkeutumiseen liittyen tapahtuvat tuotteen elinkaaren alku- ja loppuvaiheessa (Bressanelli et al., 2018). Kuten Ellen MacArthur Foundationkin (2012) artikkelissaan totesi, parhaiten kiertävään talousmalliin voidaan päästä, kun tuotteet suunnitellaan alun alkaen uudelleenkäytettäväksi ja korjattaviksi. Tämän lisäksi elinkaaren lopussa on valmis suunnitelma käänteisestä logistiikasta, jolla tuotteet siirtyvät tehokkaasti seuraavalle käyttäjälle joko sellaisenaan tai uudelleenvalmistuksen kautta. Näin luodaan aito mahdollisuus irtaantua lineaarisesta talousmallista.

4. PÄÄTELMÄT

On hyvä syy epäillä kiertotalouden ja teollisuus 4.0:n liittyvän molempien vahvasti tulevaisuuden taloudelliseen kehitykseen, jossa teknologian hyödyntäminen, tuottavuuden kasvattaminen ja resurssien kulutuksen vähentäminen ovat kaikki keskeisiä tekijöitä (Garcia-Muiña et al., 2018). Tässä työssä tarkasteltiin tarkemmin yhteyttä näiden kahden laajan ja tärkeän käsitteen välillä. Teollisuus 4.0 sisältää runsaasti sellaisia hyötyjä, joilla voidaan edesauttaa kiertotaloussiirtymää joko suoraan tai välillisesti muiden hyötyjen kautta. Kiertotalous hyötyy monista sellaista mahdollisuuksista, joiden toteuttaminen ilman edistynyttä teknologiaa olisi selvästi vaikeampaa. Näitä kiertotalouden edellytyksiä ovat muun muassa tuotesuunnittelun muutokset, kiertävyyteen ja käyttäjälähtöisyyteen perustuvat liiketoimintamallit, tuotteen elinkaaren vaiheiden parempi hallinta sekä runsas ja avoin kommunikointi niin organisaation sisällä kuin ulospäin omille sidosryhmille. Tietenkin teollisuus 4.0 tuo mukanaan myös selkeämpiä suoraa hyötyjä, kun valmistusprosesseissa voidaan vähentää jätteen muodostumista, ylituotantoa, energian kulutusta sekä turhaa kuljettamista (Kamble et al., 2018).

4.1 Näkökulmia johtamistyölle

Kestävä toiminta niin talouden, ympäristön kuin ihmistenkin suhteen on osa lähes kaikkien yritysten toimintaa tai vähintään tavoitteita. Jotta kestäväyyteen voidaan aidosti päästä, vaatii se lineaariseen talousmalliin selkeän muutoksen. Tämä muutos tulee vaatimaan suuria investointeja yrityksiltä, mutta tämän työn perusteella nämä panostukset uuteen teknologiaan ovat aidosti tarpeellisia. Kuten Porter ja Heppelmann (2014) omassa artikkelissaan toteavat, uudet teknologiat mahdollistavat tehokkaamman, turvallisemman sekä luotettavamman toiminnan, joka samalla säästää rajallisia luonnonvarojamme.

Porter ja Heppelmann (2014) nostavat esiin myös toisen erittäin olennaisen huomion, johon tämän työn perusteella voidaan yhtyä. Uudet teknologiat mahdollistavat nopean innovatiivisuuden ja hyvinvoinnin kasvun, jonka tulisi nyt korvata pitkään vallinnut menoleikkauksiin, varovaisiin investointeihin, lisääntyviin yrityskauppoihin sekä laskevaan innovatiivisuuteen ajautuneen talouden tilan. Artikkelisi esittää, että tämä pitkään vallinnut tila on johtanut työllisyyden, palkkojen ja keskivertokansalaisen elintason kasvun hidastumiseen sekä myös kapitalistisen talousjärjestelmän kyseenalaistamiseen ongelmien korjaajana. Tämän työn perusteella teollisuus 4.0 ja kiertotalous voisivat yhdessä tarjota

ratkaisun, joka tarttuu näihin ongelmiin ja samalla tuo myös runsaasti muita etuja erityisesti ekologisen kestävyuden kannalta.

Muutoksen saavuttaminen ajoissa vaatii yrityksiltä rohkeutta toimia. Ellen MacArthur Foundation (2012) mainitsee omassa raportissaan, kuinka tiukat ympäristölainsäädännöt ja neitseellisten raaka-aineiden niukkuus ovat pysyviä asiantiloja, kun esimerkiksi fossiilisiin polttoaineisiin kohdistuvat hintatuet puolestaan ovat varsin epävarmalla pohjalla tulevaisuudessa. Tämänkin perusteella voidaan esittää, että investoinnit uusiin teknologioihin ja uudenlaisten liiketoimintamallien käyttöönottoaminen ovat keskeisiä keinoja pitkän aikavälin toimintakyvylle yrityksissä.

Ongelmia tietopohjaisen yhteiskunnan tai kiertävän talousmallin rakentamisessa varmasti esiintyy. Voidaan kuitenkin todeta, että vaikka muutoksen saavuttaminen saattaa nyt vaatia riskien ottamista, vielä riskialttiimpaa pitkällä aikavälillä on olla tekemättä mitään. Epävarmuus on harvoin yrityksen toiminnassa hyvä asia. Yleisen tietosuoja-asetuksen (GDPR) kaltaista lainsäädäntöä tulee mahdollisesti lisää tulevaisuudessa, ja tiedon omistajuuteen ja hallintaan tarvitaan lisää pelisääntöjä. On kuitenkin selvää, että tieto ja sen hallitseminen ovat itsessään tulevaisuuden tärkeitä kykyjä monessa organisaatiossa. Mitä tulee kiertotaloussiirtymään, on tieteellisessä kirjallisuudessa vallitsevan yhteisymmärryksen perusteella varsin turvallista olettaa, ettei lainsäädäntö tule ainakaan häiritsemään edistystä tulevaisuudessa.

4.2 Jatkotutkimusaiheita

Teollisuus 4.0 ja sen vaikutukset kiertotaloussiirtymään ovat teoreettisesti jo varsin hyvin tunnistettuja monelta osin tieteellisessä kirjallisuudessa. Tässä työssä pyrittiin esittelemään tämän aihepiirin keskeisimpiä löytöjä. Jatkotutkimusaiheena olisi mielenkiintoista tutkia aiempaa laajemmin empiirisesti näitä hyötyjä, esimerkiksi yritysverkostojen suhteen ekoteollisuuspuistoissa. Toisivatko uudet teknologiset sovellutukset mahdollisesti merkittäviä lisähyötyjä aiemmin tunnistettuihin verrattuna kiertotalouden suhteen, kun reaaliaikaista tietoa olisi paremmin saatavilla ja verkostossa voitaisiin päästä entistä syvempiin yhteistyösuhteisiin.

Toisaalta, olisi mielenkiintoista tutkia tarkemmin sitä, kuinka paljon vaikutusta on lainsäädännöllä. Voidaanko kiertotalouteen päästä pelkällä markkinavetoisella toiminnalla, jos yritykset uskovat edelleen löytävänsä turvallisimmat ja riskittömimmät tulovirrat lineaarisella talousmallilla. Kuinka paljon kannustimia ja lisätukia tarvitaan, jotta muutosta alkaa tapahtua nykyistä nopeammin? Näiden kannustimien kohdentaminen voi olla vai-

keaa, koska kiertotalous ei ole yhtä yksiselitteinen kokonaisuus kuin esimerkiksi tuulivoiman rakentamisen tukeminen. Tämän perusteella olisi siis hyvä tutkia myös sitä, millaiset lainsäädännön kautta luodut kannustimet toimivat tehokkaimmin.

Myös kulttuurillinen näkökulma niin uusien teknologioiden kuin kiertotaloudenkin kannalta on tärkeä. Uberin ja Airbnb:n kaltaiset nopeasti kasvaneet toimijat ovat osoittaneet, että ihmiset ovat kiinnostuneet uudenlaisista liiketoimintamallista omistajuuden sijaan. Tämän jakamislustoille perustuvan liiketoiminnan kasvu saattaa kärsiä voimakkaasti vallitsevan koronavirustilanteen myötä. Yksi mahdollinen tutkimusnäkökulma voisikin olla se, kuinka paljon vahvaan yhteisöllisyyteen nojaava käyttäjäpohjainen liiketoiminta kärsii tästä pandemiasta ja kuinka syvä tämä vaikutus on.

LÄHTEET

- Bahrin, M. A. K., Othman, M. F., Azli, N. N., & Talib, M. F. (2016). Industry 4.0: A review on industrial automation and robotic. *Jurnal Teknologi*, 78(6-13), 137-143.
- Bressanelli, G., Adrodegari, F., Perona, M., & Saccani, N. (2018). Exploring how usage-focused business models enable circular economy through digital technologies. *Sustainability (Switzerland)*, 10(3).
- Caprile, D., & Ripa, M. (2014). A life cycle assessment of landfilled municipal solid waste in argentina: The influence of waste composition on greenhouse gases emissions and other impacts. *Journal of Environmental Accounting and Management* 2(2), 14.
- Castellani, V., Sala, S., & Mirabella, N. (2015). Beyond the throwaway society: A life cycle-based assessment of the environmental benefit of reuse. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 11(3), 373-382.
- Ellen MacArthur Foundation. (2012). *Towards a circular economy, economic and business rationale for an accelerated transition*. Coves, UK.
- Erkman, S. (1997). Industrial ecology: An historical view. *Journal of Cleaner Production*. 5 (1-2), 1-10.
- Frosch, R. A. (1992). Industrial ecology: A philosophical introduction. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 89(3), 800-803.
- Garcia-Muiña, F. E., González-Sánchez, R., Ferrari, A. M., & Settembre-Blundo, D. (2018). The paradigms of industry 4.0 and circular economy as enabling drivers for the competitiveness of businesses and territories: The case of an italian ceramic tiles manufacturing company. *Social Sciences*, 7(12).
- 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.
- Jackson, T., & Senker, P. (2011). Prosperity without growth: Economics for a finite planet. *Energy & Environment*, 22(7), 1013-1016.
- Kamble, S. S., Gunasekaran, A., & Gawankar, S. A. (2018). Sustainable industry 4.0 framework: A systematic literature review identifying the current trends and future perspectives. *Process Safety and Environmental Protection*, 117, 408-425.
- Kang, H. S., Lee, J. Y., Choi, S., Kim, H., Park, J. H., Son, J. Y., ... Do Noh, S. (2016). Smart manufacturing: Past research, present findings, and future directions. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 3(1), 111-128.
- Lopes de Sousa Jabbour, A. B., Jabbour, C. J. C., Godinho Filho, M., & Roubaud, D. (2018). *Industry 4.0 and the circular economy: A proposed research agenda and original roadmap for sustainable operations*. Springer New York LLC.
- Porter, M. E., & Heppelmann, J. E. (2014). How smart, connected products are transforming competition. *Harvard Business Review* November 2014.
- Rajput, S., & Singh, S. P. (2019). Connecting circular economy and industry 4.0. *International Journal of Information Management*, 49, 98-113.
- Ranta, V., Aarikka-Stenroos, L., Ritala, P., & Mäkinen, S. J. (2018). Exploring institutional drivers and barriers of the circular economy: A cross-regional comparison of China, the US, and Europe.

- Rosa, P., Sassanelli, C., Urbinati, A., Chiaroni, D., & Terzi, S. (2019). Assessing relations between circular economy and industry 4.0: A systematic literature review. *International Journal of Production Research*.
- Song, Q., Li, J., & Zeng, X. (2015). Minimizing the increasing solid waste through zero waste strategy.
- Trentesaux, D., Borangiu, T., & Thomas, A. (2016). Emerging ICT concepts for smart, safe and sustainable industrial systems.
- Tseng, M., Tan, R. R., Chiu, A. S. F., Chien, C., & Kuo, T. C. (2018). Circular economy meets industry 4.0: Can big data drive industrial symbiosis? *Resources, Conservation and Recycling*, 131, 146-147.
- Veleva, V., Todorova, S., Lowitt, P., Angus, N., & Neely, D. (2015). Understanding and addressing business needs and sustainability challenges: Lessons from devens eco-industrial park.
- Wang, L., Törngren, M., & Onori, M. (2015). Current status and advancement of cyber-physical systems in manufacturing.
- Winans, K., Kendall, A., & Deng, H. (2017). The history and current applications of the circular economy concept. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68, 825-833.