

Saana Mattila

INDUSTRY 4.0 KESTÄVÄN KEHITYKSEN EDISTÄJÄNÄ

Kandidaatintyö
Johtamisen ja talouden tiedekunta (MAB)
Tuomas Korhonen
Toukokuu, 2022

TIIVISTELMÄ

Saana Mattila: Industry 4.0 kestävä kehitys edistämisenä (Industry 4.0 as part of enabling sustainable development)

Kandidaatintyö

Tampereen yliopisto

Tuotantotalous

Toukokuu 2022

Industry 4.0 ja kestävä kehitys ovat tällä hetkellä merkittäviä valmistavaan teollisuuteen vaikuttavia muutostrendejä, jotka voivat yhdessä muodostaa toisiaan vahvistavan kokonaisuuden. Kandidaatintyön päätavoitteena oli selvittää, miten Industry 4.0 voi edistää kestävä kehitystä ja minkälaisen kokonaisuuden nämä kaksi trendiä muodostavat yhdessä. Työssä selvitettiin lisäksi Industry 4.0:n ja kestävä kehityksen ominaispiirteitä ja merkityksiä valmistavan teollisuuden näkökulmasta. Työ toteutettiin kirjallisuuskatsauksena, jossa lähteinä hyödynnettiin vertaisarvioituja tieteellisiä artikkeleita.

Kestävä kehitys tavoitellaan toiminnan muutosta siten, että nykyhetken lisäksi myös tulevaisuudessa on mahdollisuus hyviin olosuhteisiin niin taloudellisesti, ekologisesti kuin sosiaalisesti. Valmistavassa teollisuudessa kestävä kehitys voidaan edistää esimerkiksi vahvistamalla talouskasvua ja kilpailukykyä, vähentämällä saastuttamista, tehostamalla resurssien käyttöä sekä parantamalla työhyvinvointia ja -turvallisuutta.

Industry 4.0 on 2010-luvulla alkanut neljäs teollinen vallankumous, jonka myötä valmistavan teollisuuden prosesseihin, laitteisiin ja tuotteisiin integroidaan uusia digitaalisia sovelluksia. Ilmiön keskiössä on kokonaisuus edistyneitä ja kehittyviä teknologioita, jotka mahdollistavat esimerkiksi entistä joustavampia ja dynaamiset tuotantoprosessit, kilpailukykyisemmät liiketoimintamallit sekä reaaliaikaisen ja tehokkaamman tiedonjaon.

Työssä käytettyjen lähteiden perusteella teknologioiden aiheuttamat muutokset voivat saada aikaan edistystä kaikissa kestävä kehityksen kolmessa ulottuvuudessa. Parannus painottuu ensisijaisesti etenkin taloudelliseen kestävyteen toiminnan kehittyessä tuottavammaksi ja kilpailukykyisemmäksi. Sosiaalinen kestävyys voi myös vahvistua muun muassa parempien työolosuhteiden kautta. Ekologisen kestävyden näkökulmasta Industry 4.0 voi edistää kiertotaloutta ja resurssitehokkuutta. Toisaalta teknologiat myös heikentävät ekologista kestävyttä monin eri tavoin, kuten lisääntyvän jätteen ja korkeamman resurssitarpeen vuoksi. Työn tulokset osoittivat myös kestävyden eri ulottuvuuksien olevan osittain limittäisiä ja toisiinsa vaikuttavia, minkä vuoksi muutokset ja parannukset yhdessä ulottuvuudessa voivat heijastua vahvasti myös toisiin ulottuvuuksiin. Lisäksi on keskeistä huomioida, että potentiaalisten edistysaskelien saavuttamiseksi kaikissa kestävä kehityksen ulottuvuuksissa Industry 4.0:n ja kestävä kehityksen on oltava organisaatioille strategisesti tärkeitä aiheita.

Avainsanat: Industry 4.0, neljäs teollinen vallankumous, kestävä kehitys, kestävyys, valmistava teollisuus

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ALKUSANAT

Opintojeni aikana kiinnostukseni kestävästä kehitystä kohti on kasvanut merkittävästi, joten aihe valikoitui helposti myös kandidaatintyön teemaksi. Kandidaatintyön kirjoitus oli pitkä ja ajoittain haasteellinen prosessi, mutta lopulta eteni sujuvasti aiheen ollessa tiiviisti yhteydessä omiin mielenkiinnon kohteisiin. Työ syvensi mielenkiintoani aiheeseen ja pyrin työskentelemään kestävästä kehityksen parissa myös tulevaisuudessa.

Haluan kiittää Tuomas Korhosta työhön saamastani tuesta ja ohjauksesta. Häneltä sain arvokasta ohjausta etenkin työn rajauksen, rakenteen muodostumisen ja viimeistelyn yhteydessä. Kiitän myös perhettäni tuesta ja palautteesta, joita sain työtä kirjoittaessani. Kiitos myös kanssaopiskelijoille vertaistuesta kandidaatintyön kirjoitusprosessin eri vaiheissa.

Tampereella, 4.5.2022

Saana Mattila

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO.....	1
1.1 Työn tausta.....	1
1.2 Tavoitteet ja tutkimusongelma.....	2
1.3 Tutkimusmetodologia.....	2
1.4 Työn rakenne.....	4
2. KESTÄVÄ KEHITYS JA SEN ILMENEMINEN VALMISTAVASSA TEOLLISUUDESSA.....	5
2.1 Kestävän kehityksen tavoitteet.....	6
2.2 Kestävä valmistus.....	7
3. INDUSTRY 4.0 OSANA VALMISTAVAN TEOLLISUUDEN MUUTOSTA.....	9
3.1 Keskeisimmät Industry 4.0 -teknologiat.....	9
3.2 Industry 4.0:n aiheuttamia liiketoiminnallisia muutoksia.....	10
4. INDUSTRY 4.0 OSANA KESTÄVÄÄ KEHITYSTÄ.....	13
4.1 Taloudellinen kestävyys.....	13
4.2 Ekologinen kestävyys.....	15
4.3 Sosiaalinen kestävyys.....	18
4.4 Ulottuvuuksien priorisointi.....	19
5. PÄÄTELMÄT.....	21
5.1 Työn päätulokset.....	21
5.2 Tulosten merkityksellisyys, arviointi ja rajoitteet.....	23
5.3 Jatkotutkimus.....	24
LÄHTEET.....	26

KUVALUETTELO

Kuva 1.	<i>Kandidaatintyön rakenne</i>	4
Kuva 2.	<i>Kestävän kehityksen ulottuvuudet ja niiden tarkastelun kohteet (yhdistelty lähteistä Gimenez et al 2012. ja Stock et al. 2018)</i>	5
Kuva 3.	<i>Kestävän kehityksen tavoitteiden ja kolmen ulottuvuuden yhteys (koottu lähdeittä Bai et al. 2020 mukailleen)</i>	6
Kuva 4.	<i>Kestävä kehitys osana valmistavaa teollisuutta (yhdistelty lähteistä Gimenez et al. 2012, Eslami et al. 2019)</i>	7
Kuva 5.	<i>Industry 4.0 ja osa siihen kuuluvien teknologioiden muodostamaa kokonaisuutta (yhdistelty lähteistä Xu et al. 2018, Beier et al. 2020, Culot et al. 2020 ja Siltori et al. 2021)</i>	10
Kuva 6.	<i>Industry 4.0: kokonaisuus osana teollisuuden muutosta (yhdistelty lähteistä Kagermann et al. 2013, Dalenogare et al. 2018, Beier et al. 2020, Culot et al. 2020, Nizetic et al. 2020 ja Siltori et al. 2021)</i>	11
Kuva 7.	<i>Yhteenveto työn tutkimuskysymysten vastauksista</i>	23

1. JOHDANTO

1.1 Työn tausta

Liiketoiminta, teollisuus ja tuotanto mukautuvat jatkuvasti erilaisten innovaatioiden ja trendien myötä. Tällä hetkellä kaksi merkittävää trendiä valmistavassa teollisuudessa ovat kestävän kehityksen kasvava merkitys sekä Industry 4.0 -teknologioiden kehittyminen ja vakiintuminen osaksi toimintaa. Nämä kaksi ilmiötä aiheuttavat muutoksia itsenäisesti, mutta yhdessä ne voivat muodostaa synergisen kokonaisuuden ja saada aikaan laajoja uudistuksia ja muutoksia kaikkeen tulevaisuuden teolliseen toimintaan (De Sousa Jabbour et al. 2018). Teollisessa kehityksessä tapahtuva digitaalinen muutos voi tarjota merkittäviä mahdollisuuksia kestävän kehityksen tavoitteiden ja vastuullisen liiketoiminnan edistämiseen. Toisaalta on huomioitava, että digitaalinen muutos voi olla myös uhka kestävälle kehitykselle, mikäli kestävyys tavoitteita ei oteta huolellisesti huomioon Industry 4.0:n implementoinnissa. (Beier et al. 2020)

Kestävä kehitys on ollut ajankohtainen aihe jo vuosia. Maapallon ekologinen kantokyky ei riitä nykyisen kulutuksen, teollisuuden tai tuotannon tarpeisiin, mikä aiheuttaa ympäristön hyvinvoinnin heikkenemistä. Myös eriarvoisuus ja sosiaalisen hyvinvoinnin heikentyminen ovat merkittäviä globaaleja ongelmia, joihin kestävä kehitys tarvitaan. Vuonna 2015 kaikki Yhdistyneiden kansakuntien jäsenmaat sitoutuivat kestävän kehityksen Agenda 2030 -toimintaohjelmaan, jonka tavoitteena on parantaa kokonaisvaltaisesti ihmisten hyvinvointia ja turvata maapallon ympäristöllinen kantokyky nimensä mukaisesti vuoteen 2030 mennessä (United Nations 6.2.2022). Tavoitteeseen pääseminen vaatii laajasti muutoksia ja kehitystä nykyisiin liiketoiminta-, kulutus- ja tuotantotapoihin. Digitalisaatio ja teknologinen kehitys voivat olla merkittäviä edistäviä tekijöitä tarvittavassa muutoksessa: esimerkiksi De Sousa Jabbourin et al. (2018) mukaan Industry 4.0 -teknologioiden myötä kehittyvät uudet käytännöt ja toimintatavat voivat mahdollistaa organisaatioiden täyden kestävän kehityksen potentiaalin.

Industry 4.0 on saanut alkunsa vuonna 2013 Saksassa, jossa se esiteltiin uutena teollistumisen vaiheena ja niin sanottuna neljäntenä teollisena vallankumouksena (Kagermann et al. 2013). Sen ytimessä on fyysisen ja digitaalisen maailman integrointi uusien edistyneempien teknologioiden avulla, joita ovat muun muassa kyberfyysiset järjestelmät (engl. cyber-physical systems) ja teollinen esineiden internet (engl. industrial internet of

things, IIoT) (Ghobakhloo 2018). Industry 4.0 -teknologiat tuovat huomattavia muutoksia nykyisiin liiketoimintatapoihin valmistavassa teollisuudessa, kun olemassa oleviin laitteisiin ja järjestelmiin lisätään älykkäitä ja kehittyneempiä digitaalisia ominaisuuksia. Muutokset voivat edistää kestävästä kehitystä niin makrotasolla uusien liiketoimintamallien kautta kuin mikrotasolla esimerkiksi materiaalin käytön ja energiankulutuksen tehostamisen osilta (Stock et al. 2018).

1.2 Tavoitteet ja tutkimusongelma

Työn tavoitteena on selvittää, miten Industry 4.0 voi edistää kestävästä kehitystä sen kolmessa ulottuvuudessa. Tavoitteen pohjalta saadaan päätutkimuskysymykseksi:

- Miten Industry 4.0:n avulla voidaan edesauttaa kestävästä kehitystä?

Päätutkimuskysymyksen tueksi muodostui myös kaksi apututkimuskysymystä, jotka ovat seuraavat:

- Mitä kestävä kehitys on ja miten se ilmenee valmistavassa teollisuudessa?
- Mikä Industry 4.0 on ja miten se ilmenee osana valmistavaa teollisuutta?

Työssä on tarkoitus tutkia ensin kestävästä kehitystä ja Industry 4.0:aa itsenäisesti ja sitten selvittää, minkälaisen kokonaisuuden ne voivat muodostaa yhdessä sekä minkälaisia mahdollisuuksia Industry 4.0 teknologioineen tuo kestävästä kehityksen lisäämiseen ja edistämiseen. Kestävyyttä edesauttavien vaikutusten lisäksi työssä arvioidaan, onko Industry 4.0:lla merkittäviä kestävästä kehityksen vastaisia vaikutuksia.

1.3 Tutkimusmetodologia

Kandidaatintyö tehdään kirjallisuuskatsauksena ja lähteinä käytetään pääosin vertaisarvioituja artikkeleita tieteellisistä julkaisufoorumeista. Työn keskeiset aihealueet ovat kestävä kehitys, teknologinen kehitys sekä tuotannon ja liiketoiminnan kehittyminen. Käytettävä lähdeaineisto valitaan kyseisten aihealueiden keskeisistä tieteellisistä lehdistä, joista korostuvat Journal of Cleaner Production, Technological Forecasting & Social Change ja International Journal of Production Economics. Yksittäisiä artikkeleita valittiin myös aihealueiden lehdistä Process Safety and Environmental Protection, Sustainability ja Science of the Total Environment. Jotta työn tulosten luotettavuus ja laatu voidaan pitää tasokkaana, valitut julkaisualustat on rajattu sen perusteella, että ne sijoittuvat Julkaisufoorumin tieteellisten julkaisukanavien tasoluokituksessa tasoille 1–3. Työn aiheista etenkin Industry 4.0 on melko uusi ilmiö, minkä vuoksi aiheesta oli saatavilla pääosin

viimeisen 4–5 vuoden aikana julkaistua lähdemateriaalia. Tästä syystä tarkempaa aikarajauksia ei ollut syytä tehdä.

Kirjallisuuskatsauksen tieteellisen aineiston haku tehtiin Scopus ja Web of Science -tietokannoista. Haku suoritettiin englannin kielellä työn aiheesta ja tutkimusongelmista johdetuilla hakusanoilla ja niiden yhdistelmillä. Tulososion lähteistä suurin osa etsittiin hakusanoilla "industry 4.0", "fourth industrial revolution", "sustainable development", "sustainability" ja "sustainable". Haun tuloksia näillä hakusanoilla ja niiden yhdistelmällä on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Tulososion lähdehaku eri rajauksilla

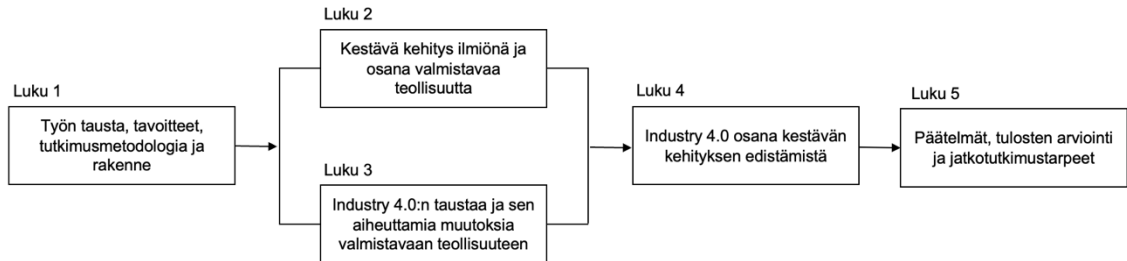
	Scopus	Web of Science
("industry 4.0" OR "fourth industrial revolution") AND ("sustainable development" OR sustainability OR sustainable)	2266	2331
("industry 4.0" OR "fourth industrial revolution") AND ("sustainable development" OR sustainability OR sustainable) + Lisärajausena tason 1-3 valitut tieteelliset lehdet	312	470
("industry 4.0" OR "fourth industrial revolution") AND ("sustainable development" OR sustainability OR sustainable) + Lisärajausena tason 2-3 valitut tieteelliset lehdet	94	96

Saadusta noin 90 lähteen joukosta valittiin työhön lähteitä, jotka käsittelevät Industry 4.0:n vaikutusta kestävään kehitykseen mahdollisimman monipuolisesti, eivätkä keskittyneet esimerkiksi vain yksittäiseen toimialaan tai tiettyyn osaan liiketoiminnan arvoketjusta. Lähteet valittiin arvioimalla julkaisujen otsikoiden ja tiivistelmien vastaavuutta kandidaattityön aiheisiin ja tavoitteisiin.

Tietokantahaun lisäksi valittujen lähteiden omat lähdeluettelot käytiin läpi etsien lisälähteitä. Tätä hakutapaa hyödynnettiin työssä kuitenkin vain muutamia kertoja, ja vain jos alkuperäisen aineiston lähdeluettelosta löytyi työn tutkimusongelmaan täsmällisesti liittyvä lähde. Toisen työn lähdeluettelosta valittujen lähteiden tuli myös olla vertaisarvioituista tieteellisistä lehdistä sekä olla Julkaisuforumin tasoluokituksessa vähintään tasolla 1. Tutkimuksen tulososiossa käytetyt lähteet ovat esitettynä taulukossa 4 kandidaattityön Liitteet -osiossa.

1.4 Työn rakenne

Kandidaatintyö sisältää johdannon lisäksi teoriaosuuden, tulososion sekä päätelmät ja yhteenvedon. Työn rakenne on esitetty kuvassa 1.



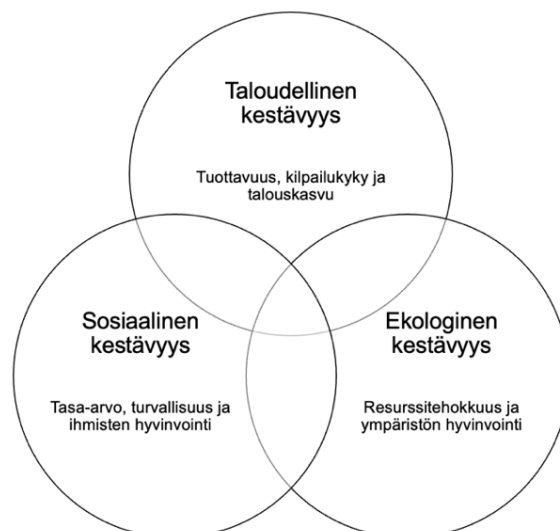
Kuva 1. Kandidaatintyön rakenne

Johdannon jälkeen työssä siirrytään teoriaosuuteen, joka koostuu kahdesta eri luvusta. Ensimmäisessä teorialuvussa käsitellään kestävästä kehityksestä ja sen merkityksestä valmistavassa teollisuudessa. Toisessa teorialuvussa perehdytään Industry 4.0:n määritelmään, teknologioihin ja sen vaikutuksiin teollisuudessa. Teoriaosuuden jälkeen työn tulososiossa selvitetään teoriaosuuden aiheiden yhteyttä. Käsittelyosiossa tutkitaan siis Industry 4.0:n kestävästä kehityksestä edesauttavia vaikutuksia. Viimeisessä luvussa kootaan yhteen työssä tehdyt päähavainnot sekä tehdään johtopäätöksiä tutkimusongelmaan ja -kysymykseen liittyen. Yhteenvetoluvussa arvioidaan myös työn tuloksien merkityksellisyyttä, rajoitteita ja tarpeelliseksi koettuja jatkotutkimusaiheita.

2. KESTÄVÄ KEHITYS JA SEN ILMENEMINEN VALMISTAVASSA TEOLLISUUDESSA

Kestävä kehitys ja sen periaatteet määriteltiin ensimmäisiä kertoja vuonna 1987 olevan muutosta ja kehitystä nykyiseen toimintaan, jonka avulla voidaan varmistaa tämänhetkisten tarpeiden täyttäminen vaarantamatta tulevaisuuden sukupolvien olosuhteita ja tarpeiden täyttymistä (WCED, Gimenez et al. 2012 mukaan). Ilmiölle ei ole muodostunut tarkempaa sovittua määritelmää, minkä takia WCED:n tulkinta esiintyy vieläkin yhtenä yleisimpänä määrittelynä kestäväälle kehitykselle (Eslami et al. 2019).

Kestävän kehityksen kokonaisuus voidaan jakaa kolmeen toisistaan riippuvaiseen, toisiinsa myötävaikuttavaan ja osittain limittaiseen ulottuvuuteen, jotka ovat ekologinen, sosiaalinen ja taloudellinen kestävyys (kuva 2). Gimenezin et al. (2012) mukaan ekologisen kestävyteen liittyy muun muassa jätteiden ja saastuttamisen vähentäminen sekä resurssitehokkuuden kasvattaminen. Ekologisessa kestävydessä on siis kyse ympäristön hyvinvoinnin suojelemista ja sen kantokyvyn puitteissa toimimisesta. Sosiaalisella kestävyydellä tavoitellaan esimerkiksi tasa-arvon sekä ihmisten yleisen elämänlaadun ja hyvinvoinnin edistämistä (Elkington, Gimenez et al. 2012 mukaan). Taloudelliseen kestävyteen voidaan yhdistää esimerkiksi organisaatioiden kilpailukyvyn ylläpitäminen, suorituskykyisemmät ja tehokkaammat toimintatavat sekä yleisesti elämänlaadun parantaminen talouskasvun myötä (Stock et al. 2018).



Kuva 2. Kestävän kehityksen ulottuvuudet ja niiden tarkastelun kohteet (yhdistelty lähteistä Gimenez et al 2012. ja Stock et al. 2018)

Vaikka kestävän kehityksen ulottuvuuksia on kolme, ekologinen kestävyys voi korostua paikoin kahta muuta ulottuvuutta enemmän. Tätä voi selittää esimerkiksi Eslamin et al.

(2019) näkökulma, jonka mukaan ekologinen kestävyys ja siihen liittyvät toimenpiteet voivat olla tarpeeksi tehokas tapa saavuttaa monipuolisesti kestävä kehityksen mukaisia päämääriä. Kirjoittajat siis esittävät, että ekologinen kestävyys voi jo itsessään edustaa kestävä kehitystä.

2.1 Kestävän kehityksen tavoitteet

Kestävään kehitykseen liittyy nykyisin tiiviisti Yhdistyneiden kansakuntien Agenda 2030 -toimintaohjelma, jonka tavoitteena on saavuttaa tasapainoiset olosuhteet kaikissa kestävä kehityksen kolmessa muodossa vuoteen 2030 mennessä (United Nations 6.2.2022). Toimintaohjelman myötä kaikki Yhdistyneiden kansakuntien jäsenvaltiot sitoutuvat edistämään taloudellista, ekologista ja sosiaalista hyvinvointia 17 virallisen kestävä kehityksen tavoitteen ohjaamana. Tavoitteet liittyvät tutkimukseen siten, että ne toimivat kestävä kehityksen päämäärinä niin valtioiden kuin valmistavan teollisuuden organisaatioiden tasolla. Vaikka tavoitteissa voi olla ulottuvuuksien suhteen joitakin päällekkäisyyksiä, ne voidaan ryhmitellä kestävä kehityksen ulottuvuuksien mukaisesti kuvan 3 tavoin. Työn kannalta keskeisimpiä tavoitteita ovat etenkin ne, joihin voidaan suorasti vaikuttaa valmistavan teollisuuden organisaatioiden toiminnan muutosten kautta. Keskeisimmät tavoitteet ovat merkitty kuvaan kursivoilla.

Taloudellinen kestävyys	Ekologinen kestävyys	Sosiaalinen kestävyys
<ul style="list-style-type: none"> • Ei köyhyyttä • <i>Ihmisarvoinen työ ja talouskasvu</i> • <i>Kestävää teollisuutta, innovaatioita ja infrastruktuureja</i> • Eriarvoisuuden vähentäminen • Yhteistyö ja kumppanuus 	<ul style="list-style-type: none"> • Puhdas vesi ja sanitaatio • <i>Edullista ja puhdasta energiaa</i> • Kestävät kaupungit ja yhteisöt • <i>Vastuullista kuluttamista ja tuotantoa</i> • <i>Ilmastoteot</i> • Vedenalainen elämä • Maanpäällinen elämä 	<ul style="list-style-type: none"> • Ei nälkähätää • <i>Terveys ja hyvinvointi</i> • Laadukas koulutus • Sukupuolten tasa-arvo • Rauha, oikeudenmukaisuus ja hyvä hallinto

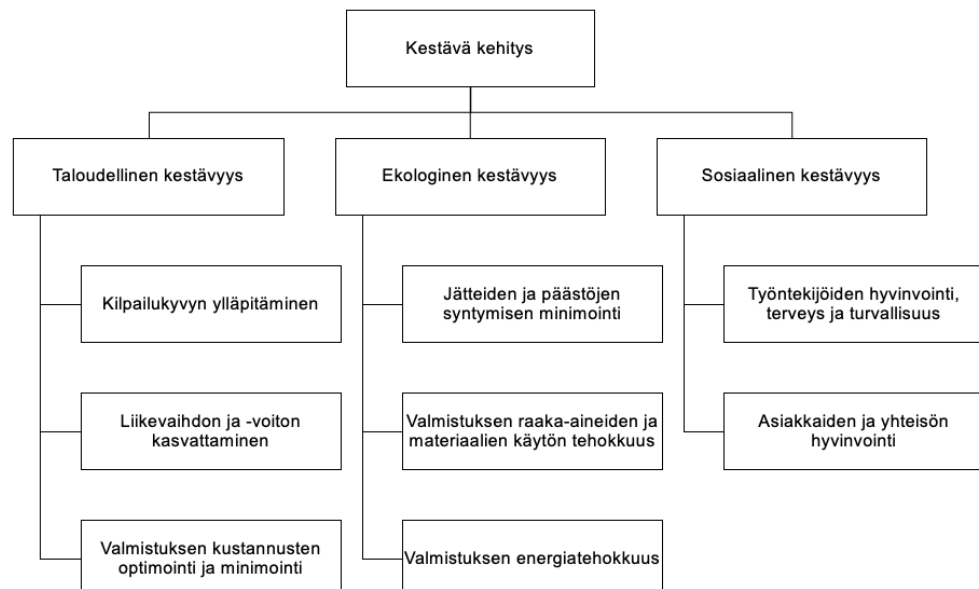
Kuva 3. Kestävän kehityksen tavoitteiden ja kolmen ulottuvuuden yhteys (koottu lähdeä Bai et al. 2020 mukaillen)

Fonseca et al. (2020) esittävät, että toiminnan kokonaisvaltaista kestävä kehitystä tavoiteltaessa on kriittistä arvioida tavoitteiden yhteyksiä toisiinsa. Samanaikainen edistys jokaisen kestävä kehityksen tavoitteen osalta on osittain mahdollista, mutta parannus

tiettyä tavoitetta kohti voi samalla vahvistaa ja heikentää muiden tavoitteiden edistämistä. Esimerkiksi talouden ja teollisuuden kasvu edistävät köyhyyden poistamista, mutta voivat toisaalta hidastaa ekologisten päämäärien saavuttamista. On kuitenkin huomattava, että tavoitteiden välisiä positiivisia vaikutuksia on mahdollisia negatiivisia vaikutuksia enemmän. (Fonseca et al. 2020)

2.2 Kestävä valmistus

Perinteisesti valmistavassa teollisuudessa korostuu taloudellinen kestävyys ja sen kehitys (Stark et al., Bhatt et al. 2020 mukaan). Taloudellisen kestävyuden parantamiseen voidaan yhdistää jo mainitun kilpailukyvyn ylläpitämisen lisäksi esimerkiksi valmistavan toiminnan liikevaihdon- ja voiton kasvattaminen sekä valmistuksen kustannusten optimointi ja minimointi (Eslami et al. 2019). Kestävä valmistus eroaa niin sanotusta perinteisestä valmistuksesta siten, että se ottaa kokonaisvaltaisesti huomioon kaikki kestävä kehityksen eri muodot (Stark et al., Bhatt et al. 2020 mukaan), eli taloudellisen kestävyuden lisäksi huomioidaan myös ekologinen ja sosiaalinen kestävyys. Kestävää kehitystä edistävässä tuotannossa pyritään siis minimoimaan negatiiviset ympäristövaikutukset, käyttämään resursseja säästeliäästi ja tehokkaasti, turvaamaan työntekijöiden ja yhteisöjen olosuhteet sekä toimimaan taloudellisesti kestävällä tavalla (Huang & Badurdeen, Eslami et al. 2019 mukaan). Kestävä kehitys osana valmistavaa teollisuutta on esitettyä kuvassa 4.



Kuva 4. Kestävä kehitys osana valmistavaa teollisuutta (yhdistelty lähteistä Gimeñez et al. 2012, Eslami et al. 2019)

Valmistavan teollisuuden ekologiseen kestävyteen vaikuttavat siis muun muassa tuotannossa käytetyn materiaalin, veden, energian ja muiden raaka-aineiden määrä sekä

tuotannon myötä syntyneet jätteet ja päästöt (Eslami et al. 2019). Tästä voidaan johtaa, että organisaatioiden tulisi minimoida jätteiden ja päästöjen syntyminen sekä tehostaa ja pienentää resurssien käyttöä. Gimenezin et al. (2012) mukaan yritykset voivat parantaa toimintansa ekologista kestävyttä esimerkiksi tehokkaammalla jätehuollolla, paremmilla ympäristönhallintajärjestelmillä sekä suunnittelemalla kokonaisvaltaisesti ympäristöstävällisempiä tuotteita, jotka tarvitsevat vähemmän resursseja ja voidaan valmistaa tehokkaammin.

Sosiaalinen kestävyys on muita kestävyiden muotoja moniulotteisempi ja monimutkaisempi kokonaisuus, eikä sen kokonaisvaltaiselle saavuttamiselle ole yhtä selkeitä päämääriä (Bai et al. 2022). Valmistavan teollisuuden organisaatioiden kontekstissa siihen voidaan kuitenkin yhdistää etenkin työntekijöiden hyvinvoinnin, terveyden ja turvallisuuden edistäminen parempien työolojen kautta (Gimenez et al. 2012; Eslami et al. 2019). On myös huomioitava hyvinvoinnin edesauttaminen niiden yhteisöjen ja asiakkaiden osalta, joihin organisaation toiminnalla on vaikutusta (Eslami et al. 2019). Valmistettavista tuotteista tai valmistusprosesseista ei siis saa tulla hyvinvointia heikentäviä vaikutuksia valmistaville työntekijöille, tuotetta käyttäville asiakkaille tai muille ympäristöön kuuluville henkilöille.

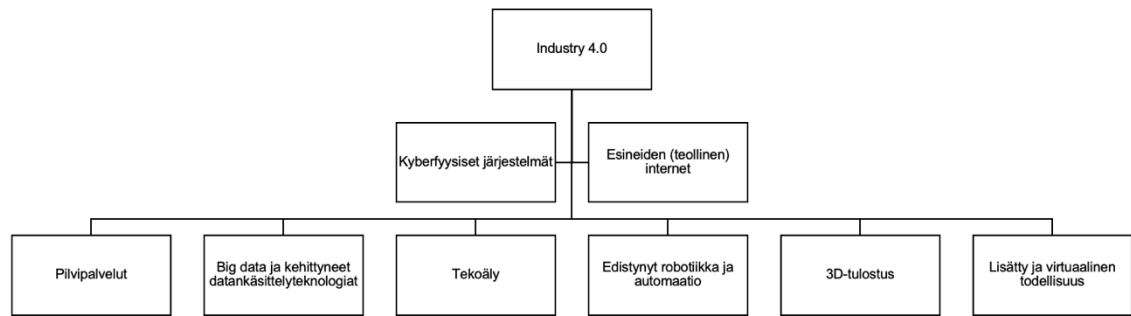
Kestävyiden kolme ulottuvuutta muodostavat yhdessä siis kokonaisuuden, jolla pyritään takaamaan vakaat olosuhteet talouden, ympäristön ja ihmisten hyvinvoinnin suhteen niin nykyhetkessä kuin tulevaisuudessa. Valmistavan teollisuuden kontekstissa kestävä kehitys ilmenee esimerkiksi organisaatioiden taloudellisen tilanteen ylläpitämisenä, resurssien käytön tehostamisena sekä työhyvinvoinnin parantamisella. Työn seuraavassa luvussa siirrytään käsittelemään Industry 4.0:aa tämän luvun tavoin valmistavan teollisuuden näkökulmasta.

3. INDUSTRY 4.0 OSANA VALMISTAVAN TEOLLISUUDEN MUUTOSTA

Teollisuuden kehittymisen voidaan nähdä tapahtuvan tietyissä vaiheissa, joissa on aina edellisen vaiheen pohjalta kehittyneitä edistyneempiä teknologisia tunnuspiirteitä. Teollisuuden historia voidaan jakaa yleisen näkökulman mukaan neljään erilliseen teolliseen vallankumoukseen, joista Industry 4.0 on viimeisin ja tällä hetkellä meneillään oleva (Qin et al., Dalenogare et al. 2018 mukaan). Xu et al. (2018) esittävät ensimmäisen teollisen vallankumouksen alkaneen höyryvoiman kehittämisestä ja käytöstä 1800-luvun alussa. Toisen teollisen vallankumouksen aikana 1800- ja 1900-lukujen vaihteessa sähköenergia ja massatuotanto olivat merkittävimpiä teollisuuden murroksellisia innovaatioita. Kolmas teollinen vallankumous sai alkunsa tieto- ja viestintäteknologian sekä tuotantoautomaation kehittymisestä 1900-luvun puolivälissä. (Xu et al. 2018) Siirtymän neljännenteen teolliseen aikakauteen saivat aikaan esineiden internetin ja kyberfyysisten järjestelmien kehitys ja käyttöönotto 2010-luvulla (Kagermann et al. 2013; Xu et al. 2018). Käsitteenä ”Industry 4.0” esiteltiin alun perin vuonna 2013 Saksassa strategisena teknologiahankkeena, mutta myöhemmin termi on vakiintunut de facto -nimeksi neljännelle teolliselle vallankumoukselle (Xu et al. 2018; Culot et al. 2020).

3.1 Keskeisimmät Industry 4.0 -teknologiat

Industry 4.0 sisältää laajan ja hajanaisen kokonaisuuden erilaisia teknologioita (kuva 5), jotka Xun et al. (2018) mukaan mahdollistavat tehokkaamman ja kilpailukykyisemmän teollisuuden ja teollistumisen vaiheen. Kokonaisuuden merkittävimpiä ydinteknologioita ovat esineiden (teollinen) internet ja kyberfyysiset järjestelmät (Beier et al. 2020). Esineiden internetiä voidaan kuvailla erilaisista internet-teknologioista muodostuvana integroituna rakenteena, jonka kautta fyysiset ja virtuaaliset järjestelmät voivat välittää tietoa toisilleen (Xu et al. 2018). Esineiden internet hyödyntää toiminnassaan esimerkiksi matkaviestinverkkoja, langattomia teollisia verkkoja ja sensoriverkostoja (Beier et al. 2020). Kyberfyysiset järjestelmät ovat eräänlaisia verkostoja ja digitaalisia alustoja, joissa virtuaaliset ja fyysiset esineet sekä tietojärjestelmät vuorovaikuttavat toistensa kanssa internetin ja digitaalisten ympäristöjen kautta (Mondejar et al. 2021). Näissä järjestelmissä systeemit voivat esimerkiksi ohjata toisiaan, tehdä päätöksiä, jakaa tietoa sekä kokonaan toimia autonomisesti (Kagermann et al. 2013).



Kuva 5. Industry 4.0 ja osa siihen kuuluvien teknologioiden muodostamaa kokonaisuutta (yhdistelty lähteistä Xu et al. 2018, Beier et al. 2020, Culot et al. 2020 ja Siltori et al. 2021)

Esineiden internetin ja kyberfyysisien järjestelmien lisäksi myös pilvipalvelut ovat keskeinen Industry 4.0:aa kuvaava teknologia (Culot et al. 2020). Pilvipalvelut voidaan määrittellä esimerkiksi tietojenkäsittelyssä hyödynnettävinä järjestelminä, joiden avulla suurta määrää tietoa voidaan tallentaa ja käsitellä tehokkaasti päätöksenteon tukena (Xu et al. 2018). Keskeisten teknologioiden lisäksi muita Industry 4.0:an liitettäviä teknologioita ovat esimerkiksi pilvivalmistus (engl. cloud manufacturing), muut edistyneemmät datankäsittelyteknologiat, tekoäly, edistynyt robotiikka, 3D-tulostus, lisätty ja virtuaalinen todellisuus sekä big data (Culot et al. 2020; Siltori et al. 2021). Industry 4.0:n kokonaisuuteen kuuluvat teknologiat eivät ole toisistaan irrallisia tai täysin itsenäisesti toimivia, vaan ne toimivat ja kehittyvät useimmiten integroidusti yhdessä. Esimerkiksi pilvipalvelut ja datankäsittelyteknologiat tukevat esineiden internetiä, joka puolestaan on olennainen osa kyberfyysisien järjestelmien toimintaa (Xu et al. 2018).

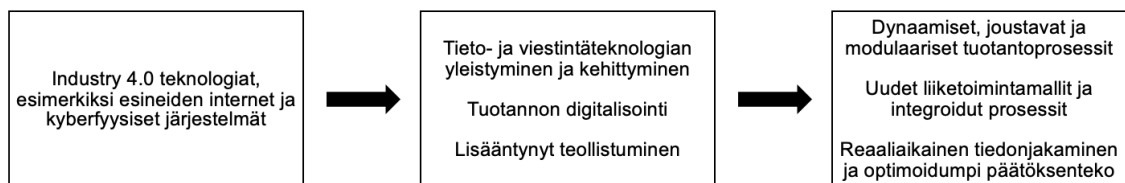
3.2 Industry 4.0:n aiheuttamia liiketoiminnallisia muutoksia

Industry 4.0:n aikaansaama kehitys perustuu systeemien yhteentoimivuuteen, virtualisointiin, hajautettuun ja reaaliaikaiseen tietoon, palveluistumiseen ja modulaarisuuteen (Hermann et al., Siltori et al. 2021 mukaan). Tapahtuva kehitys ja muutos pohjautuvat edistyneempien digitaalisten teknologioiden sisällyttämiseen olemassa oleviin tuotantoympäristöihin. Digitaalisten päivitysten myötä tuotantoympäristöjen koneet ja järjestelmät tulevat olemaan linkitetty toisiinsa ja varusteltu erilaisilla teknologioiden älykkäillä sovelluksilla. (Beier et al. 2020) Älykkyydellä tarkoitetaan työn kontekstissa esimerkiksi laitteiden ja järjestelmien autonomiaa ja interaktiivisuutta.

Industry 4.0:n mahdollistamat muutokset ja päivitykset tulevat lisäämään globaalisti teollistumista, tietotekniikan yleistymistä (engl. informatization) ja koko tuotannon digitalisointia, minkä seurauksena muun muassa organisaatioiden prosessien tehokkuus, kompetenssi ja kilpailukyky lisääntyvät. Teknologioiden monipuolinen kokonaisuus integroi

ja kehittää toiminnan prosesseja niin organisaatioiden sisäisesti kuin niiden välisesti. (Xu et al. 2018) Integraatiota tapahtuu horisontaalisesti koko arvoketjussa sekä vertikaalisesti tuotantojärjestelmissä ja -prosesseissa (Stock & Seliger 2016).

Organisaatioiden toiminta voi kehittyä monilla tavoilla Industry 4.0 -teknologioiden hyödyntämisen myötä. Beier et al. (2020) tunnistavat keskeisiksi kehittyviksi kohteiksi yleisen toiminnan tehokkuuden ja integraation lisääntymisen sekä järjestelmien, ihmisten ja koneiden välisten keskinäisten yhteyksien laajentumisen. Kagermann et al. (2013) esittävät tärkeimmiksi muutoksiksi dynaamisemmat liiketoiminta- ja tuotantoprosessit, tehokkaamman massaräätälöinnin, uudet kilpailukykyisemmät liiketoimintamallit sekä optimoidumman päätöksenteon. Myös prosessien syvällisempi integrointi, reaaliaikainen tiedonjakaminen, tehokkaampi kommunikointi ja verkostoituminen, todellisuuden virtualisointi sekä toiminnan modulaarisuuden ja uudelleenkonfigurointimahdollisuuksien lisääminen ovat Industry 4.0:n keskeisiä vaikutuksia (Dalenogare et al. 2018; Culot et al. 2020; Nižetic et al. 2020). Xun et al. (2018) näkemys yhdistää edellä mainitut muutokset kahteen uuteen teollisuuden osaan, jotka ovat älykkäät tehtaot ja älykäs tuotanto. Industry 4.0:n kokonaisuutta teknologioineen ja valmistavan teollisuuden muutoksineen on havainnollistettuna kuvassa 6.



Kuva 6. Industry 4.0: kokonaisuus osana teollisuuden muutosta (yhdistelty lähteistä Kagermann et al. 2013, Dalenogare et al. 2018, Beier et al. 2020, Culot et al. 2020, Nižetic et al. 2020 ja Siltori et al. 2021)

Alun perin Kagermannin et al. (2013) mukaan Industry 4.0:n oli tarkoitus vaikuttaa pääosin tuotantotoimintaan, mutta Culot et al. (2020) toteavat sen vaikutuksen levinneen selkeästi myös tuotantotoimintaa laajemmalle. Laajat vaikutukset ilmenevät esimerkiksi toimialojen piirteiden muuttumisena, kun perinteisiin tuotteisiin ja palveluihin tuodaan uusia älykkäitä ja teknologisia ominaisuuksia. Myös asiakaskäyttäytyminen tulee muuttumaan asiakkaiden ollessa yksi osa uusia älykkäitä ja digitaalisia systeemejä. (Culot et al. 2020)

Industry 4.0 ja sen monipuolinen kokonaisuus erilaisia teknologioita saavat siis aikaan useita muutoksia organisaatioiden toimintaan valmistavan teollisuuden näkökulmasta. Teknologien myötä tapahtuva lisääntyvä digitalisointi sekä tieto- ja viestintäteknologii-

den edistyminen muokkaavat esimerkiksi valmistuksen prosesseja entistä tehokkaammiksi, mukautumiskykyisemmiksi ja integroiduimmiksi. Nämä ja muut Industry 4.0:n myötä tapahtuvat muutokset voivat mahdollistaa edistystä kestäväen kehityksen tavoitteita kohti, mitä käsitellään seuraavassa luvussa.

4. INDUSTRY 4.0 OSANA KESTÄVÄÄ KEHITYSTÄ

Innovatiiviset ja edistykselliset Industry 4.0 -teknologiat saavat aikaan valmistavassa teollisuudessa laajoja muutoksia, lisäten mahdollisuuksia myös kestävä kehityksen edistämiseen. Tässä luvussa käsitellään Industry 4.0:n yhteyttä kaikkien kestävä kehityksen kolmen ulottuvuuden edistämiseen ja tarkastellaan ulottuvuuksien välistä priorisointia. Keskeisimmät lähteiden pohjalta tehdyt havainnot Industry 4.0:sta kestävä kehityksen edistäjänä ovat esitettyinä seuraavalla sivulla taulukossa 2.

4.1 Taloudellinen kestävyys

Teolliset vallankumoukset vaikuttavat olemassa oleviin teollisuuden prosesseihin ensisijaisesti lisäten niiden suorituskykyä, mikä voidaan yhdistää suoraan taloudellisen kestävyden edistämiseen. Industry 4.0 ja sen muutokset vaikuttavat siis jo luonnostaan kestävä kehityksen taloudelliseen ulottuvuuteen ja tämän seurauksena taloudellisen kestävyden vahvistaminen tapahtuu välittömämmin verrattuna kahteen muuhun kestävyden muotoon (Stock et al. 2018; Ghobakhloo 2020).

Industry 4.0:n myötä kehittyvät modulaarisemmat ja joustavammat tuotantoprosessit kasvattavat toiminnan tehokkuutta ja tuottavuutta, mikä vaikuttaa positiivisesti taloudellisen kestävyden tavoitteisiin (Ghobakhloo 2020). Toinen taloudellista kestävyttä merkittävästi edistävä tekijä on tuotannon ja tuotteiden laadun parantaminen, mikä edesauttaa yritysten kilpailukyvyn ylläpitämistä ja täten taloudellisten olosuhteiden edistämistä (Brozzi et al. 2020; Satyro et al. 2022).

Tieto- ja viestintäteknologian edistyminen, reaaliaikaisen tiedon parempi saatavuus sekä älykkään datan hyödyntäminen edistävät taloudellista kestävyttä mahdollistamalla uusien liiketoimintamallien kehittämisen. Industry 4.0 -teknologioiden avulla yritykset voivat muuttaa toimintatapojaan siirtymällä perinteisestä tuotekeskeisestä myynnistä erilaisten palveluiden, toiminnallisuuksien ja käytettävyyden myyntiin. Tämänkaltaiset liiketoimintamallit ovat perinteisiä tuotekeskeisiä malleja taloudellisesti kestävämpiä, sillä ne vahvistavat yritysten kilpailukykyä enemmän pitkällä aikavälillä. (Stock & Seliger 2016; Stock et al. 2018) Yhden tuotteen myyntikaupan sijasta asiakas saadaan sitoutettua palveluiden kautta yrityksen toimintaan pidemmäksi ajanjaksoksi. Myös Siltori et al. (2021), Ghobakhloo (2020) ja Dalenogare et al. (2018) kuvaavat uusia liiketoimintamalleja yhtenä Industry 4.0:n olennaisimpana kestävyteen liittyvänä mahdollisuutena.

Taulukko 2. Keskeiset havainnot Industry 4.0:sta kestävän kehityksen edistäjänä

	Positiiviset vaikutukset	Lähde
Taloudellinen kestävyys	Tehokkaampi ja tuottavampi tuotanto	Ghobakhloo 2020
	Tuotteiden laadun parantaminen	Brozzi et al. 2020, Satyro et al. 2022
	Uudet kilpailukykyisemmät liiketoimintamallit	Stock & Seliger 2016, Dalenogare et al. 2018, Stock et al. 2018, Ghobakhloo 2020, Siltori et al. 2021
Ekologinen kestävyys	Kestävämpi energiankäyttö	Stock et al. 2018, Nižetić et al. 2020, Mondejar et al. 2021
	Kiertotalouden edistäminen	Nižetić et al. 2020, Bag et al. 2021, Bai et al. 2022
	Parempi resurssitehokkuus ja pienempi resurssitarve	Stock & Seliger 2016, Dalenogare et al. 2018, De Sousa Jabbour et al. 2018, Stock et al. 2018
	Tuotteiden elinkaaren pidentäminen	Stock & Seliger 2016
	Ympäristönsuojelun tehostaminen	Ghobakhloo 2020, Nižetić et al. 2020
	Ympäristöystävällisempien teknologioiden kehitys	Wang et al. 2021
Sosiaalinen kestävyys	Parempi työturvallisuus ja vähemmän työtaturmia	Ghobakhloo 2020, Siltori et al. 2021
	Sujuvampi työ ja korkeampi työmotivaatio	Stock et al. 2018
	Työn kuormittavuuden pienentäminen	Stock et al. 2018, Brozzi et al. 2020, Siltori et al. 2021
	Uudet työpaikat ja rikastetut työnkuvat	Siltori et al. 2021, Ghobakhloo 2020, Stock et al. 2018

Teknologioiden integroiminen osaksi toimintaa voi siis edesauttaa taloudellista kestävyttä monella eri tavalla, mutta Ghobakhloon (2020) mukaan kaikki edut eivät realisoidu yhtäaikaisesti, ja ne ovat riippuvaisia toistensa toteutumisesta. Kriittisiä taloudellisen kestävyden funktioita ovat esimerkiksi modulaarisen ja joustavan tuotannon kehittäminen sekä uudet liiketoimintamallit, sillä niiden saavutus on edellytys muun muassa ja toiminnan paremman kannattavuuden mahdollistamisessa (Ghobakhloo 2020).

Taloudellisen kestävyden onnistunut vahvistaminen mahdollistaa myöhemmin ekologisen ja sosiaalisen kestävyden kehittämisen (Ghobakhloo 2020). Esimerkiksi vielä neljännen teollisen vallankumouksen kehityksen alkuvaiheessa ekologinen kestävyys voi kärsiä merkittävästi uuden digitaalisen infrastruktuurin rakentamisen vuoksi, mutta kehityksen edetessä ja taloudellisen kestävyden vahvistuessa tulee olemaan mahdollista investoida enemmän etenkin ekologisen kestävyden parantamiseen (Ghobakhloo 2020; Cheng et al. 2021). Myöhemmin ekologisen ja sosiaalisen kestävyden vahvistuessa myös taloudellinen kestävyys voi voimistua edelleen. Esimerkiksi resurssien käytön tehostaminen ja vähentäminen alentavat valmistuksen kustannuksia, edistäen suoraan taloudellisia olosuhteita (Gimenez et al. 2012). Tämä kuvastaa selkeästi sitä, miten vahvasti kestävä kehityksen ulottuvuudet ovat yhteydessä toisiinsa.

4.2 Ekologinen kestävyys

Ekologisen kestävyden ylläpitäminen ja edistäminen vaatii paljon korkeatasoista ja koko arvoketjun laajuista tietoa, jonka saatavuutta muun muassa esineiden internet, big data ja pilvipalvelut voivat edistää (Ghobakhloo 2020). Teknologiat parantavat käytettävissä olevan datan laatua (Nižetić et al. 2020), jolloin organisaatioille on mahdollista tehdä tehokkaampaa päätöksentekoa ja toimia ekologisen kestävyden edistämiseksi ja ympäristön suojelemiseksi. Teknologiat mahdollistavat edistysaskelia ekologisen kestävyden suhteen etenkin **energiatehokkuudessa**, **resurssien käytön** tehokkuudessa sekä **kiertotalouden** edistämisessä. Teknologiat voivat ympäristöystävällisempien prosessien kehittämisen lisäksi myös itsessään kehittyä ympäristöystävällisemmäksi ja korjata täten teknologisen kehityksen ekologista kestävyttä (Wang et al. 2021). Chengin et al. (2021) mukaan teknologisen innovaation ylläpitäminen Industry 4.0:n aikana on tärkeää juuri siksi, että niin sanottujen ekoteknologioiden kehittymistä voidaan edistää ja olemassa olevien teknologioiden ympäristöystävällisyyttä lisätä.

Energiatehokkuuden kasvattaminen ja uusiutuvien energianlähteiden saatavuuden ja käytön lisääminen ovat keskeinen osa päästöjen pienentämistä ja ekologisen kestävyysedistämistä (United Nations 2021). Edistyneempien digitaalisten teknologioiden leviäminen ja kehittyminen voi tarjota ratkaisuja näiden molempien edistämiseen (Mondejar et al. 2021). Industry 4.0 -teknologioiden avulla energiatehokkuutta voidaan kasvattaa esimerkiksi perustamalla älykkäitä sähköverkkoja ja älykkäitä rakennuksia, joiden älyominaisuudet tarjoavat muun muassa reaaliaikaista tietoa energiankulutuksesta ja mahdollistavat energiankäytön tehokkaamman säätelyn ja hallinnan (Nižetić et al. 2020). Näiden uusien toiminnallisuuksien avulla voidaan vähentää energianlähteiden liikakulutusta kohdistamalla käyttö vain todellisen tarpeen mukaisesti. Näiden kompleksisten energiajärjestelmien älykäs hallinta (engl. smart management) on toteutettavissa esimerkiksi esineiden internetin mahdollistaman integroidun verkoston avulla (Mondejar et al. 2021). Myös uusiutuvia energianlähteitä voidaan hyödyntää tehokkaammin, sillä joustavampien tuotantoprosessien myötä tuotanto voidaan kohdistaa juuri niihin ajankohtiin, jolloin uusiutuvat energianlähteet syöttävät enemmän energiaa verkkoon (Beier et al., Stock et al. 2018 mukaan). Tällöin tarve fossiilisten energianlähteiden käytölle vähenee ja tuotannosta syntyvät saastuttavat päästöt saadaan minimoitua.

Resurssien kulutuksen vähentäminen ja käytön tehostaminen ovat toinen merkittävä osa tuotannon kestävyysedistämistä. Optimoidumpi ja hajautettu päätöksenteko sekä reaaliaikainen tieto edistävät ekologista kestävyttä, sillä ne voivat parantaa tuotantoprosessien kokonaisvaltaista resurssitehokkuutta (Dalenogare et al. 2018; De Sousa Jabbour et al. 2018; Stock & Seliger 2016). Edellisessä luvussa käsitellyn energiatehokkuuden lisäksi esimerkiksi raaka-aineita, tuotteita ja vettä voidaan siis kohdentaa ja käyttää entistä tuottavammin (Stock & Seliger 2016). Tehokkaammalla käytöllä samasta resurssimäärästä saadaan enemmän hyötyä, eikä käytöstä synny yhtä paljon tarpeetonta jätettä. Lisäksi tarve täysin uudelle materiaalille voi pienentyä.

Teknologioiden myötä rakentuvat integroidut verkostot voivat lisätä myös teollisia symbiooseja organisaatioiden välillä (Stock & Seliger 2016; Stock et al. 2018). Teollisessa symbioosissa organisaatiot jakavat ja uusiokäyttävät toistensa resursseja, sivutuotteita ja jätettä (European Commission 2020). Hyödyntämällä toisten jätteet ja sivutuotteet valmistuksessa uusina resursseina materiaalin käytön tehokkuus lisääntyy, tarve täysin uusille resursseille pienenee ja syntyvän jätteen määrä vähenee.

Industry 4.0:n myötä teollisuudessa tarvittava materiaalin määrä voi vähentyä edellisten lisäksi myös prosessitasolla, sillä uudet dynaamisemmat ja joustavammat tuotantoprosessit parantavat valmistuksen materiaalitehokkuutta. Lisäksi esimerkiksi 3D-tuotantoteknologian avulla voidaan kehittää uusia kevyempiä tuoterakenteita, jotka tarvitsevat

vähemmän resursseja valmistukseensa. (Dalenogare et al. 2018; Stock et al. 2018) Pienentyneen materiaalinkäytön lisäksi 3D-valmistus mahdollistaa myös tuotannon, jossa syntyvä jäte saadaan lähes minimoitua (Stock et al. 2018). Materiaalin käyttöä voidaan vähentää myös luvussa 4.1 mainittujen uusien liiketoimintamallien kautta. Kun yritykset lisäävät aineellisten tuotteiden myynnin ohelle myös toiminnallisuuden tai palveluiden myyntiä, ei konkreettisia tuotteita tarvitse valmistaa niin paljoa ja tuotantoon tarvittava materiaali vähenee. (Stock et al. 2018)

Kiertotalouden periaatteiden implementointi osaksi toimintaa on keskeinen edellytys kestävä tuotannon ja kulutuksen saavuttamisessa (United Nations 2021), ja täten se on merkittävä osa ekologista kestävyttä. Bagin et al. (2021) mukaan suuri osa yrityksistä epäonnistuu ekologisen kestävyden tavoitteiden saavuttamisessa juuri siksi, että yritysten kiertotalouden mukaiset uudelleenvalmistus-, kierrätys- ja uudelleenkäyttöprosessit ovat puutteellisia. Industry 4.0 -teknologioiden laaja implementointi voi mahdollistaa kiertotalouden periaatteiden sisällyttämistä tuotantoon laajemmin ja tekee tuotannosta täten ympäristöystävällisempää (Bag et al. 2021; Bai et al. 2022).

Kiertotaloutta voidaan edistää esimerkiksi erilaisten älykkäämpien ja kestävämpien jätteenkäsittelyjärjestelmien kehittämisen kautta (Nižetić et al. 2020; Bai et al. 2022). Lisäksi Industry 4.0 -teknologioiden myötä tapahtuva verkostojen integrointi edesauttaa tuotteiden elinkaarien uudelleenkiertoa ja sulkemista, jolloin tuotteet pysyvät elinkaaren syklillä pidempään erilaisten uudelleenvalmistuksen ja uudelleenkäytön prosessien avulla. Itse tuotteiden lisäksi myös valmistuksen laitteiston käyttöikä voidaan pidentää päivittämällä ne uudella teknologialla ja liittämällä ne kyberfyysisiin järjestelmiin. (Stock & Seliger 2016) Näin tuotteet ja laitteet voidaan pitää kauemmin käytössä ja tarve kokonaan uuden valmistamiselle sekä resurssien käytölle voi vähentyä merkittävästi.

Kiertotalouden edistäminen on merkittävää etenkin ekologisen kestävyden, mutta myös kokonaisuudessaan kaikkien kestävä kehityksen ulottuvuuksien kannalta, sillä Bain et al. (2022) mukaan yli 80 % Industry 4.0:n aikaansaamista kestävä kehityksen parannuksista johtuu kiertotalouden tehostamisesta. Tutkijat väittävät myös, että kiertotalouden kehittäminen on keskeisin Industry 4.0:n teknologioiden mahdollistama ratkaisu kestävä kehityksen tavoitteiden saavuttamiseen. Kiertotalouden lisääminen voi siis heijastaa myönteisiä vaikutuksia myös niin taloudelliseen kuin sosiaaliseen kestävyteen.

Lukuisten ekologista kestävyttä edistävien muutosten ohella Industry 4.0 -teknologiat voivat saada aikaan ympäristölle myös merkittäviä **negatiivisia vaikutuksia**. Ekologisen kestävyden kuhunkin mainittuun kokonaisuuteen voidaan yhdistää siis niin positiivisia,

kuin negatiivisia vaikutuksia. Edellisten lukujen ja seuraavan kappaleen perusteella negatiivisia ja positiivisia vaikutuksia voidaan vertailla taulukon 3 tavoin.

Taulukko 3. *Ekologisen kestävyyskokonaisuuteen vaikuttavien muutosten vertailua (yhdistelty lähteistä Stock & Seliger 2016, Stock et al. 2018, Nižetić et al. 2020, Wang et al. 202)*

	Positiivinen vaikutus	Negatiivinen vaikutus
Energian käyttö	Parempi energiatehokkuus	Lisääntynyt energiantarve
Kiertotalous	Kiertotalouden prosessien lisääminen ja tehostaminen	Kasvava kierrätyskelvottoman jätteen määrä
Materiaalin käyttö	Resurssitehokkuuden kasvattaminen	Resurssien lisääntyvä tarve ja käyttö

Teknologisen kehityksen myötä etenkin fossiilisten energianlähteiden käytön tarve on lisääntynyt, mikä aiheuttaa ympäristölle merkittäviä haittoja (Wang et al. 2021). Nižetić et al. (2020) tunnistavat edellisen lisäksi kierrätyskelvottoman elektronisen ja metallijätteen lisääntymisen sekä rajallisten raaka-aineiden kasvavan käytön teknologioista aiheutuviksi merkittäviksi ongelmiksi. Stock et al. (2018) kuvailevat teknologioista johtuvan samankaltaisia ongelmia, esimerkiksi huonon kierrätettävyyden ja täten syntyvän jätteen, kasvavan energiankulutuksen sekä raaka-aine- ja materiaalitarpeen lisääntymisen osilta. Raaka-aineiden ja materiaalien kulutus kasvaa Industry 4.0:n myötä muun muassa siksi, että tuotteisiin ja tuotantolaitteistoihin lisätään erilaisia uusia tieto- ja viestintäteknologisia sovelluksia tai lisäosia (Stock et al. 2018). Voidaan siis havaita, että ekologisen kestävyys edistäminen voi jäädä osittain hitaaksi, jos teknologioista johtuvat negatiiviset vaikutukset ovat suurempia kuin positiiviset. Vastakkaisuutta voidaan kuvailla esimerkiksi siten, että toisaalta Industry 4.0 -teknologioiden sovellukset mahdollistavat esimerkiksi kiertotalouden ja jätteenkäsittelyn kehittämistä, mutta toisaalta ne ovat itse vaikeasti kierrätettäviä ja aiheuttavat huomattavasti kierrätyskelvotonta elektronista jätettä.

4.3 Sosiaalinen kestävyys

Sekä Stockin et al. (2018) että Brozzin et al. (2020) mukaan Industry 4.0 -teknologiat voivat tarjota ratkaisuja esimerkiksi työn fyysisen kuorman lieventämiseen ja työergonomian parantamiseen. Siltori et al. (2021) esittävät fyysisen ergonomian kehittämi-

sen lisäksi mahdollisuuden työn psykologisen kuormittavuuden vähentämiseen tehokkaamman työprosessien ja toimintatapojen arvioinnin ja uudistamisen avulla. Industry 4.0:n teknologioiden integrointi osaksi prosesseja voi myös sujuvoittaa ja virtaviivaistaa työnkulkua, mikä edistää työmotivaatiota ja täten työhyvinvointia (Stock et al. 2018). Kehittyvän automaation myötä myös riskit työtaturmista vähenevät vaikuttaen positiivisesti työhyvinvointiin ja sosiaaliseen kestävyYTEEN (Ghobakhloo 2020; Siltori et al. 2021). Muutoksia voi ilmetä myös työllistymisessä, sillä Industry 4.0 voi vähentää toistuvaa ja manuaalista työtä vaativia tehtäviä muun muassa kehittyvän automaation myötä, mikä aiheuttaa negatiivisia vaikutuksia sosiaaliseen kestävyYTEEN (Stock et al. 2018; Nižetić et al. 2020; Siltori et al. 2021). Toisaalta kehittyvien teknologioiden myötä muodostuu tarve uudentilaiselle teknologiselle asiantuntijuudelle, mikä luo teollisuuteen uusia työpaikkoja poistuvien tilalle (Brougham & Haar, Ghobakhloo 2020 mukaan; Siltori et al. 2021). Toistuvien tehtävien vaihtuminen vaativampiin ja vaihtelevampiin rikastaa työntekijöiden työnkuvaa ja voi kasvattaa työtyytyväisyyttä ja -hyvinvointia (Stock et al. 2018). Sosiaalista kestävyYTEttä voi edistää myös ekologisen kestävyYTEEN vahvistamisen kautta. Bain et al. (2022) mukaan Industry 4.0:n teknologioiden monipuolinen integroiminen arvo- ja toimitusketjuihin mahdollistaa kiertotalouden toimintatapojen lisäämistä, mikä ensisijaisesti tukee ekologista kestävyYTEttä, mutta myötävaikuttaa edelleen sosiaaliseen kestävyYTEEN. Kiertotalouden lisäämisellä on suora vaikutus kestäväen kehityksen ekologisiin tavoitteisiin esimerkiksi energiankäytön ja maanpäällisen elämän suojaamisen osalta, jotka puolestaan vaikuttavat ihmisten terveyden ja hyvinvoinnin edistämiseen (Bai et al. 2022). Myös Gimenezin et al. (2012) mukaan ympäristön hyvinvoinnin edistäminen vahvistaa myös sosiaalista hyvinvointia, sillä esimerkiksi saastuttamisen vähentäminen tukee parempien työolojen kehittämistä sekä yhteisöjen elämänlaadun parantamista.

4.4 Ulottuvuuksien priorisointi

Industry 4.0:lla on siis mahdollisuus lisätä valmistavan teollisuuden ekologista ja sosiaalista kestävyYTEttä, mutta Satyro et al. (2022) esittävät tutkimuksessaan, että yritykset näkevät sen ensisijaisena etuna organisaation suorituskyvyn, tuottavuuden ja etenkin kilpailukyvyn parantamisen. Myös Brozzi et al. (2020) mukaan taloudellinen kestävyYTE ja tuloksellisuus ovat yrityksille tärkeämpiä verrattuna etenkin ekologisen kestävyYTEEN strategiaan painoarvoon. Aiheen tärkeydestä huolimatta organisaatiot pitävät kokonaisvaltaista kestäväen kehitystä toissijaisena asiana, kun strategioita kehitetään digitalisaation ja teknologian kehityksen mukana (Siltori et al. 2021). Täten siis voi olla mahdollista, että toissijaisen asemansa takia ekologiseen ja sosiaaliseen kestävyYTEEN liittyvät edut jäävät

realisoitumatta. Satyro et al. (2022) huomauttavat, että ekologisen ja sosiaalisen kestävyiden on siis saavutettava strategisesti yhtä tärkeä asema Industry 4.0:ssa, jotta kestävä kehitys kaikissa sen muodoissa olisi mahdollista saavuttaa. Laajojen muutosten saavuttamiseksi on myös keskeistä, että Industry 4.0 teknologioineen kehittyä kypsyysvaiheeseen, sillä tällä hetkellä vielä varsin kehittyvässä vaiheessa oleva teollisuuden vaihe ei voi saada aikaan mittavaa edistystä kaikissa kestävyiden ulottuvuuksissa (Ghobakhloo 2020).

Beier et al. (2020) esittävät myös toisen syyn ekologisen ja sosiaalisen kestävyiden toissijaisuuteen taloudelliseen kestävyteen verrattuna. Industry 4.0 on pikemminkin digitaalinen päivitys vakiintuneisiin toimintatapoihin, kuin murroksellinen ja teollisuuden toimintaa täysin uudistava ilmiö. Sen tavoitteet seuraavat oletetusti tavallista teollisuuden kehityspolkua, eivätkä ne tarjoa merkittäviä mahdollisuuksia kestävä kehityksen huomiointille. Tästä syystä kokonaisvaltaisen kestävä teollistumisen (engl. sustainable industrialization) saavuttaminen juuri Industry 4.0:n myötä voi olla epätodennäköistä. (Beier et al. 2020)

5. PÄÄTELMÄT

Luvun ensimmäisessä alaluvussa kootaan koko tutkimuksen tulokset yhdeksi yhteiseksi kokonaisuudeksi ja vastataan johdantoluvussa asetettuihin tutkimuskysymyksiin. Toisessa alaluvussa arvioidaan tutkimuksen tulosten laatua, merkitystä sekä rajoitteita käytetyn aineiston perusteella. Viimeisessä alaluvussa arvioidaan työn tulosten pohjalta mahdollisia jatkotutkimustarpeita.

5.1 Työn päätulokset

Kestävän kehityksen osalta ensimmäisessä teorialuvussa oli tavoitteena lisätä ymmärrystä siitä, mitä kestävä kehitys on ja miten se ilmenee valmistavassa teollisuudessa. Kestävä kehitys on lyhyesti toiminnan kehittämistä ja muuttamista siten, että niin nykyhetken kuin tulevaisuuden tarpeisiin voidaan varmistaa hyvät olosuhteet ja riittävät resurssit. Toiminnan muutosta ohjaavat nykyään esimerkiksi YK:n asettamat kestävä kehityksen tavoitteet. Kestävän kehityksen kokonaisuus voidaan jakaa kolmeen ulottuvuuteen, jotka ovat taloudellinen, ekologinen ja sosiaalinen kestävyys. Taloudellisessa ulottuvuudessa tavoitellaan valmistavan teollisuuden yhteydessä etenkin talouskasvua ja kilpailukyvyn ylläpitämistä kestävämmillä liiketoimintamalleilla. Ekologinen kestävyys puolestaan painottuu ympäristön ja luonnon hyvinvointiin, johon valmistuksessa voidaan vaikuttaa esimerkiksi jätteiden ja päästöjen minimoimisella, sekä valmistuksen kokonaisvaltaisella resurssitehokkuudella. Sosiaalisessa kestävydessä korostuu ihminen ja sen hyvinvointi, ja sitä voi edistää teollisuudessa esimerkiksi parantamalla työntekijöiden, asiakkaiden sekä yhteisön terveyttä ja turvallisuutta. Kestävän kehityksen ulottuvuuksia ja tavoitteita tarkastellessa on keskeistä ymmärtää, että ne eivät ole toisistaan irrallisia, vaan limittäisiä ja toisiansa vahvasti myötävaikuttavia.

Toisessa teorialuvussa pyrittiin vastaamaan apututkimuskysymykseen Industry 4.0:sta ja esittämään, mikä ilmiö on ja miten se ilmenee osana liiketoimintaa ja valmistavaa teollisuutta. Industry 4.0 on vakiintunut termi 2010-luvulla alkaneelle niin sanotulle neljännelle teolliselle vallankumoukselle, jonka myötä liiketoimintaan ja valmistavaan teollisuuteen ilmaantuu uusia edistyneempiä ja kehittyviä teknologioita, kuten esineiden internet ja kyberfysiset järjestelmät. Sen teknologioiden kokonaisuus muuttaa valmistavan teollisuuden luonnetta merkittävästi, esimerkiksi kehittämällä nykyisiä liiketoiminta- ja tuotantoprosesseja dynaamisimmaksi, integroidummiksi ja joustavimmiksi, mahdollistamalla uusia kilpailukykyisiä liiketoimintamalleja sekä tehostamalla tiedonkulkua ja päätöksentekoa.

Työn neljännessä luvussa käsiteltiin kestävän kehityksen ja Industry 4.0:n synergististä vuorovaikutussuhdetta tavoitteena selvittää, miten Industry 4.0 voi edistää kestävästä kehitystä. Lähteiden perusteella havaittiin, että Industry 4.0:lla voi olla hyödyllisiä vaikutuksia jokaiseen kestävästä kehityksen ulottuvuuteen. Etenkin taloudellinen kestävyys vahvistuu merkittävästi, sillä edistyksellisempien teknologioiden myötä valmistavan teollisuuden toimintaprosessit ja -tavat kehittyvät entistä suorituskykyisemmäksi, vaikuttaen suorasti taloudellisen kestävyuden edistämiseen. Lisäksi esimerkiksi uudet liiketoimintamallit ja tehokkaampi tuotanto vahvistavat organisaatioiden kilpailukykyä ja täten taloudellista kestävyttä. Teknologinen kehitys tuo mahdollisuuksia myös ekologisen kestävyuden kehittämiseen etenkin energiatehokkuuden, materiaalin käytön ja jätteenkäsitteilyn kannalta. Industry 4.0 -teknologioiden avulla voidaan kehittää esimerkiksi älykkäitä energijärjestelmiä ja tehokkaampia kiertotalousprosesseja. Monien mahdollisuuksien ohella etenkin ekologista kestävyttä käsitellessä on huomioitava teknologian hyödyntämisen potentiaaliset haitat, joita ovat muun muassa lisääntynyt resurssitarve niin raaka-aineiden kuin energian osalta sekä syntyvän teknologisen jätteen määrä ja huono kierrätettävyys. Industry 4.0 tarjoaa sosiaaliseen kestävyteen edistyksiä esimerkiksi vähentämällä valmistavan työn fyysistä ja psyykkistä kuormittavuutta sekä parantamalla työturvallisuutta. On todennäköistä, että teknologisen kehityksen myötä toistuvat ja automaatiolla korvattavat työt vähenevät, mutta toisaalta kehitys luo myös tarvetta uudelle asiantuntijuudelle, jolloin negatiiviset ja positiiviset sosiaaliset vaikutukset osittain tasaa- vat toisensa.

Ominaista näille erilaisille mahdollisuuksille ja edistysaskelille on se, että kehitys yhtä kestävyuden ulottuvuutta tai tavoitetta kohti voi myötävaikuttaa myös toiseen ulottuvuuteen tai tavoitteeseen. Etenkin taloudellisen kestävyuden vahvistaminen voi parantaa organisaatioiden kykyä edistää ekologista ja sosiaalista kestävyttä. Lisäksi esimerkiksi ekologisen kestävyuden edistäminen vaikuttaa takaisin taloudelliseen kestävyteen, kun tehokkaammasta resurssikäytöstä saadaan kustannusetuja. Ekologinen kestävyys vaikuttaa myös vahvasti sosiaaliseen kestävyteen, sillä ympäristön hyvinvoinnin edistäminen edistää samalla myös ympäristössä toimivien ihmisten hyvinvointia.

Edellisten kappaleiden lisäksi työn tuloksia ovat koottu kuvaan 8. Kuvassa on esitettyjä vastauksia niin apututkimuskysymyksiin kuin työn päätutkimuskysymykseen.

Apututkimuskysymys 1: Mitä kestävä kehitys on ja miten se ilmenee valmistavassa teollisuudessa?	Apututkimuskysymys 2: Mikä Industry 4.0 on ja miten se ilmenee osana valmistavaa teollisuutta?	Päätutkimuskysymys: Miten Industry 4.0:n avulla voidaan edesauttaa kestävä kehitystä?
<ul style="list-style-type: none"> • Taloudellinen kestävyys • Valmistavan toiminnan kilpailukyyn vahvistaminen ja talouskasvu • Ekologinen kestävyys • Ympäristönystävällinen valmistus: saastuttamisen vähentäminen ja resurssitehokkuus • Sosiaalinen kestävyys • Työntekijöiden hyvinvointi 	<ul style="list-style-type: none"> • Neljäs teollinen vallankumous, edistysellinen digitaalinen päivitys nykyisiin toimintatapoihin • Fyysisen ja digitaalisen maailman integrointi esimerkiksi esineiden internetin kautta • Uudet liiketoimintamallit, dynaamisemmat tuotantoprosessit ja tehokkaampi tiedonkulku 	<ul style="list-style-type: none"> • Painotetusti taloudellisen kestävyuden edistäminen uusien liiketoimintamallien ja suorituskykyisempien tuotantoprosessien avulla • Ekologisen kestävyuden edistäminen resurssitehokkuus- ja kiertotalousratkaisulla • Sosiaalisen kestävyuden edistäminen työn kuormittavuuden lieventämisellä ja uusilla työmahdollisuuksilla

Kuva 7. Yhteenveto työn tutkimuskysymysten vastauksista

Kuvan tavoitteena on vastata työn tutkimuskysymyksiin tiivistetyssä ja pelkistetyssä muodossa. Kuva esittelee siis vain työn päähavainnot, eikä tuo esiin kaikkia työssä esitettyjä tuloksia kysymyksiin liittyen.

5.2 Tulosten merkityksellisyys, arviointi ja rajoitteet

Työssä käsitellään kahta aihetta, jotka ovat jo itsenäisesti todella laajoja kokonaisuuksia. Aiheiden laajuus aiheutti työn edetessä ajoittain hankaluuksia etenkin tutkimuksen toteuttamisen suhteen, sillä molemmista aiheista löytyy todella laajasti ja monipuolisesti tietoa. Työhön tehtiin rajauksia vielä melko pitkällä kirjoitusvaiheessa, jotta tutkimuskysymykset sekä työhön hyödynnettävä aineisto saatiin rajattua huolellisesti. Tulokset rajautuivat keskittymään valmistavaan teollisuuteen ja edelleen tarkemmin tuotannon näkökulmaan. Tämä rajaus syntyi luonnollisesti, sillä Industry 4.0 on pohjimmiltaan teollisuutta ja tuotantotoimintaa muuttava trendi. Kestävän kehityksen tarkastelu sovitettiin myös valitun aihekehyksen mukaisesti. Työn rajaus on onnistunut, sillä se ei ole liian suppea ja mahdollistaa kestävä kehityksen, Industry 4.0:n ja näiden muodostaman kokonaisuuden monipuolisen ja kattavan tarkastelun. Työssä vastataan valitun aineiston avulla tuloksellisesti ja onnistuneesti alussa asetettuihin apututkimuskysymyksiin ja päätutkimuskysymykseen. Saadut tulokset ovat myös laadukkaita, sillä työssä käytettiin tasokkaita ja vertaisarvioituja artikkeleita.

Tutkimuksessa käytetyssä kirjallisuudessa ekologinen kestävyys korostuu muita kestävä kehityksen ulottuvuuksia enemmän, joten myös työn tulokset keskittyvät päätutkimuskysymyksen osalta painotetusti ekologiseen kestävyteen. Ekologisen kestävyden painottuminen voi selittyä sillä, että sitä voidaan pitää jo itsessään kestävä kehitystä kattavasti edustavana kokonaisuutena. Kestävyden ulottuvuuksista etenkin sosiaalisen kestävyden käsittely jäi merkittävästi ekologista kestävyttä suppeammaksi ja täten tulokset ovat rajoittuneita etenkin sosiaalisen kestävyden osilta. Myös taloudellisen kestävyden tarkastelu oli lähteissä rajoittuneempaa, mutta tätä selittää se, että Industry 4.0:n teknologiat ovat alkujaankin kehitetty tavoitteena muuttaa teollisuutta taloudellisesti tehokkaammaksi ja tuottavammaksi. Tästä syystä vaikutuksia taloudelliseen kestävyteen ei ole syytä arvioida samalla laajuudella kuin ekologisia ja sosiaalisia vaikutuksia.

Tutkimuksessa saadut tulokset ovat merkittäviä, koska ne muodostavat yhteyden kahden keskeisen teollisuuden trendin, kestävä kehityksen ja Industry 4.0:n, välille. Tulokset tarjoavat näkökulman siihen, minkälaisia edistysaskelia valmistavan teollisuuden organisaatioissa olisi mahdollista saavuttaa, kun trendit osataan integroida onnistuneesti yhteen. Työ lisää siis teollisuuden organisaatioille ymmärrystä siitä, minkälaisia mahdollisuuksia Industry 4.0:n uusilla ja edistyneemmillä teknologioilla on potentiaalia tarjota liiketoiminnan kestävämmän kehityksen suhteen. Työ voi myös kannustaa organisaatioita edistämään omaa teknologista osaamistaan ja lisäämään digitaalisia sovelluksia omiin tuotanto- ja liiketoimintaympäristöihin kestävyystavoitteisiin pyrkiessä. Toisaalta tutkimus tarjoaa näkymän tämänhetkiseen kirjallisuuteen ja siihen, miten kirjallisuudessa käsitellään näiden kahden trendin synergististä kokonaisuutta. Ekologisen kestävyden painottuminen työn tuloksissa voi edistää tulevien tutkimusten painotusten muutosta esimerkiksi sosiaalisen kestävyden perusteellisemmaksi tutkimukseksi.

5.3 Jatkotutkimus

Kestävä kehitys ja Industry 4.0 voivat muodostaa yhdessä toisiaan vahvistavan synergisen kokonaisuuden, mutta eräs merkittävä ongelma tämän saavuttamisessa on se, että aiheita ei nähdä strategisesti yhtä tärkeinä teemoina. Tällöin niiden yhteistä potentiaalia ei tule täysin hyödynnettyä. Tästä johtuen tulisi tutkia, miten kokonaisvaltainen kestävä kehitys saataisiin integroitua ja implementoitua yhtä tärkeäksi osaksi yrityksen strategia tavoitteita ja toimintaa kuin teknologinen kehitys.

Koska Industry 4.0 on vielä melko uusi teollinen muutosvaihe, sen pitkäaikaiset, etenkin negatiiviset seuraukset eivät ole vielä tiedossa. Teknologiat voivat esimerkiksi tarjota ratkaisuja energiatehokkuuden, materiaalitehokkuuden ja kierrättämisen tehostamiseen, mutta kokonaisvaltainen ekologisen kestävyden saavuttaminen voi jäädä vajaaksi, sillä

teknologiat esimerkiksi itsessään kuluttavat paljon resursseja ja ovat vaikeasti kierrätettävissä. Tästä syystä ennen kaikkea teknologioiden aiheuttamia negatiivisia vaikutuksia tulisi tutkia tarkemmin, jotta niitä osattaisiin hallita paremmin sekä kehittää ratkaisuja niiden minimoimiseksi. Tutkimus voisi keskittyä lisäksi myös siihen, mitkä Industry 4.0 -teknologiat aiheuttavat suurimman osuuden kestävästä kehitystä vastustavista vaikutuksista. Tällöin juuri näiden tiettyjen teknologioiden kestävyteen voitaisiin panostaa enemmän niiden kehittämisessä.

LÄHTEET

Bai, C., Dallasega, P., Orzes, G. & Sarkis, J. (2020). Industry 4.0 technologies assessment: A sustainability perspective. *International Journal of Production Economics*. Vol.229, pp. 1–15.

Bai, C., Orzes, G. & Sarkis, J. (2022). Exploring the impact of Industry 4.0 technologies on social sustainability through a circular economy approach. *Industrial Marketing Management*. Vol.101, pp. 176-190.

Bag, S., Gupta, S. & Kumar, S. (2021). Industry 4.0 adoption and 10R advance manufacturing capabilities for sustainable development. *International Journal of Production Economics*. Vol.231, pp. 1–12.

Beier, G., Ullrich, A., Reißig, M. & Habich, M. (2020). Industry 4.0: How it is defined from a sociotechnical perspective and how much sustainability it includes – A literature review. *Journal of Cleaner Production*. Vol.259, pp. 1–13.

Bhatt, Y., Ghuman, K. & Dhir, A. (2020). Sustainable manufacturing. Bibliometrics and content analysis. *Journal of Cleaner Production*. Vol.260, pp. 1–17.

Brozzi, R., Forti, D., Rauch, E. & Matt, D.T. (2020). The Advantages of Industry 4.0 applications for sustainability: Results from a sample of manufacturing companies. *Sustainability*. Vol.12(9), pp. 1–19.

Cheng, Y., Awan, U., Ahmad, S. & Tan, Z. (2021). How do technological innovation and fiscal decentralization affect the environment? A story of the fourth industrial revolution and sustainable growth. *Technological Forecasting and Social Change*. Vol.162, pp. 1–6.

Culot, G., Nassimbeni, G., Orzes, G. & Sartor, M. (2020). Behind the definition of Industry 4.0: Analysis and open questions. *International Journal of Production Economics*. Vol.226, pp. 1–15.

Dalenogare, L.S., Benitez, G.B., Ayala, N.F. & Frank, A.G. (2018). The expected contribution of Industry 4.0 technologies for industrial performance. *International Journal of Production Economics*. Vol.204, pp. 383–394.

De Sousa Jabbour, A.B.L., Jabbour, C.J., Foropon, C. & Filho, M.G. (2018). When titans meet – Can Industry 4.0 revolutionise the environmentally-sustainable manufacturing wave? The role of critical success factors. *Technological Forecasting and Social Change*. Vol.132, pp. 18–25.

Eslami, Y., Dassisti, M., Lezoche, M. & Panetto, H. (2019). A survey on sustainability in manufacturing organisations: dimensions and future insights. *International Journal of Production Research*. Vol.57(15-16), pp. 5194-5214.

European Commission. (2020). Making Industrial Symbiosis 'Business as Usual' for Europe's Circular Economy. Saatavilla (viitattu 3.3.2022): https://ec.europa.eu/environment/ecoap/about-eco-innovation/experts-interviews/making-industrial-symbiosis-business-usual-europes-circular_en

Fonseca, M., Domingues, J. & Dima, A. (2020). Mapping the Sustainable Development Goals Relationships. *Sustainability*. Vol.12(8)

Gimenez, C., Sierra, V. & Rodon, J. (2012). Sustainable operations: Their impact on the triple bottom line. *International Journal of Production Economics*. Vol.140(1), pp. 149–159.

Ghobakhloo, M. (2018). The future of manufacturing industry: a strategic roadmap toward Industry 4.0. *Journal of Manufacturing Technology Management*. Vol.29(6), pp. 910–936.

Ghobakhloo, M. (2020). Industry 4.0, digitization, and opportunities for sustainability. *Journal of Cleaner Production*. Vol.252, pp. 1–21.

Kagermann, H., Wahlster, W. & Helbig, J. (2013). Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0. Final report of the Industrie 4.0 Working Group.

Mondejar, M.E., Avtar, R., Diaz, H., Dubey, R., Esteban, J., Gómez-Morales, A., Hallam, B., Mbungu, N., Okolo, C., Prasad, K., She, Q. & Garcia-Segura, S. (2021). Digitalization to achieve sustainable development goals: Step towards a Smart Green Planet. *Science of the Total Environment*. Vol.794, pp. 1–20.

Nižetić, S., Šolić, P., López-de-Ipiña González-de-Artaza, D. & Patrono, L. (2020). Internet of Things (IoT): Opportunities, issues and challenges towards a smart and sustainable future. *Journal of Cleaner Production*. Vol.274, pp. 1–32.

Satyro, W., Almeida, C., Pinto Jr, M., Contador, J., Giannetti, B., de Lima, A. & Fragomeni, M. (2022). Industry 4.0 implementation: The relevance of sustainability and the potential social impact in a developing country. *Journal of Cleaner Production*. Vol.337, pp. 1–9.

Siltori, P.F.S., Anholon, R., Rampasso, I.S., Quelhas, O.L.G., Santa-Eulalia, L.A. & Filho, W.L. (2021). Industry 4.0 and corporate sustainability: An exploratory analysis

of possible impacts in the Brazilian context. *Technological Forecasting & Social Change*. Vol.167, pp. 1–9.

Stock, T. & Seliger, G. (2016). Opportunities of Sustainable Manufacturing in Industry 4.0. *Procedia CIRP*. 13th Global Conference on Sustainable Manufacturing, GCSM 2015. Binh Du'ong New City. 16-18.9.2015. Vol.40, pp.536–541.

Stock, T., Obenaus, M., Kunz, S. & Kohl, H. (2018). Industry 4.0 as enabler for a sustainable development: A qualitative assessment of its ecological and social potential. *Process Safety and Environmental Protection*. Vol.118, pp. 254–267.

United Nations. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 6.2.2022): <https://sdgs.un.org/2030agenda#:~:text=We%20resolve%2C%20between%20now%20and,protection%20of%20the%20planet%20and>

United Nations. The Sustainable Development Goals Report 2021. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 3.4.2022): <https://unstats.un.org/sdgs/report/2021>

Wang, K., Umar, M., Akram, R. & Caglar, E. (2021). Is technological innovation making world “Greener”? An evidence from changing growth story of China. *Technological Forecasting & Social Change*. Vol.165, pp. 1–7.

Xu, L.D., Xu, E.L. & Li, L. (2018). Industry 4.0: state of art and future trends. *International Journal of Production Research*. Vol.56(8), pp. 2941–2962.

LIITE A: TULOSOSION AINEISTO

Taulukko 4. Tulososiossa käytetty aineisto aakkosjärjestyksessä kirjoittajien mukaan

Kirjoittaja(t) ja julkaisuvuosi	Otsikko	Journaali	Viittausten lukumäärä Scopuksessa 5.4.2022	Viittausten lukumäärä kandidaatintyössä	Journaalin taso
Bag et al. 2021	Industry 4.0 adoption and 10R advance manufacturing capabilities for sustainable development	International Journal of Production Economics	91	2	2
Bai et al. 2022	Exploring the impact of Industry 4.0 technologies on social sustainability through a circular economy approach	Industrial Marketing Management	0	5	2
Beier et al. 2020	Industry 4.0: How it is defined from a sociotechnical perspective and how much sustainability it includes - A literature review.	Journal of Cleaner Production	115	2	2
Brozzi et al. 2020	The advantages of Industry 4.0 applications for sustainability: Results from a sample of manufacturing companies	Sustainability	46	3	1
Cheng et al. 2021	How do technological innovation and fiscal decentralization affect the environment? A story of the fourth industrial revolution and sustainable growth	Technological Forecasting & Social Change	88	3	3
Dalenogare et al. 2018	The expected contribution of Industry 4.0 technologies for industrial performance	International Journal of Production Economics	496	3	2
De Sousa Jabbour et al. 2018	When titans meet - Can industry 4.0 revolutionize the environmentally-sustainable manufacturing wave? The role of critical success factors	Technological Forecasting & Social Change	312	1	3

Ghobakhloo 2020	Industry 4.0, digitization, and opportunities for sustainability	Journal of Cleaner Production	234	11	2
Gimenez et al. 2012	Sustainable operations: Their impact on the triple bottom line	International Journal of Production Economics	506	2	2
Mondejar et al. 2021	Digitalization to achieve sustainable development goals: Step towards a Smart Green Planet	Science of the Total Environment	25	2	2
Nižetic et al. 2020	Internet of Things (IoT): opportunities, issues and challenges towards a smart and sustainable future	Journal of Cleaner Production	106	5	2
Satyro et al. 2022	Industry 4.0 implementation: The relevance of sustainability and the potential social impact in a developing country	Journal of Cleaner Production	0	3	2
Siltori et al. 2021	Industry 4.0 and corporate sustainability: An exploratory analysis of possible impacts in the Brazilian context	Technological Forecasting & Social Change	5	6	3
Stock & Seliger 2016	Opportunities of Sustainable Manufacturing in Industry 4.0	Procedia CIRP	863	6	1
Stock et al. 2018	Industry 4.0 as enabler for a sustainable development: A qualitative assessment of its ecological and social potential.	Process Safety and Environmental Protection	173	13	1
Wang et al. 2021	Is technological innovation making world "Greener"? An evidence from changing growth story of China	Technological Forecasting & Social Change	59	2	3