

Juhana Lehtinen

TEOLLISUUS 4.0 EKOLOGISESSA TUO- TANNOSSA

Kandidaatintyö
Johtamisen ja talouden tiedekunta
Tarkastaja: Ulla Saari
Ohjaaja: Arho Suominen
Toukokuu 2023

TIIVISTELMÄ

Juhana Lehtinen: Teollisuus 4.0 ekologisessa tuotannossa
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Tuotantotalouden tutkinto-ohjelma
Toukokuu 2023

Teollisuus 4.0:lla kuvataan neljättä teollista vallankumousta, eli tarkemmin erilaisia 2010-luvulla kehittyneitä digitaalisia innovaatioita, joita voidaan hyödyntää tuotantolaitosten modernisoinnissa. Sen tärkein vaikutus näkyy lisääntyneenä tuottavuutena, mutta sen teknologioita voidaan hyödyntää organisaation tavoitteiden mukaan muihinkin toimiin, kuten ekologisesti kestävä tuotannon harjoittamiseen.

Tässä kandidaatintyössä tutkitaan Teollisuus 4.0:n mukana tulleiden teknologioiden vaikutusta moderniin tuotantoon, erityisesti tuotannon ekologiseen kestävyys. Työssä tarkastellaan kolmen teknologian ympäristövaikutuksia tarkemmin: nämä teknologiat ovat esineiden internet (engl. Internet of Things, IoT), tekoäly sekä digitaalinen kaksonen. Tavoitteena on luoda kirjallisuuskatsauksen avulla kokonaiskäsitys näiden teknologioiden ekologisista vaikutuksista nykypäivän tuotannossa.

Työ alkaa johdantoluvusta, jossa esitellään työn tavoitteet, suoritustavat ja motivoidaan aihe. Tämän jälkeen siirrytään teoriaosuuteen, jonka tavoitteena on määritellä työn keskeisimmät käsitteet ja teemat, kuten tarkasteltavat teknologiat, Teollisuus 4.0 sekä kestävä tuotannon konsepti. Teoriaosuuden jälkeen teknologioiden ekologisuudellisia vaikutuksia avataan tulososiossa. Lopuksi päätelmissä koko työ nivotaan eheäksi kokonaisuudeksi, jossa tuodaan yhteen tulososion tärkeimmät havainnot ja pohditaan teknologioiden välisiä yhteyksiä.

Työ osoittaa, että Teollisuus 4.0:n teknologioilla on ollut merkittävä vaikutus tuotannon ekologisuudelle. Esitellyillä teknologioilla saavutetaan erilaisia ympäristövaikutuksia riippuen niiden toimintatavoista ja rooleista modernissa tuotannossa. Esineiden internet, tekoäly sekä digitaalinen kaksonen ovat avainroolissa Teollisuus 4.0:n käytännön sovelluksissa. Teollisuus 4.0:n teknologioiden innovatiivisia käyttötapoja ilmenee koko ajan lisää teknologioiden kypsyessä, joten uusia tapoja harjoittaa kestävä tuotanto niiden avulla tullaan vielä kehittämään.

Avainsanat: Teollisuus 4.0, ekologisuus, kestävyys, esineiden internet (IoT), digitaalinen kaksonen, tekoäly, älytehtaat

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ALKUSANAT

Tämä kandidaatintyö on tehty keväällä 2023 osaksi Tuotantotalouden koulutusohjelmaa. Aihevalinnan tein omien mielenkiinnonkohtieni mukaisesti, ja mielekkään aiheen vuoksi työn suorittaminen sujui ongelmitta.

Haluaisin kiittää ystäviäni, joiden rakentavalla ja informatiivisella tuella oli merkittävä positiivinen vaikutus kirjoittamisprosessiini.

Tampereella, 7.5.2023

Juhana Lehtinen

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
1.1 Aiheen motivointi ja ajankohtaisuus	1
1.2 Aiheen rajaus ja tutkimuskysymykset.....	1
1.3 Työn toteutus	2
2. TEOLLISUUS 4.0, EKOLOGINEN TUOTANTO & TARKASTELTAVAT TEKNOLOGIAT	4
2.1 Teollisuus 4.0:n historia	4
2.2 Ekologinen tuotanto	4
2.3 Esineiden Internet (IoT).....	5
2.3.1 Teollinen Esineiden Internet.....	6
2.4 Tekoäly	7
2.5 Digitaalinen kaksonen	7
3. TEOLLISUUS 4.0:N MERKITYS TUOTANNON EKOLOGISUUDESSA.....	8
3.1 Teollisuus 4.0 ja kestävä tuotanto	8
3.2 IoT tuotantolaitosten ekologisuudessa	10
3.3 Tekoäly tuotantolaitosten ekologisuudessa	11
3.4 Digitaalinen kaksonen tuotantolaitosten ekologisuudessa	12
4. PÄÄTELMÄT	14
LÄHTEET	16

1. JOHDANTO

1.1 Aiheen motivointi ja ajankohtaisuus

Neljäs teollinen vallankumous, tuttavallisemmin Teollisuus 4.0, on saavuttanut merkittävän aseman nykyajan tuotannossa. Tuotantolaitokset, tuotteet sekä palvelut ovat muuttuneet uusien teknologioiden vuoksi älykkäämmiksi, ja uusia toimintaympäristöä mullistavia liiketoimintamalleja on kehitetty näihin uusiin innovaatioihin pohjautuen (Stock & Seliger 2016). Riippuen teknologiasta sen kehityksellä voi olla valtaviakin seurauksia tulevaisuuden tuotannon toimintaympäristöön: esimerkiksi kvanttietokoneiden kehitys voi mullistaa tulevaisuuden tuotantojärjestelmät (Kusiak 2018). Lienee siis selvää, että Teollisuus 4.0 on valmistavalle teollisuudelle yksi ajankohtaisimmista aiheista niin tällä hetkellä kuin tulevaisuudessakin.

Erityisesti tuotannon kannalta oleellisimpia Teollisuus 4.0:n mukana tulleita innovaatioita ovat älykkäät tehtaet. Teollisuus 4.0:n alussa kehittynyt esineiden internet eli IoT (Internet of Things) on kiihdyttänyt tuotantolaitosten eri tehtävien automatisointia ja mahdollistanut yrityksille täysin uusia liiketoimintamahdollisuuksia. Esimerkiksi kehittyneiden datankeruumetodien avulla kerättyjen tietojen avulla tehtaet ovat voineet tehdä tarvittavia johtopäätöksiä ja toimenpiteitä oman toiminnan parantamiseksi. (Shrouf et al. 2014)

Teollisuus 4.0:n mukana tulleiden teknologioiden avulla tuotantolaitokset ovat siirtyneet kohti kestävämpää tulevaisuutta. Kehitykset esimerkiksi robotiikassa, tekoälyssä ja tiedonhallinnassa ovat edistäneet ekologista kestävyyttä merkittävästi (Javaid et al. 2022). Teollisuus 4.0 on siis jo vaikuttanut myönteisesti tuotannon ekologisuuteen, ja kehityksen jatkuessa sen vaikutus tulee vain lisääntymään.

1.2 Aiheen rajaus ja tutkimuskysymykset

Tässä kandidaatintyössä tarkastelen Teollisuus 4.0:n kehityksen vaikutusta tuotannon ekologiseen kestävyYTEEN ja ympäristöystävällisyyteen. Aihetta rajatakseni keskityn tässä työssä vain muutamaan yksittäiseen teknologiaan, joiden ominaisuuksia analysoimalla ja vertailemalla pyrin pohtimaan niiden tulevaa roolia kestävässä tuotannossa. Tässä työssä pureudun syvällisemmin kolmeen eri digitaaliseen teknologiaan, jotka löytyvät Nordic Innovationin kiertotalouden pelikirjasta (Nordic Innovation 2021).

Työn tavoitteiden selkeyttämiseksi olen laatinut tutkimuskysymyksen:

- Miten Teollisuus 4.0:n teknologioiden avulla voidaan tehdä tuotannosta ekologisesti kestävämpää?

Toimintaympäristössä tapahtuvien jatkuvien muutosten sekä suurten teknologisten muutosten ennustamisen vaikeuden vuoksi täydellisen vastauksen löytäminen kysymykseen on vaikeaa. Pyrin kuitenkin saavuttamaan näihin kysymyksiin mahdollisimman kattavat vastaukset olemassa olevalla tiedolla tehtyyn syvälliseen analyysiin pohjautuen.

1.3 Työn toteutus

Koska kandidaatintyö on kirjallisuuskatsaus, tämänkin työn keskiössätaulu on käytetty lähdemateriaali. Aiheidea syntyi pääosin Nordic Innovationin julkaisemasta Kiertotalouden pelikirjasta, jonka neljännessä kappaleessa käsitellään eri teknologioiden mahdollisia sovelluksia kiertotalouden edistämiseksi. Pelikirjassa eri teknologiat on jaoteltu digitaalisiin, fyysisiin sekä biologisiin, joiden lisäksi ne on luokiteltu niiden elinkaaren vaiheen mukaan. Taulukkoon 1 olen koonnut listan esimerkkejä, ja näistä valitsen muutaman syvempää tarkastelua varten työn käsittelyluvuissa. Syvempään tarkasteluun valitsin esi-
neiden internetin (IoT), tekoälyn sekä digitaalisen kaksosen, pääosin omien mielenkiinnonkohteideni mukaan, mutta halusin myös tarkastella eri elinkaaren vaiheissa olevia teknologioita. Esittelen teknologiat luvussa 2, ja luvussa 3 tarkastelen niiden käyttöä ekologisesti kestävässä tuotannossa.

Taulukko 1: Erilaisia teknologioita poimittuna Nordic Innovationin kiertotalouden pelikirjasta

	Nousevat	Kehittyvät	Kypsyvät	Vanhentuvat
Digitaaliset	-	Digitaalinen kaksonen	IoT, Lohkoketjuteknologia	Mobiililaitteet
Fyysiset	Nanoteknologia	Robotiikka	-	3D-tulostus
Biologiset	DNA-teknologia	Biomateriaalit	-	Bioenergia

Lähdemateriaalin artikkelit keräsin internetin Scopus-tietokannasta, josta hain työhöni englanninkielisiä ja vertaisarvioituja lähteitä. Kaikki kirjallisuushaut tehtiin Scopusin rajauksilla A/A/K (Article title, Abstract, Keywords), ja hakutulokset järjestelin yleensä viit-
tausten määrän perusteella. Tuoreempaa kirjallisuutta etsiessäni rajasin tuloksia julkaisu-
vuoden mukaan, tai järjestelin niitä relevanssin mukaan. Pyrin käyttämään pääosin

tuoreita julkaisuja, mutta käytin myös vanhempia julkaisuja sillä vaatimuksella, että niihin oli viitattu erittäin paljon.

Taulukkoon 2 on kirjattu erilaisten käyttämieni hakulausekkeiden hakutulosten määriä Scopus-tietokannasta etsiessä. Taulukosta näkee, että varsinkin yksittäisistä teknologi-oista löytyi valtavia määriä materiaalia, joita on pyritty harventamaan tarkempien termien avulla. Digitaalisesta kaksosesta löytyi myös huomattavasti vähemmän tuloksia kuin muista haetuista teknologioista konseptin tuoreuden vuoksi. Lähdemateriaalin löytäminen työtä varten ei koitunut ongelmaksi missään vaiheessa.

Taulukko 2: Kirjallisuuskatsauksen hakulausekkeet sekä hakutulosten määrä

Hakulauseet	Hakutulokset
"Industry 4.0"	27 111
"Sustainable production"	10 682
"smart factories"	3 634
"AI" OR "Artificial Intelligence"	565 070
"IoT" OR "Internet of Things"	184 027
"Environmental Sustainability"	31 387
"Digital Twin"	12 653
"Industry 4.0" AND "sustainab*"	3 077
"AI" OR "Artificial Intelligence" AND "production"	22 329
"IoT" OR "Internet of Things" AND "production"	9 437
"Digital Twin" AND "production"	2,675

Työn seuraavassa luvussa esitellään sen keskeisimmät konseptit: Teollisuus 4.0, ekologinen tuotanto sekä tutkittavana olevat teknologiat. Toinen luku muodostaa pohjan kolmannelle luvulle, jossa tutkitaan tuotannon kestävyyttä syvemmin sekä teknologioiden roolia sen harjoittamisessa. Neljäs luku taas toimii yhteenvetona, jossa työn eri osa-alueista muodostetaan yhtenäinen kokonaisuus tutkimuskysymysten tuella.

2. TEOLLISUUS 4.0, EKOLOGINEN TUOTANTO & TARKASTELTAVAT TEKNOLOGIAT

2.1 Teollisuus 4.0:n historia

Termi teollisuus 4.0 (engl. Industry 4.0) sai alkunsa Saksassa vuonna 2011, ja vuonna 2013 siitä tuli osa saksalaista strategista aloitetta, jolla pyrittiin ottamaan edelläkävijän asema tuotantoa mullistavien teknologioiden parissa (Xu et al. 2018). Teollisuus 4.0:n termin kehittäjänä toimi professori Henning Kagermann, joka jo 2010-luvun alussa näki IT-alan kehityksen potentiaalisia käyttökohteita tuotannossa. Kagermann (2013) näki Teollisuus 4.0:ssa potentiaalia esimerkiksi joustavuuden lisäämisessä, päätöksenteon avustamisessa sekä tämän työn kannalta oleellisimpana, kestävyuden parantamisessa. Muita potentiaalisia Teollisuus 4.0:n vaikutuksia on tutkittu myöhemmässä kirjallisuudessa teknologioiden kehittyessä: esimerkiksi virtuaalisten mallien ja simulaatioiden käyttö on saanut suosiota niiden avainteknologioiden kehityksen myötä (Dalenogare et al. 2018).

Teollisuus 4.0:n kuvaava joukko IT-teknologioita, joita hyödyntämällä valmistava teollisuus voi harjoittaa uudenlaista, parempaa liiketoimintaa. Teollisuus 4.0 vastaa myös valmistavan teollisuuden moderneihin haasteisiin, kuten kestävyteen, urbaaniin tuotantoon sekä ihmiskunnan demografisiin muutoksiin (Kagermann et al. 2013).

ICT-alan kehitys on toiminut pääsääntöisenä vauhdittajana Teollisuus 4.0:n merkittävälle nousulle. Alan kehityksen vuoksi erilaiset tekniset ratkaisut valmistavan teollisuuden tiedonkäsittelyongelmiin ovat yleistyneet, mikä näkyy yleistyneessä digitalisoinnissa teollisuuden yrityksissä. (Xu et al. 2018)

2.2 Ekologinen tuotanto

Kestävä tuotanto on sateenvarjotermi, joka sisältää kestävyuden eri näkökulmia. Yleisesti yrityksen kestävyyttä arvioidaan kolmesta eri perspektiivistä: taloudellisesta, ekologisesta ja sosiaalisesta näkökulmasta (Lankoski 2016; Purvis et al. 2017). Taloudellisella kestävyydellä tarkoitetaan pitkällä aikavälillä kannattavaa liiketoimintaa. Sosiaalisella kestävyydellä tarkoitetaan tuotannon vaikutusta työntekijöihin, ympäröiviin yhteisöihin sekä sosiaaliseen oikeudenmukaisuuteen. Ekologista kestävyyttä voidaan taas ajatella tuotannon vaikutuksena ympäristöön, oli se sitten saasteiden, kasvihuonepäästöjen tai materiaalivalintojen muodossa (Veleva ja Ellenbecker 2001; Feroz et al. 2021). Ekologi-

sen tuotannon ohella saavutetaan usein hyötyjä muillakin kestävyiden osa-alueilla: vaikutus yrityksen talouteen on usein positiivinen kasvaneen tehokkuuden muodossa, ja esimerkiksi haitallisten aineiden turvallinen käsittely lisää tuotantolaitoksen työturvallisuutta (Forez et al. 2021).

Ekologista kestävyttä voidaan mitata erilaisten indikaattoreiden ja mittareiden avulla. Usein itse mittaaminen ei ole vaikeaa, mutta mittaustulosten tulkitseminen ja tavoitteiden asettaminen voi olla hyvinkin haastavaa. Tärkeimpiä ekologiseen kestävyteen liittyviä tavoitteita ovat luonnon resurssien käytön kestävä käyttö (esim. metsäkadon hidastaminen ja otsonikerroksen säilyttäminen) sekä luonnon diversiteetin säilytys. Näitä tavoitteita voidaan mitata eri tavoin, kuten laskemalla metsäpinta-alaa, hiilidioksidipäästöjä tai otsonikatoa aiheuttavien aineiden määrää, tai esimerkiksi mittaamalla vedenkulutusta ja eläinkantoja. (Moldan et al. 2012)

2.3 Esineiden Internet (IoT)

Teollisuus 4.0:sta on mahdotonta puhua käsittelemättä esineiden internetiä (engl. Internet of Things, IoT), sillä juuri IoT toimi yhtenä merkittävimpänä uutena innovaationa sen lanseerauksen aikaan 2010-luvun alussa. IoT kuvaa reaali maailman esineitä, tuotannon tapauksessa erilaisia valmistukseen käytettäviä laitteita, joihin on lisätty erilaisia digitaalisia laitteita. Nämä laitteet voivat olla esimerkiksi sensoreita tai toimilaitteita, joiden avulla esineet voidaan yhdistää johonkin järjestelmään datankeruuta tai laitteiden linkittämistä varten (Zhong et al. 2017), Arkielämässä tätä teknologiaa käytetään esimerkiksi uusimmissa älylaitteissa, kuten esimerkiksi Amazon Echossa, jossa tavallinen kaiutin on yhteydessä internetiin erilaisten toimintojen, kuten tiedonhaun tai verkkoshoppailun, mahdollistamiseksi. IoT toimii siis eräänlaisena perustana Teollisuus 4.0:lle, joka mahdollistaa muiden teknologioiden ja työkalujen tarkoituksenmukaisen käytön (Javaid et al. 2022). Muita esimerkkejä olen kasannut taulukkoon 3, joka on koottu mukailen lähteestä Liu ja Wang (2017).

Taulukko 3: Esimerkkejä IoT:n käyttökohteista (Liu & Wang 2017)

Pääosa-alue	Ala	Esimerkki
Teollisuus	Teolliset prosessit	Reaaliaikainen laitehallinta
	Logistiikka ja tuotteen elinkaari	Varastonhallinta
	Maatalous	Eläinten terveyden hallinta
Älykäs rakentaminen	Älykkäät rakennukset	Energiatehokkuus
	Turvallisuus ja ympäristö	Turvakameraverkostot
		Ympäristönsuojelu
Terveydenhuolto	Diagnosointi ja hoito	Elintoimintojen seuraus
	Muut palvelut	Invalidien avustus

Tämän työn kannalta kiinnostavimmat taulukon 3 käyttökohteista ovat sen käyttö teollisten prosessien reaaliaikaisessa hallinnassa sekä älykkäiden rakennusten energiatehokkuuden lisäämisessä, sillä nämä ovat potentiaalisia ekologisen kestävyuden lähteitä. Lähteessä painotetaan myös, että esimerkit ovat eri elinkaaren vaiheissa; osa taulukossa esitellyistä sovelluksista on aivan uusia, kokeiluvaiheessa olevia käyttökohteita, kun taas osa on kypsyneitä ja yleisessä käytössä.

2.3.1 Teollinen Esineiden Internet

Tämän työn aihepiirin osalta tärkeä termi on myös teollinen esineiden internet (engl. Industrial Internet of Things, IIoT) jolla kuvataan teollisuudessa käytettyä IoT-laitteita. IIoT:tä voidaan pitää esineiden internetin alakategoriana, ja Boyes et al. (2018) on määritellyt sen seuraavasti: IIoT on systeemi, jossa esineet sensoreiden ja pilvipalvelujen avulla mahdollistavat reaaliaikaisen ja älykkään datankeruun ja -käsittelyn, ja jonka avulla tuotantoa voidaan optimoida tuotannon arvon lisäämiseksi. Tämä arvo voi olla parantunutta tehokkuutta, vähentyneitä työkustannuksia tai säästynyttä energiaa.

Boyes et al. (2008) luettelee tärkeimmiksi IIoT:n ominaisuuksiksi tiedon hallinnan, keräämisen, siirtelyn sekä analysoinnin, jotta IIoT-laitteet voivat toimia omillaan ilman tarvetta ihmisen tekemille toimenpiteille. Tämä on hyvin lähellä Zhong et al. (2017) esittämää IoT:n määritelmää, joka esiteltiin aikaisemmin. Tärkein ero IoT ja IIoT:n välillä onkin niiden käyttötarkoitus, ja Sisinni et al. (2018) kutsuukin tavallisia IoT-laitteita 'kuluttajien IoT:ksi'. Selvyiden vuoksi aion kuitenkin viitata työssä jatkossa ainoastaan IoT-laitteisiin, kontekstista riippumatta.

2.4 Tekoäly

Tekoäly on tällä hetkellä näkyvästi esillä, kun ihmiset ovat päässeet kokeilemaan ällistyttävää virtuaaliavustaja ChatGPT:tä. Tekoälyn nopea kehitys herättää huolta Sci-Fi fannien lisäksi jo tavallisissa kansalaisissa, kun sen käyttökohteet ovat levinneet monille eri aloille, kuten lääketieteeseen, finanssialaan sekä koulutukseen (Cioffi et al. 2020). Tekoäly on hivuttautunut myös osaksi tuotantolaitosten toimintaa, ja sillä on keskeinen rooli nykyajan älytehtaiden rakentamisessa (Wan et al. 2018).

Cioffi et al. (2020) luettelee tärkeimmiksi tekoälyn hyödyiksi teollisessa toimintaympäristössä uudet innovaatiot, prosessien optimisoinnin, resurssien optimisoinnin sekä laadun parantumisen. Julkaisussa mainitaan myös tekoälyn kehityksen keskittyvän tällä hetkellä pääosin Kiinaan ja Yhdysvaltoihin; Euroopassa tekoälyyn tehdyt investoinnit ovat maltillisempia.

Wan et al. (2018) käsittelee tekoälyn teollisia käyttökohteita vielä syvemmin. Julkaisussa otetaan huomioon lisäksi esimerkiksi tekoälyn mahdollistama nopea datankäsittely ja -siirto, sekä tekoälyllä varustettujen tuotantolaitteiden parannellut ominaisuudet.

2.5 Digitaalinen kaksonen

Digitaalisella kaksosella viitataan IoT:n tapaan fyysisten ja virtuaalisten kappaleiden linkittämiseen. Digitaalisella kaksosella tarkoitetaan reaali maailman esineen virtuaalista kopiota, jonka avulla voidaan kerätä dataa esineestä erilaisia käyttötarkoituksia varten. Sensoreiden ja muiden datankeruumenetelmien avulla kerättyä dataa voidaan hyödyntää tuotteen reaaliajassa elinkaaren eri vaiheissa: digitaalista kaksosta voidaan käyttää tuotesuunnittelusta prosessien simulointiin, tuotantojärjestelmien kuvaamiseen ja tuotannon koneiden statuksen seurantaan. (Tao et al. 2019; He ja Bai 2021)

Kuten taulukosta 1 nähdään, digitaalinen kaksonen on kehittyvä teknologia, joten sen mahdolliset teolliset sovellukset ovat vasta alkuvaiheissaan. Vaikka konsepti mainittiin tieteellisessä artikkelissa ensimmäisen kerran vuonna 2003, vasta vuoden 2014 jälkeen on sen tutkimus lähtenyt kunnolla vauhtiin. Sitä pidetään tänä päivänä yhtenä tärkeimmistä älytehtaiden komponenteista yhdessä IoT:n, pilvipalveluiden sekä tekoälyn kanssa, ja vain näiden muiden lueteltujen teknologioiden avulla voi digitaalinen kaksonen saavuttaa täyden potentiaalinsa. Maailmalla digitaalista kaksosta on käytetty esimerkiksi Siemensin toimesta energiaverkostojen rakennuksessa, ja British Petroleum on käyttänyt sitä öljynporauslauttojen toiminnan valvomisessa (Qi & Tao 2018).

3. TEOLLISUUS 4.0:N MERKITYS TUOTANNON EKOLOGISUUDESSA

3.1 Teollisuus 4.0 ja kestävä tuotanto

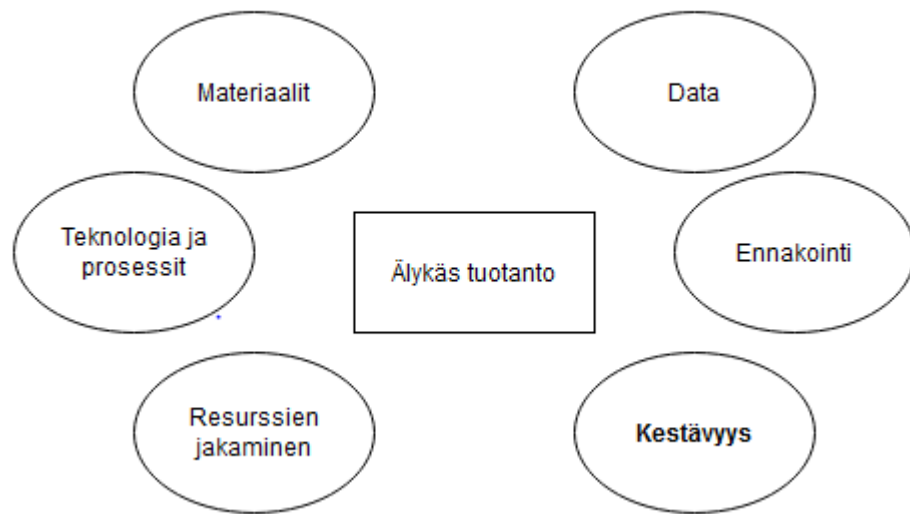
Edellisessä luvussa esiteltiin Teollisuus 4.0:n pääpiirteet sekä sen keskeisiä teknologioita, ja tässä luvussa tutkitaan niiden avulla saavutettavia ekologisia hyötyjä. Javaid et al. (2022) esittelee erilaisia merkittäviä Teollisuus 4.0:n sovelluksia, joiden avulla ympäristöystävällistä toimintaa voidaan lisätä. Näitä esimerkkejä on listattuna taulukkoon 4. Tämän työn aihepiirin kannalta olennaisin listattu sovellus on kestävä älytehtaas, ja sitä tutkitaan seuraavaksi hieman tarkemmin.

Taulukko 4: Teollisuus 4.0:n sovelluksia ekologisuuden lisäämiseksi (Javaid et al. 2022)

Sovellus	Kuvaus
Kestävät älytehtaas	Teollisuus 4.0:n mukana tulleiden teknologioiden avulla tuotantolaitokset muuttuvat ympäristöystävällisimmiksi ja kestävämmiksi.
Pienentynyt hiilijalanjälki	Robotiikan, uusiutuvien energiamuotojen sekä datankeruuteknologioiden avulla tuotantolaitokset saavat vähennettyä jätettä, hiilidioksidipäästöjä ja saasteita
Kestävä rakentaminen	Datankeruumenetelmien avulla yritykset voivat seurata, analysoida sekä tehdä oikeita johtopäätöksiä koskien niiden ympäristövalintoja
Tuottavuuden kasvu	Tuottavuuden kasvulla yritykset realisoivat jatkuvaa kasvua, ja lisääntyneiden rahallisten voittojen avulla ne voivat tehdä kestäviä ratkaisuja

Älytehtaas ovat yksi tulevaisuuden tuotannon polttavimmista puheenaiheista tällä hetkellä, ja edellisessä luvussa esiteltyt Teollisuus 4.0:n teknologiat ovat avainasemassa älytehtaasiden toteutuksessa. Älykkäälle tuotannolle ei kuitenkaan ole vain yhtä yleisesti hyväksyttyä määritelmää, mutta yleisesti sitä voidaan pitää integroituna verkostona erilaisia tuotantolaitteita, joka pystyy reagoimaan reaaliajassa tuotantolaitoksen eri tarpeisiin (Kusiak 2018). Älytehtaasiden yliverlaisia ominaisuuksia perinteisiin tuotantolaitoksiin verrattuna ovat esimerkiksi niiden joustavuus, muokattavuus, seurattavuus sekä täysin uusien liiketoimintamahdollisuuksien mahdollistaminen (Shrouf et al. 2014).

Kusiak (2018) jakaa älykkään tuotannon toteuttamisen tärkeimmät osa-alueet kuudeksi pilariksi, jotka on esitelty kuvassa 1. Nämä kuusi pilaria ovat data, materiaalit, ennakointi, kestävyys, resurssien jakaminen sekä teknologia ja prosessit.



Kuva 1: Älykkään tuotannon kuusi pilaria (Kusiak 2018)

Tämän työn aihepiirin kannalta mielenkiintoisin pilareista on kestävyys. Kusiak (2018) painottaa ekologisen kestävyuden tärkeyttä tulevaisuudessa, erityisesti materiaalien, tuotannon prosessien, energian sekä saasteiden näkökulmasta. Hän painottaa, ettei tuotannon ekologisessa kestävyudessa ole kyse niinkään valmistettavista lopputuotteista, vaan valmistusvaiheessa tehtävistä päätöksistä ja arvoalinnoista. Valmistavan teollisuuden on myös varauduttava täysin uudelleenlaiseen toimintaan kiertotalouden yleistyessä, sillä tuotantolaitosten harteille saattaa kasautua ennennäkemättömiä toimintoja esimerkiksi tuotteiden jälleenvalmistuksen sekä korjaamisen muodossa.

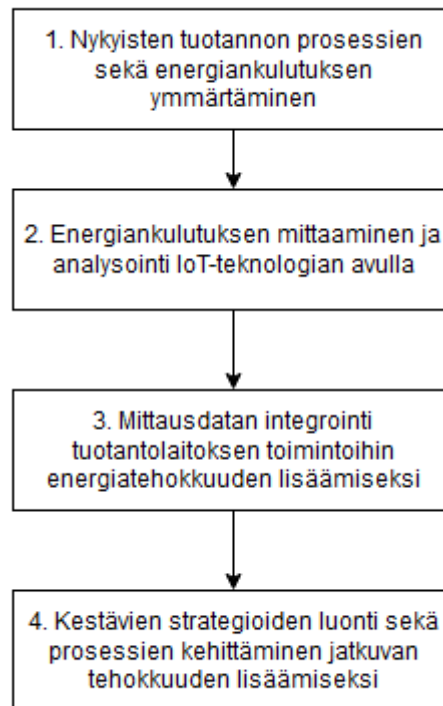
Myös Shrouf et al. (2014) esittävät, että älytehtaiden tärkeimpiä ominaisuuksia on niiden avulla tehtävät energiansäästötoimet. Samaan johtopäätökseen pääsivät myös Javaid et al. (2022), jotka mainitsivat energiansäästötoimet tuotantolaitostason lisäksi myös laajemmalla, kaupunkitasolla. Tämä on hieman suppeampi katsaus tuotannon ekologisuuteen kuin Kusiakin (2018), sillä Kusiak painotti lisäksi materiaalivalintoja ja saasteita, mutta energiankulutuksen seuranta on molempien mukaan tuotannon ekologisuuden keskeisimpiä tekijöitä.

Shrouf et al. (2014) esittää tiedon puutteen olevan suuri ongelma perinteisissä tuotantolaitoksissa; energiankulutukseen vaikuttavia tekijöitä ei osata aina tunnistaa, kulutusta ei osata kohdentaa ja/tai vaadittavia toimenpiteitä ei osata tehdä. Älytehtaat tarjoavat teknisillä ominaisuuksillaan ratkaisun tähän tiedon puutteesta johtuvaan energiankulutusongelmaan.

3.2 IoT tuotantolaitosten ekologisuudessa

Kuten aikaisemmassa luvussa pohjustettiin, IoT on elintärkeä teknologia Teollisuus 4.0:sta tai älytehtaista puhuttaessa, sillä IoT:n sensoreiden ja laitteiden avulla kerätään päätöksenteon ja muutosten kannalta oleellista dataa (Javaid et al. 2022). Kagermann (2013) tunnisti sen potentiaalin aikaisin, ja hänen näkemystään IoT:n tärkeydestä on tuettu myöhemmässä kirjallisuudessa (Shrouf et al. 2014; Liu ja Wang 2016).

Shrouf et al. (2014) esittävät, että IoT-sensoreiden merkittävin hyöty tuotannon ekologisuudessa on sen avulla saatujen tietojen mukaan tehdyt energiansäästötoimet. Sensoreiden avulla energiankulutuksesta saadaan tarkkaa, oikein kohdennettua tietoa päätöksenteon tueksi, ja toimenpiteitä voidaan tehdä reaaliajassa ilman tarvetta ihmisen tekemille toimenpiteille. Tämä toimii erityisen hyvin älytehtaissa, joissa on muutakin teknologista infrastruktuuria automaattisten toimintojen mahdollistamiseksi. Shrouf et al. (2014) esittelee nelivaiheisen mallin, jolla voidaan tehdä IoT-perusteisia energiasäästöjä, joka on esitelty kuvassa 2.



Kuva 2: IoT:n avulla tehtävien energiansäästötoimien yleinen prosessikaavio (Shrouf et al. 2014)

IoT:n käytön haasteet tulevat esille prosessin alkuvaiheissa, kun tuotantolaitoksessa pitää tehdä valintoja seurattavista prosesseista ja/tai laitteista. Tavoitteista ja laitteistosta

riippuen päätöksiä täytyy tehdä myös tarkasteltavan tason suhteen; halutaanko prosessin energiankulutusta tarkastella kokonaisuudessaan, vai pitääkö se jakaa pienempiin osiin? Myös laitteistovalinta pitää tehdä prosessin alkuvaiheissa: sensorit pitää valita mittauksen tueksi ja datanhallintaan liittyvien teknisten ohjelmien täytyy olla valittuna. Prosessissa viimeisenä on lean-ajattelun mukainen jatkuvan parantamisen filosofia, sillä yrityksen johdon pitää muuttaa toimintaansa uusien energiansäästötoimien mahdollistamiseksi esimerkiksi uusien, kestävien strategioiden valitsemisella. (Shrouf et al. 2014)

Liu ja Wang (2017) avaa hieman uusia näkökulmia IoT:lla saavutettaviin ekologisiin hyötyihin. Erilaisilla sensoreilla voidaan myös esimerkiksi suojella ympäristöä haitallisilta aineilta ja kemikaaleilta; sensorit voisivat mitata kemiallisten aineiden tasapainoa ympäristölle haitallisia aineita käsittelevissä tuotantolaitoksissa, ehkäisten mahdollisten ympäristökatastrofien tapahtumista. IoT:n avulla saavutetut ympäristövaikutukset ovat siis energiansäästötoimia monialaisempia.

3.3 Tekoäly tuotantolaitosten ekologisuudessa

Tekoälyllä tuotantolaitosten ekologisuus voidaan viedä uudelle tasolle, kun IoT-laitteiden avulla kerättyä dataa voidaan nopeasti analysoida ja toimintaa sen perusteella muuttaa. Tekoälyalgoritmeilla vaikutetaan moniin tuotannon ekologisuuteen vaikuttavaan tekijään, kuten materiaalien käyttöön, saasteiden valvontaan sekä energiatehokkuuden lisäämiseen. Tekoälyllä voidaan myös tehdä tuotannon prosesseista tehokkaampia, joka lisää tuottavuutta ja täten myös vähentää yhden lopputuotteen ympäristöllistä vaikutusta (Cioffi et al. 2020). Taulukossa 5 on esimerkkejä tuotannon ympäristötavoitteista sekä tekoälyn sovelluksia niihin.

Taulukko 5: Tekoälyn sovelluksia kestävä tuotannon harjoittamiseksi (Cioffi et al. 2020; Wang et al. 2018)

Kestävän tuotannon osa-alue	Tavoite	Tekoälyn vaikutus
Toimitusketjun hallinta	Tuote on saatavilla halutussa paikassa oikeaan aikaan	Nopeuttaa päätöksentekoa, lisää ketjun läpinäkyvyyttä, ennakoii tavaran kysyntää
Laadunhallinta	Tunnista tuotannon ongelmakohdat mahdollisimman aikaisin resurssien säästämiseksi	Parantaa reaktioaikaa ja eliminoi mahdollisia ongelmia
Ennakoiva huolto	Tunnista mahdolliset laiterikot tuotannossa laadun takaamiseksi ja tuottavuuden ylläpitämiseksi	Luo tarkkoja ennusteita laitteiden huoltotarpeista
Energiankulutuksen hallinta	Optimoi tuotantolaitoksen energiankulutus	Edistää resurssien tehokasta käyttöä, tehostaa toimitusketjua ja logistiikkaa ja tasapainottaa tuotantolaitoksen energiatarpeita

Taulukosta 5 on nähtävissä, että tekoälyllä on vaikutuksia tuotannon kestävyyyteen sen monella osa-alueella, toimitusketjusta laadunhallintaan, ennakoivaan huoltoon sekä energiankulutukseen (Cioffi et al. 2020).

Wan et al. (2018) tekstissä painotetaan tekoälyn merkitystä erityisesti tietojenhallinnassa ja -käsittelyssä. Tekoäly mahdollistaa data hallinnan ja siirtelyn nopeuttamisen, ja se voi luoda valmistelemattomasta raakadatatista päätöksentekoon kelpaavaa informaatiota. IoT-laitteet ja tekoäly toimivatkin tuotantolaitoksissa yhdessä erityisen hyvin: tekoäly voi analysoida ja tehdä johtopäätöksiä IoT-sensoreiden keräämästä datasta. Wang et al. (2018) ovat tästä samaa mieltä; heidän mukaansa kasvavien datamäärien analysoinnissa on hyödynnettävä tekoälyä, jotta dataa voidaan käsitellä riittävän nopeasti ja tarkasti. Tätä tekoälyllä lisättyä tietojenkäsittelykykyä voidaan organisaatiossa hyödyntää useisiin eri tarkoituksiin, kuten ekologisesti kestävien ratkaisujen toteuttamiseen.

Tekoälyn tärkeimpänä hyötynä tuotannossa pidetäänkin juuri sen mahdollistamaa nopeaa ja laadukasta datan analysointia, ja tästä ollaan kirjallisuudessa samaa mieltä. Wan et al. (2018) ja Cioffi et al. (2020) ovat yksimielisiä sen tärkeydestä tuotantojärjestelmien ongelmakohtien löytämisessä sekä vikatapausten ennustuksessa. Tekoälyn avulla saadaan avattua IoT:n keräämän datan täysi potentiaali, sillä sen avulla myös modernien ja monimutkaisten tuotantoprosessien toiminnan seuraaminen on vaivattomampaa, ja tarvittavia ekologisia toimenpiteitä voidaan tehdä (Wang et al. (2018).

3.4 Digitaalinen kaksonen tuotantolaitosten ekologisuudessa

Digitaalisen kaksonen rooli älytehtaissa on ollut trendikäs tutkimusaihe lähivuosina, ja sen sovelluksia on hyödynnetty muun muassa tuotteiden elinkaarten hallinnassa, datanhallinnassa, ennusteiden tekemisessä sekä ekologisessa tuotannossa. Digitaalinen kaksonen on tärkeässä roolissa moderneissa älytehtaissa yhdessä IoT-laitteiden ja tekoälyn kanssa. (He ja Bai 2021) Digitaalisen kaksonen teollisia käyttökohteita löytyy taulukosta 6.

Taulukko 6: Digitaalisen kaksosen käyttökohteita tuotannossa (He ja Bai 2021)

Tuotannon osa-alue	Vaikutus
Tuotannon valvonta	Antaa tuotantojärjestelmän valvontaan liittyvää informaatiota visuaalisessa muodossa ja reaaliajassa
Tuotantojärjestelmän muokattavuus	Erlaisia tuotantojärjestelmiä voidaan kokeilla digitaalisen kaksosen avulla matalalla kynnyksellä
Tuotannon digitalisointi	Digitaalisten kaksosten luominen on usein ensimmäisiä askelia tuotantojärjestelmän digitalisoinnissa
Tuotantoprosessien optimointi	Simulaation avulla voidaan vähentää materiaalihukkaa ja pidentää tuotannon koneiden käyttöikä

Digitaalisia kaksosia voidaan luoda kokonaisille älytehtaille, jossa virtuaalisia vastikkeita löytyy materiaaleille, laitteistoille, työkaluille ja työntekijöille. Tällaisen virtuaalisen älytehtaan avulla tuotantolaitoksen toimintaa voidaan simuloida ja arvioida, jotta päätös optimituotantojärjestelmästä saadaan tehtyä. Tuotantolaitos voi ohjata tuotantoon tiedon mukaan haluttuun suuntaan: simulointituloksilla voidaan valvoa esimerkiksi tuotannon laatua, tarkkuutta, tehokkuutta tai vakautta. Tuotantoprosessien monimutkaistuessa ongelmakohtien tunnistaminen voi olla haastavaa, ja yhdessä IoT-laitteiden tekemän datan sekä digitaalisen kaksosen avulla tuotantolaitoksessa voidaan tehdä valistuneita päätöksiä. (Qi ja Tao 2018)

Tärkeä digitaalisen kaksosen mahdollistama ekologinen hyöty tuotantolaitoksissa on sen käyttö koneiden ja tuotantojärjestelmien elinkaarien pidentämisessä ja toiminnan optimimisessä (Tao et al. 2019). Sensoreilla voidaan mitata esimerkiksi koneen osien toimivuutta reaaliajassa, jonka avulla voidaan ennustaa mahdollisia laiterikkoja. Digitaalisen kaksosen avulla luotujen simulaatiomallien optimaalisia tuloksia tuotantojärjestelmien toiminnasta voidaan verrata oikeisiin lukuihin mahdollisten ongelmakohtien löytämisen helpottamiseksi. Yhdessä tekoälyn mahdollistaman nopean ja virheettömän datankäsittelyn avulla digitaalisella kaksosella voidaan tarkastella tarkasti tuotantolaitoksen toimintaa erilaisilla tasoilla (Qi ja Tao 2018).

4. PÄÄTELMÄT

Työn tarkoituksena oli tutkia Teollisuus 4.0:n ydinteknologioiden vaikutuksia kestäväen tuotannon edistämiseksi. Työssä perehdyttiin tarkemmin kolmeen yksittäiseen teknologiaan, jonka lisäksi tutkittiin pintapuolisesti älytehtaiden toimintaperiaatteita. Tämän työn alussa esitettiin tutkimuskysymys, joka meni seuraavanlaisesti:

- Miten Teollisuus 4.0:n teknologioiden avulla voidaan tehdä tuotannosta ekologisesti kestävämpää?

Tutkimuskysymys on hyvin laaja, joten tämän työn avulla olen saanut siihen vain hyvin pintapuolisen vastauksen. Ekologisella kestävyydellä voidaan tarkoittaa tuotannossa monia asioita, kuten materiaalien tehokasta käyttöä, tuotantolaitoksen energiatehokkuutta, tai muiden ympäristövahinkojen ehkäisyä (Feroz et al. 2021), ja eri teknologiat voivat erilaisilla ominaisuuksillaan edistää ekologisen tuotannon eri osa-alueita.

Keskeisimmiksi työn lähteiksi muodostui Shrouf et al. (2014) sekä Kusiakin (2018) artikkelit, jotka käsittelevät älytehtaita sekä Teollisuus 4.0:aa laajasta näkökulmasta. Kusiakin (2018) tekstissä käsitellään tarkemmin juuri älykstä tuotantoa sekä sen keskeisimpiä toimintaperiaatteita ja hyötyjä, kun taas Shrouf (2014) tutkii älykstä tuotantoa Teollisuus 4.0:n ja erityisesti IoT:n näkökulmasta.

Tämäkin tutkimus osoittaa, että IoT on aivan olennainen avainteknologia nykyajan tuotantolaitoksissa. IoT on keskeinen tekijä tuotantolaitosten datankeruussa, ja juuri sen keräämällä tiedolla voivat yritykset tehdä tarvittavia ekologisia toimenpiteitä (Shrouf 2014). Toiset esitellyt teknologiat toimivatkin ikään kuin jatkumona IoT:n keräämälle datalle: tekoälyn avulla tätä dataa voidaan käsitellä nopeammin ja paremmin tehtaan toimintojen tehostamiseksi, ja digitaalisen kaksosen tekemiseen tarvitaan tätä reaaliaikaista, tarkkaa dataa tuotantolaitoksen toiminnasta.

Kirjoittamisprosessin edetessä työn rakenne ja idea muuttui huomattavasti: alkuvaiheessa tarkoituksena oli tutkia teknologioita hyvin erillisesti, mutta kirjoittamisprosessin edetessä huomasin teknologioiden välisten yhteyksien olevan monisyisiä sekä tämän työn kannalta keskeisiä, joten niiden yhteyksien tutkimisesta tuli olennainen osa työtä. Tutkituista teknologioista IoT:n sekä tekoälyn ekologisten implikaatioiden osalta löytyi runsaasti tutkimusta, mutta digitaalisen kaksosen tutkinta ei ollut yhtä laajaa: tämä johdunee digitaalisen kaksosen tuoreudesta konseptina, sillä se on vasta kehityksensä alkuvaiheella oleva teknologia.

Kusiak (2018) mainitsee tekstissään, että älykäs tuotanto ei ole pelkästään tehtaan automatisointia, vaan se on myös tuotantolaitoksen autonomisuutta, simulaatiota sekä optimisointia. Tässä työssä tutkittiin tarkasteltavien teknologioiden vaikutuksia kaikkiin näihin kolmeen attribuuttiin ja niiden ekologisiin implikaatioihin, vaikka kaikki teknologiat eivät merkittävästi vaikuttaneetkaan niistä aivan jokaiseen. Työn aiheen laajuuden ja ajan-kohtaisuuden vuoksi sen lisätutkimus on tarpeellista: tässä työssä saatiin lopulta vain pieni pintaraapaisu Teollisuus 4.0:n ekologisista vaikutuksista, ja nousevien teknologioiden kehitys voi aiheuttaa vielä mittavia muutoksia teollisessa toimintaympäristössä.

LÄHTEET

- Boyes, H. *et al.* (2018) 'The industrial internet of things (IIoT): An analysis framework', *Computers in Industry*, 101, pp. 1–12. Saatavilla osoitteesta: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2018.04.015>.
- Cioffi, R. *et al.* (2020) 'Artificial Intelligence and Machine Learning Applications in Smart Production: Progress, Trends, and Directions', *Sustainability*, 12(2), p. 492. Saatavilla osoitteesta: <https://doi.org/10.3390/su12020492>.
- Dalenogare, L.S. *et al.* (2018) 'The expected contribution of Industry 4.0 technologies for industrial performance', *International Journal of Production Economics*, 204, pp. 383–394. Saatavilla osoitteesta: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.08.019>.
- Feroz, A.K., Zo, H. and Chiravuri, A. (2021) 'Digital Transformation and Environmental Sustainability: A Review and Research Agenda', *Sustainability*, 13(3), p. 1530. Saatavilla osoitteesta: <https://doi.org/10.3390/su13031530>.
- He, B. and Bai, K.-J. (2021) 'Digital twin-based sustainable intelligent manufacturing: a review', *Advances in Manufacturing*, 9(1), pp. 1–21. Saatavilla osoitteesta: <https://doi.org/10.1007/s40436-020-00302-5>.
- Javaid, M. *et al.* (2022) 'Understanding the adoption of Industry 4.0 technologies in improving environmental sustainability', *Sustainable Operations and Computers*, 3, pp. 203–217. Saatavilla osoitteesta: <https://doi.org/10.1016/j.susoc.2022.01.008>.
- Kagermann, H., Wahlster, W., Helbig, J., 2013. Recommendations for Implementing the Strategic Initiative INDUSTRIE 4.0. Final report of the Industrie 4.0 WG
- Kusiak, A. (2018) 'Smart manufacturing', *International Journal of Production Research*, 56(1–2), pp. 508–517. Saatavilla osoitteesta: <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1351644>.
- Lankoski, L. (2016) 'Alternative conceptions of sustainability in a business context', *Journal of Cleaner Production*, 139, pp. 847–857. Saatavilla osoitteesta: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.08.087>.

Liu, R. and Wang, J. (2017) 'Internet of Things: Application and Prospect', *MATEC Web of Conferences*. Edited by L. Zhao et al., 100, p. 02034. Saatavilla osoitteesta: <https://doi.org/10.1051/matecconf/201710002034>.

Moldan, B., Janoušková, S. and Hák, T. (2012) 'How to understand and measure environmental sustainability: Indicators and targets', *Ecological Indicators*, 17, pp. 4–13. Saatavilla osoitteesta: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.04.033>.

Nordic Innovation. (2021) 'Nordic Circular Economy Playbook – Circular business models for the manufacturing industry' Saatavilla osoitteesta: <https://pub.nordicinnovation.org/Nordic-Circular-Economy-Playbook/us2021-play.pdf>

Purvis, B., Mao, Y. and Robinson, D. (2019) 'Three pillars of sustainability: in search of conceptual origins', *Sustainability Science*, 14(3), pp. 681–695. Saatavilla osoitteesta: <https://doi.org/10.1007/s11625-018-0627-5>.

Qi, Q. and Tao, F. (2018) 'Digital Twin and Big Data Towards Smart Manufacturing and Industry 4.0: 360 Degree Comparison', *IEEE Access*, 6, pp. 3585–3593. Saatavilla osoitteesta: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2793265>.

Shrouf, F., Ordieres, J. and Miragliotta, G. (2014) 'Smart factories in Industry 4.0: A review of the concept and of energy management approached in production based on the Internet of Things paradigm', in *2014 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management. 2014 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*, Selangor Darul Ehsan, Malaysia: IEEE, pp. 697–701. Saatavilla osoitteesta: <https://doi.org/10.1109/IEEM.2014.7058728>.

Sisinni, E. et al. (2018) 'Industrial Internet of Things: Challenges, Opportunities, and Directions', *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 14(11), pp. 4724–4734. Saatavilla osoitteesta: <https://doi.org/10.1109/TII.2018.2852491>.

Stock, T. and Seliger, G. (2016) 'Opportunities of Sustainable Manufacturing in Industry 4.0', *Procedia CIRP*, 40, pp. 536–541. Saatavilla osoitteesta: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.01.129>.

Tao, F. *et al.* (2019) 'Digital Twin in Industry: State-of-the-Art', *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 15(4), pp. 2405–2415. Saatavilla osoitteesta: <https://doi.org/10.1109/TII.2018.2873186>.

Veleva, V. and Ellenbecker, M. (2001) 'Indicators of sustainable production: framework and methodology', *Journal of Cleaner Production*, 9(6), pp. 519–549. Saatavilla osoitteesta: [https://doi.org/10.1016/S0959-6526\(01\)00010-5](https://doi.org/10.1016/S0959-6526(01)00010-5).

Wan, J. *et al.* (2018) 'Artificial Intelligence for Cloud-Assisted Smart Factory', *IEEE Access*, 6, pp. 55419–55430. Saatavilla osoitteesta: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2871724>.

Wang, J. *et al.* (2018) 'Deep learning for smart manufacturing: Methods and applications', *Journal of Manufacturing Systems*, 48, pp. 144–156. Saatavilla osoitteesta: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.01.003>.

Xu, L.D., Xu, E.L. and Li, L. (2018) 'Industry 4.0: state of the art and future trends', *International Journal of Production Research*, 56(8), pp. 2941–2962. Saatavilla osoitteesta: <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1444806>.

Zhong, R.Y. *et al.* (2017) 'Intelligent Manufacturing in the Context of Industry 4.0: A Review', *Engineering*, 3(5), pp. 616–630. Saatavilla osoitteesta: <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2017.05.015>.