

Tuomas Tiura

DIGITAALINEN KAKSONEN KONSEP- TINA JA VALMISTAVAN TEOLLISUU- DEN TUKENA

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Tarkastaja: Mikko Salmenperä
Toukokuu 2021

TIIVISTELMÄ

Tuomas Tiura: Digitaalinen kaksonen konseptina ja valmistavan teollisuuden tukena
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Teknisten tieteiden TkK-tutkinto-ohjelma, Tekniikka ja luonnontieteiden tiedekunta
Toukokuu 2021

Digitaalinen kaksonen (engl. Digital Twin) on virtuaalinen esitys fyysisestä hyödykkeestä. Ideaalissa tapauksessa digitaalista kaksosta on mahdoton erottaa fyysisestä hyödykkeestä niin ulkonäön, kuin käyttäytymisen suhteen. Tämän tutkimuksen tarkoituksena on selvittää, mikä on digitaalinen kaksonen sekä sen käyttämistä eri toimialoilla ja valmistavassa teollisuudessa. Työn tavoitteena on myös selvittää myös digitaalisen kaksosen konseptin haasteita ja mahdollisuuksia sekä tuotekehityksen, ennustamisen kuin myös työntekijöiden näkökulmista valmistavassa teollisuudessa.

Digitaalinen kaksonen ei ainoastaan anna reaaliaikaista tietoa päätöksenteon tueksi vaan se voi myös ennustaa laitteen tulevaa kehitystä tai käyttäytymistä. Tekniikan ja lääketieteen alojen sulautuminen luo älykkään ja yhdistyneen yhteiskunnan perustan. Älykkäät puettavat laitteet, terveystietojen järjestelmällinen tallentaminen ja yksilöidyt ja kohdennetut lääkkeet ovat terveysalojen tärkeimmät uudet teknologiat. Psykologit ovat ottaneet käyttöön aktigrafeja ennustamaan kaksisuuntaisen mielialahäiriön eri jaksojen puhkeamista. Meteorologialaitokset hyödyntävät lyhyen ja pidemmän aikavälin sääennusteiden tekemiseen tarvittavia alueiden malleja, täsmällisiä simulaatioita ja monista lähteistä tulevaa isoa dataa. Teollisessa valmistuksesta koituvien kustannuksien laskeminen ja lyhyihin toimitusaikoihin pyrkiminen ovat saaneet teollisuuden ja prosessiteknologia yritykset arvioimaan uudestaan digitaalisen kaksosen konseptia. Digitaalinen kaksonen voi tarjota henkilökohtaisemman ja tehokkaamman koulutuksen erilaisille opiskelijoille ilman lisäkuluja. Se voi myös tarjota älykkäitä ratkaisuja niin rakennus- ja energia-alalla, kuin apua maantietokuljetuksiin minimoimalla polttoaineen kulutusta suunnittelemalla ennalta liikenteen reitit.

Digitaalisen kaksosen haasteena on toimiva kaksisuuntainen yhteys fyysisen hyödykkeen ja siitä mallinnetun digitaalisen kaksosen välillä. Kaksisuuntaiseen yhteyden suurimmat haasteet ovat fyysisen laitteen anturitietojen ajallinen erottelu, viive sekä suuri datan määrä. Toisaalta ongelmia ovat myös digitaalisessa kaksosessa käytettävän datan luotettavuus, oikeellisuus ja sen nopea arkistointi. Fyysiset hyödykkeet, joille voidaan tehdä digitaalisia kaksosia, vaativat korkeaa turvallisuustasoa. Tästä syystä haaste on myös datan avoimuus ja tulkittavuus digitaalisen kaksosen pohjalta tehtävän päätöksenteon tueksi. Digitaalinen kaksonen on esiteltävä käyttäjälle erottamattomana mallina fyysisestä hyödykkeestä. Malli tulee olla loppukäyttäjälle sellainen, jota on mahdollista helposti ja vaistonvaraisesti ohjata. Digitaalisen kaksosen avulla on mahdollista kerätä informatiivista tietoa fyysisen laitteen tilasta, suorituskyvystä, huollon tarpeesta ja prosessin optimoimisesta. Tuotantojärjestelmien turvallisuuden parantamiseksi sekä huoltoaikojen ja -kustannuksien vähentämiseksi on tärkeää, että järjestelmä osaa ennakoida ja ymmärtää prosessissa tapahtuvia muutoksia. Digitaalista kaksosta on mahdollista käyttää koko tuotteen elinkaaren suunnitteluun.

Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy:n mukaan digitaalisen kaksosen käytännön sovellukset ovat edelleen harvinaisia. Tämä johtuu edellä mainituista digitaalisen kaksosen haasteista, joita ovat muun muassa reaaliaikaisuuteen sopeutuminen, mallin huoltaminen ja kalibrointi.

Avainsanat: Digitaalinen kaksonen, Neljäs teollinen vallankumous, Digitalisaatio

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ALKUSANAT

Tämä kandidaatintyö käsittelee digitaalista kaksosta konseptina ja valmistavan teollisuuden tukena. Haluan kiittää tämän työni ohjaajaa Mikko Salmenperää koko työn aikana antamista avuista. Apu oli erityisen tärkeää tutkielman aiheen valitsemisessa ja itse työn alkuun pääsemisessä. Työn loppuun saattamiseksi yhteinen tapaaminen Salmenperän kanssa oli kannustava ja motivoiva. Kiitän myös kanssaopiskelijoita työni opponoinnista ja erityisesti ystäviäni tsemppaavasta tuesta tämän projektin eteen.

Tampereella, 05.05.2021

Tuomas Tiura

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO.....	1
1.1 Gartnerin hypekäyrä	1
1.2 Tutkimuksen tavoitteet ja työn rajaaminen	2
1.3 Työn tutkimuskysymykset.....	3
2. DIGITAALINEN KAKSONEN OSANA TEOLLISTA VALLANKUMOUSTA 4.0	4
2.1 Teollinen vallankumous 4.0	4
2.2 Digitaalinen kaksonen käsitteenä	5
2.3 Digitaalisen kaksosen kehitys.....	5
3. DIGITAALISEN KAKSOSEN HYÖDYT	7
3.1 Digitaalisen kaksosen arvo	7
3.2 Digitaalisen kaksosen hyödyntäminen aloittain	8
3.2.1 Terveysthuolto	8
3.2.2 Meteorologia	9
3.2.3 Valmistava teollisuus ja prosessiteknologia.....	9
3.2.4 Koulutus.....	9
3.2.5 Rakennus- liikenne- ja energia-ala	10
4. DIGITAALISEN KAKSOSEN HAASTEET	11
4.1 Digitaalisen kaksosen haasteet	11
4.2 Haasteiden ratkaiseminen	12
5. VALMISTAVA TEOLLISUUS	15
5.1 Valmistava teollisuus käsitteenä, Teollisuus 4.0 ja Lean.....	15
5.2 Digitaalinen kaksonen osana valmistavaa teollisuutta.....	16
5.3 Digitaalinen kaksonen tuotekehityksen ja ennustamisen apuna	17
5.4 Digitaalinen kaksonen ja yhteistyö ihmisten kanssa.....	18
6. YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET	20
LÄHTEET	22

TÄRKEIMMÄT KÄSITTEET

Aktigrafi	Laite, jolla voidaan mitata esimerkiksi vuorokausirytmien häiriöitä
BCG	Boston Consulting Group
Big data	Massadata, osa teollisuus 4.0:aa
Blockchain	Lohkoketju
Digitaalinen kaksonen	engl. Digital Twin, fyysisestä hyödykkeestä tarkka virtuaalinen malli
Digitalisaatio	engl. Digital transformation, digitaalisen tietotekniikan yleistyminen
Intralogistiikka	sisäisen materiaalivirran organisointia, hallintaa, toteutusta, optimointia, tiedonkulkua ja tavaroiden käsittelyä
Kanban-taulut	Osa Kanban-menetelmää
Lean	Ajattelutapa, jonka tarkoituksena on poistaa kaikki tarpeettomat toiminnot, virtaviivaistamalla prosessia ja luomalla standardeja rutiineja.
NASA	engl. National Aeronautics and Space Administration, Yhdysvaltain liittohallituksen alainen avaruusjärjestö
Teollisuus 4.0	engl. Industry 4.0, Neljäs teollinen vallankumous
VTT Oy	Teknologian tutkimuskeskus VTT

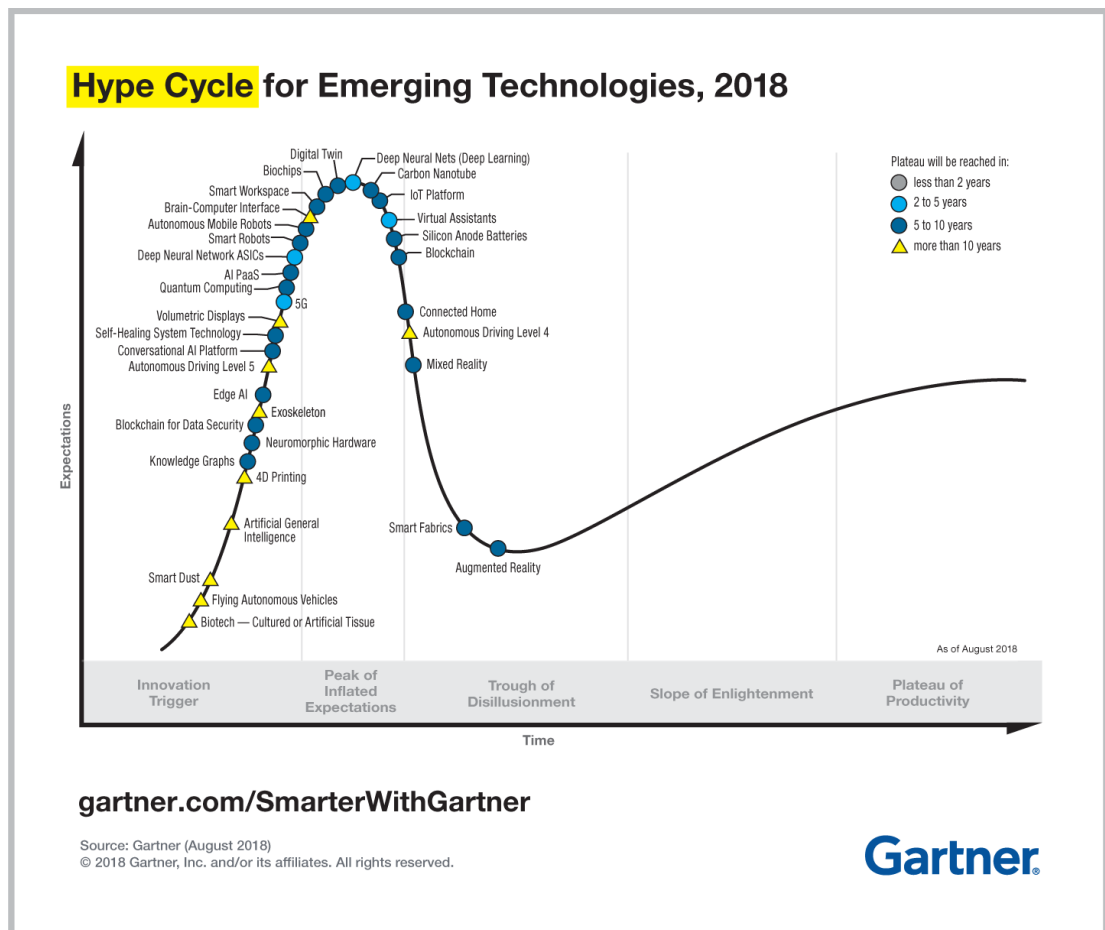
1. JOHDANTO

Tämä kandidaatintyö liittyy taustalla olevaan digitalisaation kehitykseen. Työ tarkastelee digitaalista kaksosta konseptina, ja osana valmistavaa teollisuutta. Tutkielman aihe on hyvin ajankohtainen, sillä digitaalinen kaksonen on osa neljättä teollista vallankumousta. Teollinen vallankumous on 2000-luvun puhutuimpia asioita teollisuuden yrityksissä. Esi-
neiden, laitteiden ja koneiden yhdistäminen Internetin välityksellä on neljännen teollisen vallankumouksen perusta.

1.1 Gartnerin hypekäyrä

Vuonna 2018 julkaistussa Gartnerin hypekäyrässä, kuvassa yksi, on esiteltynä digitaalinen kaksonen yhtenä nopeimpana kasvavana teknologiatrendinä. Käyrässä on myös esitelty muita teollisuuden uusia teknologioita. Gartnerin hypekäyrä kuvataan aaltona, jossa verrataan kehitteillä olevien teknologioiden odotuksia tuottavuuteen suhteessa aikaan.

Gartnerin hypekäyrässä teknologian alkuvaiheella tapahtuu innovaation laukaisu, ja sitä seuraa nopeasti kasvavat tuotto-odotukset. Uusi teknologia saavuttaa lopulta suureksi kasvaneiden odotusten huipun. Huipun jälkeen teknologian odotukset vähenevät merkittävästi. Vähentämisen jälkeen odotukset alkavat kasvamaan maltillisesti, ja teknologia saavuttaa lopulta hyvän tuottavuuden. Digitaalinen kaksonen on aivan käyrän huipulla vuonna 2018, ja käsite on herättänyt mielenkiintoa jo 2010-luvun alussa. Kuvassa 1 on myös arvioitu digitaalisen kaksosen saavuttavan tuottavuuden 5–10 vuoden kuluessa.



Kuva 1: Gartnerin hypekäyrä 2018 (Gartner 2018)

1.2 Tutkimuksen tavoitteet ja työn rajaaminen

Tämä työ on kirjallisuusselvitys digitaalisen kaksosen konseptista. Digitaalinen kaksosen on käsitteenä hyvin laaja, ja teknologian uutuuden takia tutkimusta aiheesta on vielä vähän. Digitaalista kaksosta on mahdollista hyödyntää monilla eri aloilla, joten tämän työn kannalta on rajattava aihe käsittelemään teknologiaa haasteiden ja valmistavan teollisuuden näkökulmasta.

Työssä esitellään konseptin kehityksen ohella myös digitaalisen kaksosen käyttömahdollisuuksia eri aloilla. Tässä työssä käydään läpi digitaalisen kaksosen kehitystä osana teollista vallankumousta. Työn tavoitteena on selvittää digitaalisen kaksosen konseptin haasteita ja mahdollisuuksia niin yleisesti, kuin myös valmistavan teollisuuden näkökulmasta.

1.3 Työn tutkimuskysymykset

Tämän työn avulla on tarkoitus vastata seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

1. Mikä on digitaalinen kaksonen ja miten sitä on mahdollista hyödyntää erilaisilla toimialoilla?
2. Mitkä ovat yleiset haasteet digitaalisella kaksosella ja miten teknologia tulee hyödyttämään valmistavaa teollisuutta?
3. Miten digitaalinen kaksonen vaikuttaa tuotekehitykseen, tuotannon ennustamiseen ja tehtaiden työntekijöiden rooliin?

Työ käsittelee tutkimuskysymyksiä kolmessa osassa. Ensimmäisessä osassa käsitellään digitaalisen kaksosen konseptia osana teollista vallankumousta. Tarkoituksena on esitellä teollinen vallankumous ja digitaalinen kaksonen käsitteenä ja konseptin kehityksen historia. Toisessa osassa tarkoituksena on tunnistaa digitaalisen kaksosen konseptin arvo, haasteet ja selvittää teknologian hyödyntäminen aloittain. Kolmannessa osassa keskitytään digitaalisen kaksosen mahdollisuuksiin valmistavassa teollisuudessa. Digitaalisen kaksosen mahdollisuuksia selvitetään myös niin tuotekehityksen, ennustamisen kuin myös työntekijöiden näkökulmista. Lopuksi työssä on yhteenveto, jossa vastataan tutkimuskysymyksiin.

2. DIGITAALINEN KAKSONEN OSANA TEOLLISTA VALLANKUMOUSTA 4.0

Tässä luvussa esitellään neljäs teollinen vallankumous sekä digitaalinen kaksonen osana sitä. Teollinen vallankumous 4.0 on ensimmäisessä alaluvussa, toisessa alaluvussa käsitteen digitaalinen kaksonen esittely ja kolmannessa käsitellään digitaalisen kaksosen kehityshistoriaa.

2.1 Teollinen vallankumous 4.0

Teollisuus 4.0 tai englanniksi *Industry 4.0* -termiä on käytetty ensimmäisen kerran vuonna 2011 Saksassa Hannover Fair -tapahtumassa. Tapahtuma on yksi Saksan suurimmista teollisuusteknologiatapahtumista. Kolme edellistä teollista vallankumousta sijoittuvat viimeisen 200 vuoden ajalle. (Drath & Horch 2014) Höyrykoneen, tuotantolinjan ja automaation jälkeen seuraavaksi teolliseksi vallankumoukseksi on kutsuttu teollisuus 4.0. Se on nykyisten teollisuuden tekniikoiden sekä tieto- ja viestintätekniikoiden fuusio (Haag & Anderl 2018). Teollisuus 4.0 on neljäs teollinen vallankumous, johon liittyy internetteknologioiden käyttäminen teollisuudessa (Drath & Horch 2014). Digitalisaatio ei tule pysähtymään ainoastaan tehdastasolle vaan älykkäät tehtaot tulevat valmistamaan älykkäitä tuotteita. Hintojen lasku ja modernin teknologian käyttäminen tuotteiden valmistusprosessiin mahdollistavat tieto-, viestintä- ja anturitekniikoiden integroimisen tuotteisiin. Tuotteet, joissa on anturi, voivat kommunikoida oman tilansa ja ympäristön kanssa. Nämä tiedot mahdollistavat digitaalisen kaksosen luomisen. (Haag & Anderl 2018)

Teollisuus 4.0 on yleinen termi digitalisaation useille käsitteille, kuten esineiden internet (IoT) ja digitaalinen kaksonen. Nämä konseptit osana teollisuus 4.0:aa lupaavat uusia mahdollisuuksia tuotannon suunnitteluun ja hallintaan. Tehtaista siis tulee digitaalisia ja joustavia, mikä tarkoittaa jatkuvaa ja välitöntä viestintää eri työasemien ja tuotantolinjoin integroitujen työkalujen välillä. Teollisuus 4.0:n myötä tietojen keräämiseen käytetään erilaisia simulaatioita ja tietojenkäsittelyvälineitä. Tehtaista tulee energia- ja resurssitehokkaita käyttämällä jatkuvaa tiedonvaihtoa tarpeista ja niiden saatavuudesta. Uudet älykkäät tehtaot mahdollistavat myös paremman asiakaspalvelun joustavuudellaan ja resurssien optimoimiskyvyllään. Teollisuus 4.0 on kuitenkin valmistavan teollisuuden yrityksille haaste mukauttaa tuotantojärjestelmiään. (Pawlewski et al. 2021)

BCG:n raportin mukaan teollisuus 4.0 nähdään yhdeksän digitaalisen tekniikan lähenty-misenä. Näitä ovat big data ja analytiikka, kyberturvallisuus, esineiden teollinen internet (IoT), simulointi, lisätty todellisuus, materiaalia lisäävä valmistus, autonomiset robotit, pilvipalvelut ja horisontaalisen ja vertikaalisen järjestelmän integroiminen. (Lorenz et al. 2015)

2.2 Digitaalinen kaksonen käsitteenä

Digitaalinen kaksonen (engl. *Digital Twin*) on virtuaalinen esitys fyysisestä hyödykkeestä. Kyseisen hyödykkeen data ja simulaatio mahdollistavat reaaliaikaisen ennustamisen, optimoinnin, seurannan ja hallinnan. Digitaalinen kaksonen tukee näin päätöksentekoa. (Rasheed et al. 2020) Digitaalisen kaksonen käsitteen on muodostanut John Vickers ja Dr. Michael Grieves (Haag & Anderl 2018). Dahmen ja Rossmann (2018) tiivistävät digitaalisen kaksonen käsitteen artikkelissaan virtuaaliseksi esitykseksi reaali-maailman hyödykkeestä. Se heijastaa hyödykkeen kaikkia staattisia ja dynaamisia omi-naisuuksia. (Dahmen & Rossmann 2018) Digitaalinen kaksonen tuo arvoa jäljentämällä yksityiskohtaisesti fyysisen prototyypin (Yusen et al. 2018).

Digitaalinen kaksonen ei ainoastaan anna reaaliaikaista tietoa päätöksenteon tueksi, vaan se voi myös ennustaa laitteen tulevaa kehitystä tai käyttäytymistä. Ideaalissa ta-pauksessa digitaalista kaksosta on mahdoton erottaa fyysisestä hyödykkeestä niin ulko-näön kuin käyttäytymisen suhteen. Digitaalinen kaksonen onnistuu siten paremmin te-kemään ennusteita tulevaisuudesta. (Rasheed et al. 2020) Digitaalista kaksosta voidaan hyödyntää tuotteiden jokaisessa elinkaarivaiheessa. Ehtona on kuitenkin, että vaiheet perustuvat tietokoneohjattuihin simulaatioihin. (Haag & Anderl 2018)

2.3 Digitaalisen kaksonen kehitys

Digitaalisen kaksonen konsepti on peräisin National Aeronautics and Space Administra-tion eli NASAn Apollo-ohjelmasta. Ohjelmassa rakennettiin kaksi identtistä avaruus-alusta, jotta avaruusalusten olosuhteita voitiin mallintaa operaation aikana. Maassa py-synyttä avaruus-alusta kutsuttiin kaksoseksi. Kaksosta käytettiin astronauttien koulutuk-siin ennen lentoa. Myös lennon aikana kaksonen avulla simuloitiin erilaisia vaihtoehtoja käytettävissä olevien lentotietojen mukaan. Simulointitekniikan kasvun vuoksi voitiin yhä useammat fyysiset komponentit korvata virtuaalisilla osilla. Tämä johti siihen, että kaikkia komponentteja ei tarvitse olla saatavilla aikaisessa kehitysvaiheessa. Konseptia kutsut-tiin rautalinnuksi (engl. Iron Bird). Rautalintu-idean jatkaminen komponenttien jokaiseen

elinkaaren vaiheeseen on johtanut lopulta koko fyysisen järjestelmän korvaamiseen digitaalisella mallilla. (Rosen et al. 2015)

Digitaalista kaksosen on maininnut ensi kerran Michael Grieves vuonna 2000 valmistavan teollisuuden kontekstissa (Rasheed et al. 2020). Grieves esitteli koko konseptin ensimmäistä kertaa Tuotteen elinkaaren hallinta -kurssillaan vuonna 2003. Digitaalisen kaksosen konseptiin ehdotettiin sisällytettävän kolme osaa, jotka ovat fyysinen tuote, virtuaalinen tuote ja niiden väliset yhteydet. Vuonna 2012 NASA määritteli digitaalisen kaksosen uudestaan monifysikaaliseksi, monitaajuiseksi ja todennäköisyysperusteiseksi nopeaksi simulaatioksi, joka perustuu historiadataan, reaaliaikaiseen anturitietoon ja fyysiseen malliin. (Tao et al. 2019a)

Digitaalisen kaksosesta on myös erilaisia käsityksiä. Osa tutkijoista uskoo, että digitaalisen kaksosen tutkimuksen tulisi keskittyä simulointiin. Osa väittää, että digitaalisen kaksosen tutkimuksen tulee sisältää kolme ulottuvuutta: fyysinen, virtuaalinen ja yhdistävät osat. Lisäksi kolmiulotteisen mallin perusteella täydellisen digitaaliselle kaksoselle pitäisi sisältyä tutkijoiden mukaan viisi ulottuvuutta, jotka ovat fyysinen osa, virtuaaliosa, yhteydet, data ja palvelut. (Tao et al. 2019a)

Muutamit teollisuuden yritykset ja järjestöt ovat hyödyntäneet digitaalista kaksosta jo aikaisemmin ennen kuin tarkka määritelmä julkaistiin. Esimerkkejä digitaalisen kaksosen käyttämisestä ilman suoraa mainintaa ovat potilaiden terveystietojen käsitteleminen ja erilaiset reaaliaikaiset seurantajärjestelmät, kuten vuotojen havaitseminen öljy- ja vesijohdoissa. Digitaalista kaksosta on myös käytetty sekä satelliittien ja avaruusasemien kauko-ohjaukseen, että myös niiden huoltamiseen. (Rasheed et al. 2020) Ennen Teollisuus 4.0:n nousua digitaalisen kaksosen käsitettä on määritetty lentokoneollisuuden avulla. Tutkijat ovat keskittyneet lentokoneollisuudessa rakenne- ja materiaalitekniikkaan. Näiden tietojen avulla painopiste on ollut ilma- ja avaruusalusten suorituskyvyn pitkän aikavälin ennustamisessa. Teollisuus 4.0:n nousun jälkeen kiinnostus siirtyi valmistukseen ja älykkäisiin tuotteisiin. (Haag & Anderl 2018) Digitaalisen kaksosen kehitystä edisti sen mahdollisuus hyödyntämiseen monilla eri teollisuudenaloilla. Vuosina 2017 ja 2018 Gartner (Gartner 2017) luokitteli digitaalisen kaksosen kymmenen lupavimman teknologisen trendin joukkoon seuraaviksi vuosikymmeniksi. (Tao et al. 2019a)

3. DIGITAALISEN KAKSOSEN HYÖDYT

Tässä luvussa esitellään digitaalisen kaksosen tuomat hyödyt. Ensimmäisessä alaluvussa käsitellään digitaalista kaksosta yleisesti. Toisessa luvussa on esitelty digitaalisen kaksosen hyödyntämistä toimialoittain.

3.1 Digitaalisen kaksosen arvo

Digitaalinen kaksonen voi olla käytettävissä missä tahansa. Täten se mahdollistaa järjestelmän suorituskyvyn seuraamisen lisäksi myös sen ohjaamisen saadun palautteen perusteella etäyhteydellä. Digitaalinen kaksonen tarjoaa myös tehokkaamman ja paremman informaation päätöksenteon tueksi. Digitaalisen kaksosen tarjoaman reaaliaikaisen tiedon ja edistyneiden analyttikoiden avulla voidaan tehdä tietoon perustuvia nopeita päätöksiä. (Rasheed et al. 2020)

Laitteiden tietojen analysoinnin avulla järjestelmien viat voidaan havaita hyvissä ajoin. Tällöin on mahdollista suunnitella paremmin laitteiden huollot ja aikatauluttaa ne realistisiksi. Digitaalisen kaksosen hyötyihin kuuluvat myös tarkemmat riskienarvioinnit ja -skenaariot. Digitaalista kaksosta voidaan häiritä odottamattomilla skenaarioilla, joita ei todellisille ominaisuuksille ja laitteille voisi tehdä. (Rasheed et al. 2020)

Digitaalinen kaksonen tarjoaa myös paremman tehokkuuden ja turvallisuuden (Rasheed et al. 2020). Ennen kuin fyysisellä hyödykkeellä tehdään kokeita, digitaalisen kaksosen avulla voidaan turvallisesti arvioida parametrien ja raja-arvojen muutosten seurauksia (Dahmen & Rossmann 2018). Myös vaaralliset, tylsät ja likaiset työpaikat kohdistetaan robotteihin, joita ihmiset voivat ohjata etäyhteyden avulla (Rasheed et al. 2020). Konseptin käyttäminen siis parantaa turvallisuutta ja vastaa myös ympäristöstä tuleviin ja sosiaalisiin haasteisiin. Digitaalinen kaksonen voi välittää ihmiselle varoituksen tarvittaessa tai jopa suorittaa itse tarvittavat toimenpiteet. (Yusen et al. 2018) Digitaalinen kaksonen luo ihmisille mahdollisuuden keskittyä luovampiin ja innovatiivisempiin työpaikkoihin. (Rasheed et al. 2020)

Digitaalisen kaksosen sanotaan lisäävän tuottavuutta, koska paremman automatisoinnin ja informaation saatavuuden vuoksi käyttäjät voivat käyttää enemmän aikaa työntekijöiden yhteistyön parantamiseen. (Rasheed et al. 2020) Digitaalisen kaksosen konseptin käyttö antaa mahdollisuuden optimoida paremmin hyödykkeen taloudellisuutta, säästää aikaa ja vähentää näin kokonaiskustannuksia (Yusen et al. 2018). Tuotteet ja palvelut

voidaan myös räätälöidä helposti digitaalisen kaksosen avulla tehtaissa. Markkinat kehittyvät jatkuvasti, ja räätälöidyt tuotteet sekä palvelut eri segmenteille muuttuvat nopeasti. (Rasheed et al. 2020) Digitaalinen kaksosen vastaa siis näihin markkinoiden luomiin haasteisiin. Digitaalisen kaksosen reaaliaikainen informaatio yhdistettynä automaattiseen raportointiin parantaa dokumentaatiota ja viestintää eri sidosryhmille, kuten osakkeiden omistajille. (Rasheed et al. 2020)

Päätavoitteena digitaaliselle kaksoselle on sen toimiminen automaattisesti ja jatkuvasti vaihtaen dataa fyysisen kaksosen kanssa. Tämä mahdollistaa digitaalisen kaksosen tekniikan käyttämisen monenlaisille tuotteille ja erilaisiin käyttökohteisiin. (Haag & Anderl, 2018) Digitaalisen kaksosen viimeaikainen kasvanut suosio liittyy helposti saataviin halpuihin ja pieniin antureihin. Nämä anturit voivat tallentaa tekstiä, ääntä, RGB-kuvia ja hyperspektrikuvia. Anturit on mahdollista asentaa liikkuviin ajoneuvoihin, droneihin, pieniin satelliitteihin ja vedenalaisiin laitteisiin. (Rasheed et al. 2020)

Kokeellisen digitaalisen kaksosen yhdistäminen kattavaan kokonaisjärjestelmän simulaatioon voi vähentää tarvittavien työkalujen määrää, ja siten nopeuttaa ja kehittää teknistä järjestelmää. Virtuaalisen prototyypin testitulokset antavat luotettavan lausunnon laadusta ja vähentävät yleensä laitteistoprototyyppien määrää, jotka ovat kalliita. Simulointipohjainen kokeellinen digitaalinen kaksosen vähentää myös erittäin kalliiden järjestelmien suunnitteluvirheiden riskiä. (Dahmen & Rossmann 2018)

3.2 Digitaalisen kaksosen hyödyntäminen aloittain

Tässä kappaleessa esitellään digitaalisen kaksosen hyödyntämistä aloittain. Digitaalisen kaksosen käyttökohteita on esitelty terveydenhoidon sektorilta, meteorologiasta, prosessiteollisuudesta ja prosessiteknologiasta. Digitaalisen kaksosen käyttökohteita on myös esitelty koulutussektorilla ja rakennus-, liikenne- ja energia-aloilla.

3.2.1 Terveydenhuolto

Terveydenhuollon sektorit tulevat hyötymään digitaalisen kaksosen konseptista. Tekniikan ja lääketieteen alojen sulautuminen luo älykkään ja yhdistyneen yhteiskunnan perustan.

Älykkäät puettavat laitteet, terveystietojen järjestelmällinen tallentaminen ja yksilöidyt ja kohdennetut lääkkeet ovat terveysalojen tärkeimpiä uusia teknologioita. Rasheed et al. mainitsee artikkelissaan muun muassa psykologien ottaneen käyttöön aktigrafeja ennustamaan kaksisuuntaisen mielialahäiriön eri jaksojen puhkeamista. (Rasheed et al. 2020)

Aktigrafi on laite, esimerkiksi älykello, jota käytetään vuorokausirytmien häiriöiden ja uni-valve-käyttäytymisen selvittelyyn (KSSHP 2020).

3.2.2 Meteorologia

Meteorologian laitokset ympäri maailmaa ovat ottaneet käyttöön laajasti digitaalisen kaksosen konseptin. Laitokset hyödyntävät lyhyen ja pidemmän aikavälin sääennusteiden tekemiseen tarvittavia alueiden malleja, täsmällisiä simulaatioita ja monista lähteistä tulevaa big dataa.

Rasheed et al. mainitsee artikkelissa digitaalisen kaksosen menestykseen meteorologian alalla vaikuttaneen sen, että meteorologisten palveluiden laatu on vielä varsin heikkoa ja kehitettävää löytyy paljon. Alalla on paljon kehittymisen ja parantamiseen varaa paikoissa, jossa ei ole tarpeeksi sääasemia tai kerättyä tietoa. Parantamalla numeerista mallinnusta, tiedonkeruuta ja data-analytiikkaa voidaan kehittää myös näihin paikkoihin tehtäviä tarkkoja sääennustuksia. (Rasheed et al. 2020)

3.2.3 Valmistava teollisuus ja prosessiteknologia

Valmistava teollisuus ja prosessiteknologian yritykset ovat käyttäneet digitaalista kaksosta jo ennen kuin ovat maininneet siitä erikseen. Yritykset ovat digitalisaation kehityksen vuoksi mukauttaneet tuotantoa ja valmistustyyliään. Tähän on vaikuttanut myös asiakkaiden tarpeet korkealaatuisista ja yksityiskohtaisesti räätälöidyistä tuotteista, joiden kysyntä on hyvin vaihtelevaa. (Rasheed et al. 2020)

Valmistuksesta koituvien kustannusten alentaminen ja pyrkimys lyhyisiin toimitusaikoihin ovat saaneet teollisuuden yritykset arvioimaan uudestaan digitaalisen kaksosen konseptia. Teollisuuden yritykset yrittävät sisällyttää uusimmat teknologiat osaksi liiketoimintaansa. (Rasheed et al. 2020)

3.2.4 Koulutus

Digitaalista kaksosta on mahdollista hyödyntää myös ihmisten koulutuksessa. Digitaalinen kaksonen voi tarjota henkilökohtaisemman ja tehokkaamman koulutuksen erilaisille opiskelijoille. (Rasheed et al. 2020)

Yliopistojen keräämää tietoa opiskelijoiden luonteesta, kyvyistä ja kiinnostuksen kohteista hyödynnettäisiin tarjoamaan personoidumpaa opetusta ilman lisäkuluja. Tiettyjen

kykyjen omaavien opiskelijoiden valmentaminen tulevaisuuden haasteisiin onnistuisi paremmin yhdistämällä koulutussektorin digitaaliset kaksoset eri teollisuudenalojen kanssa. (Rasheed et al. 2020)

3.2.5 Rakennus- liikenne- ja energia-ala

Digitaalisen kaksosen kannalta relevantit teknologiat pystyvät tarjoamaan älykkäitä ratkaisuja niin rakennus- kuin energia-alalla. Digitaalisen kaksosen hyödyntäminen asuinrakennusten suunnittelussa johtaa rakentamisen ja suorituskyvyn parempaan arvointiin ja sen kehittämiseen. Digitaalista kaksosta voidaan käyttää apuna myös kaupunkisuunnittelussa, jossa luodaan virtuaalinen malli kaupungista. Konseptin avulla on myös pyritty osallistuttua asukkaita mukaan suunnitteluun. (Rasheed et al. 2020) Esimerkki digitaalisen kaksosen hyödyntämisestä käytännössä löytyy Suomesta. Hämeenlinnan kaupunki on järjestänyt suunnittelukilpailun osallistaen kaupunkilaisia mukaan suunnittelemaan kaavoitusta Cities Skyline -pelin avulla (Välimäki 2016).

Digitaalisesta kaksosesta on esitetty olevan apua maantiekuljetuksissa. Sen avulla voidaan minimoida polttoaineen kulutusta suunnittelemalla ennalta liikenteen reitit. Lennonjohdon haasteisiin on myös esitetty digitaalisen kaksosen hyödyntämistä. Teollisuus 4.0:n tekniikoita on myös tarkasteltu öljy- ja kaasualalla. Älykkäiden tehtaiden energiatehokkuuden parantamiseksi, tuotantokustannusten sekä kasvihuonepäästöjen vähentämiseksi on esitetty digitalisaation tuomia tekniikoita. (Rasheed et al. 2020)

4. DIGITALISEN KAKSOSEN HAASTEET

Digitaalista kaksosta voidaan käyttää monilla eri sovellusalueilla. Digitaalisen kaksosen tulee vastata moniin haasteisiin aika-, turvallisuus- ja tehtäväkriittisesti. (Rasheed et al. 2020) Ensimmäisessä alakohdassa esitellään digitaalisen kaksosen haasteita. Toisessa alakohdassa esitellään teknologioita, joilla haasteet voidaan ratkaista.

4.1 Digitaalisen kaksosen haasteet

Digitaalisen kaksosen haasteina ovat toimiva kaksisuuntainen yhteys fyysisen hyödykkeen ja mallinnetun digitaalisen kaksosen välillä. Tähän liittyen suurimmat haasteet liittyvät fyysisen laitteen anturitietojen ajalliseen erotteluun, viiveeseen sekä datan suureen määrään. Haasteita ovat myös digitaalisessa kaksosessa käytettävissä olevan datan suuri valikoima, datan luotettavuus ja oikeellisuus sekä sen nopea arkistointi. (Rasheed et al. 2020)

Toinen haaste syntyy, kun fyysinen hyödyke kehittyy ajan kuluessa. Se vaatii samanaikaisesti siitä tehtyjen digitaalisten mallien kehittymistä. Digitaalisen kaksosen on kehitettävä samassa suhteessa fyysisen hyödykkeen kanssa säilyttäen silti yhteensopivuuden. (Rasheed et al. 2020) Väärässä suhteessa kehittynyt digitaalinen kaksonen voi vaikuttaa fyysisen hyödykkeen epävarmaan ennustamiseen esimerkiksi hyödykkeen huoltosuunnitelmaan.

Digitaalinen kaksonen vaatii korkeaa turvallisuustasoa. Tästä syystä kolmas haaste on avoimuuden ja tulkittavuuden lisääminen digitaalisen kaksosen pohjalta tehtävän päätöksenteon tueksi. Tämä edellyttää digitaalisesta kaksosesta hyvin tulkittavia ja fyysisesti johdonmukaisia malleja. (Rasheed et al. 2020) Tao ja Qi esittävät, että digitaalisen kaksosen kehittämisen esteinä ovat myös tiedon jakamisen ongelmat. Teollisuuden ja korkeakoulujen välillä on vain vähän yhteistyötä johtuen osittain liikesalaisuuksista. (Tao & Qi 2019)

Neljäntenä haasteena on digitaalisen kaksosen käyttäjäystävällisyys loppukäyttäjälle. Digitaalinen kaksonen on esiteltävä käyttäjälle erottamattomana mallina fyysisestä hyödykkeestä. Mallin tulee olla loppukäyttäjälle helposti ja vaistonvaraisesti ohjattava. (Rasheed et al. 2020) Taulukossa 1 on esiteltynä digitaalisen kaksosen haasteita sekä niihin vastaavat tekniikat.

Monet yritykset käyttävät jo digitaalisia kaksosia ongelmien havaitsemiseen ja tehokkuuden parantamiseen. Kuitenkin digitaalisen kaksosen kehittäminen on vieläkin haastavaa.

Aikaisemmin ei ole ollut olemassa yhteisiä menetelmiä, standardeja tai normeja digitaalisten mallien rakentamiseen. Esimerkiksi tuhansien anturitietojen yhdistäminen voi olla myös haastavaa ja vaikeaa. (Tao & Qi 2019)

Haasteet	Mahdollistavat tekniikat
Tietojen hallinta, tietojen yksityisyys ja turvallisuus, tietojen laatu	Digitaalinen alusta, salaus- ja lohkoketju-tekniikat ja big data –tekniikat
Reaaliaikainen tiedonsiirto ja viive	Tiedon pakkaaminen, uudet viestintätekniikat (5G) ja esineiden internet (IoT).
Fyysinen realistisuus ja tulevaisuuden ennusteet	Sensoritekniikka, erittäin tarkat fysiikkaan perustuvat simulaatiot ja dataan perustuvat tekniikat
Reaaliaikainen mallinnus	Hybridianalyysi ja mallinnus, suppean tilauksen mallinnus ja monimuuttujiin pohjautuvat tietopohjaiset mallit.
Jatkuvat mallipäivitykset, tuntemattoman mallintaminen	Big data -kybertekniikka, hybridianalyysi ja mallinnus ja tietojen yhdistäminen
Avoimuus ja tulkittavuus	Hybridianalyysi ja mallinnus sekä selitettävä tekoäly
Suuren mittakaavan laskenta	Laskennallinen infrastruktuuri ja IoT mahdollistavat pilvipalvelut
Vuorovaikutus fyysisen hyödykkeen kanssa	Ihmisen ja koneen rajapinta, normaalin kielen käsittely, visualisointi lisätyn todellisuuden ja virtuaalitodellisuuden kanssa

Taulukko 1 Digitaalisen kaksosen haasteet ja niiden ratkaisemisen mahdollistavat teknologiat (Rasheed et al. 2020)

4.2 Haasteiden ratkaiseminen

Kohdassa 4.1 esiteltiin monia haasteita digitaaliselle kaksoselle. Viisi teknologista pääkategoriaa esitellään haasteiden ratkaisemiseksi. Nämä ovat fysiikkaan perustuva, dataan perustuva, big data –kybertekniikka, infrastruktuuri ja alustat sekä rajapinta ihmisen ja koneen välillä.

Fysiikkaan perustuva mallinnus on fyysisen ilmiön havainnoimista ja sen ymmärtämistä. Näiden perusteella luodaan matemaattinen malli ja lopulta ratkaistaan se. Fysiikkaan perustava mallinnus voidaan jakaa karkeasti kokeelliseen ja numeeriseen mallintamiseen.

Kokeellinen mallintaminen laboratoriossa edellyttää täysimittaisen kokeen tai prosessin. Kokeellisen mallintamisen avulla voidaan kehittää malleja myös ilmiöistä, joita ei voida suoraan mitata tai joiden mittaaminen olisi liian kallista. Tällöin voidaan käyttää digitaalista kaksosta hyväksi. Esimerkiksi virtauksien fysiikan ymmärtämiseksi voidaan tehdä kokeita tuulitunnelissa, ja tuloksien avulla on yksinkertaistaa parametreja, joita voidaan käyttää mallinnuksessa apuna. 3D-mallinnus on prosessi, joka mahdollistaa minkä tahansa objektin matemaattisen esityksen. 3D-mallit ovat digitaalisen kaksosen lähtökohтия. Mallin laatu on erityisen tärkeää, koska 3D-malli syötetään fyysisiin simulaatioihin. (Rasheed et al. 2020)

Digitaalisen kaksosen tulee vastata fyysisistä hyödykettä, ja siksi fyysikaalisen mallinnuksen avulla johdetut yhtälöt tulee myös ratkaista. Yksinkertaisten yhtälöihin on mahdollista johtaa analyyttinen ratkaisu, mutta monimutkaisemmat yhtälöt vaativat ratkaisemista tietokoneen avulla. Menetelmiä kutsutaan diskreettisiksi tekniikoiksi. Dataan perustuva mallinnus perustuu olettamukseen, että data on sekä tunnetun että tuntemattoman olemuksen ilmentymä. Kehittämällä tietopohjaista mallia voidaan ottaa huomioon koko fyysinen ja ei-fyysinen olemus. (Rasheed et al. 2020)

Digitaalisen kaksosen on vastattava datan keräämisen haasteisiin. On varmistuttava siitä, että osataan kerätä oikeaa tietoa. Puuttuvat tai virheelliset tiedot voivat vääristää digitaalisen kaksosen tuottamia tuloksia ja piilottaa vikoja. Antureita on myös oltava oikea määrä ja ne on sijoitettava oikein. Liian vähäinen anturien määrä voi johtaa epätarkkoihin ennusteisiin. (Tao & Qi 2019) Suureen tietomäärään liittyy myös ongelmia datan laadussa ja hallinnassa. Oikein toimiva digitaalinen kaksosen vaatii laadukasta tietoa ja sen pakkaamista nopeasti pienempään muotoon. Algoritmit auttavat havaitsemaan poikkeavat tiedot sekä täyttämään tarvittavat tiedot automaattisesti. Digitaalisen kaksosen sujuvan toiminnan voi vaarantaa tiedon omistamiseen liittyvät kysymykset. Tietojen omistaminen on monimutkainen asia, koska monet eri sidosryhmät ovat osallistuneet tietojen tuottamiseen, käsittelyyn ja analysoimiseen. (Rasheed et al. 2020)

Digitaalisen kaksosen jokainen osa on mallinnettava tarkasti. Ilman standardeja ja ohjeita on vaikea varmistaa erilaisten mallien oikeellisuutta. Ohjelmistojen käsin korjaaminen saattaa aiheuttaa virheitä. (Tao & Qi 2019) Digitaalisen kaksosen luomisvaiheessa

luottamus tietojärjestelmään on erittäin tärkeää silloin, kun digitaalista kaksosta käytetään turvallisuuden ja yksityisyydensuojan kannalta kriittisissä sovelluksissa. Sovelluksissa, jotka vaativat hyvää jäljitettävyyttä sekä korkeaa tietoturvaa, tiedot voidaan tallentaa salauslohkoihin, jotka ovat liitettynä ketjuksi. Vertaisverkoksi kutsuttu osa varmistaa sekä ketjun katkeamattomuuden, että jokaisen lohkon pätevyyden ennen sen linkittämistä samaan ketjuun. Tätä konseptia kutsutaan nimeltä Blockchain. Tietoja on tällöin mahdoton kadottaa, mutta ne ovat tarvittaessa aina saatavilla. (Rasheed et al. 2020)

Tao ja Qi (2019) esittävät digitaalisen kaksosen rakentamisen helpottamiseksi tiivistä asiantuntijaryhmää. Digitaalisen kaksosen sovelluksien monipuolistuessa myös eri tieteenalojen osaamisen tarve laajenee. Digitaalisen kaksosen akateeminen tutkimus keskittyy tällä hetkellä mallintamistekniikoiden parantamiseen. Artikkelissa Tao ja Qi sen sijaan esittävät, että tutkimuksen tulisi keskittyä tietojen optimoimiseen ja itse digitaalisen kaksosen toteuttamiseen. (Tao & Qi 2019)

Yuqian Luun (2020) artikkelin mukaan digitaalisen kaksosen tutkimus lisääntyy jatkossa, koska luotettavan digitaalisen kaksosen rakentaminen on haasteellista. Tämä näkyy etenkin teollisuuden sovelluksissa, jossa asetetaan tiukkoja vaatimuksia ajantasaisuudesta, tarkkuudesta ja luotettavuudesta. Digitaalisen kaksosen jatkotutkimusten kannalta tulisi keskittyä sovelluksien standardeihin, viestintäprotokolliin, tietojenkäsittelyyn ja luotettavuuteen. (Lu et al. 2020)

5. VALMISTAVA TEOLLISUUS

Tässä luvussa käsitellään valmistavaa teollisuutta käsitteenä, teollisuus 4.0:aa ja digitaalista kaksosta osana sitä. Teollisuus 4.0:n yhteydessä on käsitelty yhteyttä Lean -ajattelutapaan ja digitaalista kaksosta tuotekehityksen sekä tuotannon ennustamisen näkökulmista. Digitaalisen kaksosen mahdollisuutta yhteistyöhön ihmisen kanssa on käsitelty viimeisessä kappaleessa.

5.1 Valmistava teollisuus käsitteenä, Teollisuus 4.0 ja Lean

Valmistavaan teollisuuteen kuuluvat yritykset, jotka muuttavat mekaanisesti materiaaleja uusiksi tuotteiksi. Materiaalien, aineiden tai komponenttien muuttaminen fysikaalisesti tai kemiallisesti on myös valmistavaa teollisuutta. (Heidel 2008) Tuotteiden kokoonpano luetaan myös teollisuustoimintaan. Työn suoritustavassa ei ole väliä onko se koneellisesti vai käsin tehty. (Tilastokeskus 2021)

Lean -valmistus on syntynyt autoteollisuudesta, ja muut tuotantoympäristöt ovat ottaneet sen käyttöön menestyksekkäästi. Sen tarkoituksena on poistaa kaikki tarpeettomat toiminnot virtaviivaistamalla prosessia ja luomalla standardeja ja rutiineja. Lean-valmistus tukee valmistavan teollisuuden pyrkimyksiä kehittyä monilla alueilla. Tavoitteena ovat alhaiset tuotantokustannukset, tuotteiden parempi laatu, reagoitakyvyn parantaminen, toimitusaikojen lyhentäminen ja joustavuus. Yksinkertaiset koneet ja selkeät työpisteet helpottavat valmistusprosessin automatisointia ja digitalisointia. (Buer 2018)

Teollisuus 4.0:lla ja valmistavan teollisuuden Lean-ajattelulla on samat tavoitteet tuottavuuden lisäämisestä ja sen joustavuudesta. Teollisuus 4.0 ja Lean-valmistus voivat vähentää sekä tuotannosta syntyvää jätettä että kustannuksia. Leanin kannalta tärkeitä asioita ovat Just in time-ajattelu, tarkka tiedonjako sekä varastotietoja tukevat digitalisoidut toimitusketjut. Autonomiset Kanban-taulut pystyvät havaitsemaan varastotasonsa ja tilaamaan tarvittaessa osia automaattisesti. Bauerin mukaan tulee myös ymmärtää, että digitalisoituneessa maailmassa tehottoman prosessin automatisoitu vaihe on edelleen tehoton ja kustannukset ovat yleensä korkeammat. (Buer 2018)

Älykäs valmistus voi auttaa yrityksiä saavuttamaan korkeamman Lean-tason ja tiedonkeruun tutkimusta varten. Se auttaa myös isojen tietomäärien analysoinnissa (Buer 2018)

Teollisuus 4.0 parantaa tuotannon arvovirran kartoittamista reaaliaikaisen tiedonkeruun avulla. Bauer esittää artikkelissaan, että teollisuus 4.0:n käyttöönotto kehittää entistä paremmaksi yrityksen omaa Lean-ohjelmaa (Buer 2018).

5.2 Digitaalinen kaksonen osana valmistavaa teollisuutta

Digitaalinen kaksonen jäljentää olennaisesti yksittäistä laitetta, mikä mahdollistaa hyvän prosessinohjauksen, optimoinnin ja ennakoivan huollon. Digitaalinen kaksonen on houkutteleva konsepti niin fyysisen laitteen valmistajille kuin sen käyttäjälle. Digitaalisen kaksosen avulla on mahdollista kerätä informatiivista tietoa fyysisen laitteen tilasta, suorituskyvystä, huollon tarpeesta ja prosessin optimoimisesta. Sen avulla on mahdollista simuloida tuotantoa ja kapasiteetin määrää esimerkiksi tuotekehityksen aikana. Digitaalinen kaksonen ei välttämättä mallinna kunnolla koko tuotantoprosessin avaintekijöitä; siksi digitaaliset kaksoset eivät välttämättä tuo oikeaa näkökulmaa kokonaisvaltaisiin isoihin päätöksiin. (Bécue et al. 2020)

Digitaalinen kaksonen tarjoaa kolmiulotteisia malleja, joita päivitetään reaaliajassa. Sen avulla työntekijöiden on mahdollista seurata tuotteita tai järjestelmän toimintaa selkeällä tavalla. (Tao et al. 2019b) Digitaalinen kaksosen konseptia on määritelty prosessin jatkuvan optimoinnin järjestelmänä, joka muodostuu fyysisestä ja digitaalisesta tuotantolinjasta. Digitaalinen kaksonen kerää tietoa prosessista ja arvioi sitä jatkuvasti. Se arvioi tuotantokykien pituutta, uusien tuotteiden käyttöönoton nopeuttamista ja vähentää prosessin tehottomuutta. (Bécue et al. 2020)

Toiminnalliset mallit mahdollistavat tietojen analysoinnin. Data-analyysin tulosta käytetään kehittämään fyysisen hyödykkeen ennakoivaa kunnossapitoa. (Bécue et al. 2020) Keskeisenä osana valmistusta digitaalisen kaksosen sovellukset haastavat ja muuttavat perusteellisesti tulevaisuuden tuotantojärjestelmiä ja niiden toimintoja. Digitalisaation kehittyminen mahdollistaa jokaisessa yksittäisessä tuotantojärjestelmän toiminnossa älykkäiden ratkaisujen hyödyntämisen. Tämä edistää tietopohjaisen kokonaan älykkään tuotantoympäristön luomista. (Lu et al. 2020) Tuotantojärjestelmien turvallisuuden parantamiseksi ja huoltoaikojen ja -kustannuksien vähentämiseksi on tärkeää, että järjestelmä osaa ennakoida ja ymmärtää prosessissa tapahtuvia muutoksia. Niiden avulla järjestelmä voi tarjota esimerkiksi esityksiä korjaavien toimenpiteiden tekoon. (Bécue et al. 2020)

Digitaalisille kaksosille Tao ja Qi (2019) mukaan tulisi kehittää universaali suunnittelu- ja kehitysympäristö, jossa kaikki erilaiset digitaalisen kaksosen mallit voivat toimia. Tämänlainen tietojen ja mallien jakaminen vaatisi julkista tietokantaa digitaalisille kaksosille.

Teollisuuden tutkijat voisivat tutkimuskäyttöön hankkia digitaalisen kaksosen tietoja ja malleja. Tämä mahdollistaisi liiketoiminnan kannalta tärkeiden sovellusten kehittämisen. (Tao & Qi 2019)

Digitaalisen kaksosen kehitys on vaikuttanut myös teollisuusrobottien ohjelmointiin. Teollisuusrobottien hinnat ovat laskeneet, koska sovelluksien käyttöönotto on pieninä sarjoina tullut kannattavaksi. Teknologian tutkimuskeskuksen (VTT Oy) mukaan robotit tarjoavat yhden vaihtoehdon pienten ja keskisuurien yritysten tuottavuuden lisäämiseksi. (Heilala, 2020) VTT:n mukaan digitaalisen kaksosen käytännön sovellukset ovat kuitenkin edelleen harvinaisia. Tämä johtuu digitaalisen kaksosen haasteista, joita ovat reaaliaikaisuuteen sopeutuminen, mallin huoltaminen ja kalibrointi. (Nikula, 2020)

5.3 Digitaalinen kaksonen tuotekehityksen ja ennustamisen apuna

Digitaalista kaksosta on mahdollista käyttää koko tuotteen elinkaaren suunnitteluun. Keräämällä tietoja valmistuksesta, käytöstä ja kunnossapidosta voidaan luoda malli, jota simuloimalla pystytään ennustamaan tulevaa. Digitaalinen kaksonen on hyödyllinen työkalu laitteen virtuaalitarkastukseen ja testaukseen ilman fyysisesti valmistettua tuotetta tai prototyyppiä. Ennustaminen onnistuu digitaalisella kaksosella aikaisempien tuotannosta saatujen kokemusten eli historiatietojen avulla. Digitaalisella kaksosella voidaan tarkistaa, ovatko esimerkiksi investointi – ja tuotekehityssuunnitelmat kannattavia. Ennuste auttaa myös löytämään mahdollisia suunnitteluvikoja ja nopeuttaa niiden korjaamista säästämällä suunnitteluvaiheelta aikaa ja kustannuksia. Ratkaiseva asia tuotteiden kehittämisessä on varmistaa laitteen luotettava pitkäaikainen toiminta, mikä onnistuu hyvällä valmistuksen seurannalla ja analysoinnilla. (Bécue et al. 2020) Digitaalisen kaksosen virtuaalimalli pidetään yhteydessä oikeaan fyysiseen malliin, jolloin on mahdollista analysoida fyysisen laitteen suorituskykyä erilaisissa olosuhteissa reaaliajassa. (Tao et al. 2019b)

Digitaalinen kaksonen tuo myös optimointimahdollisuuksia tuotantoprosessiin. Ennen tuotantoprosessin toteuttamista digitaalinen kaksonen voi jäljitellä valmistumisvaiheita ja optimoida päätöksenteon tueksi valmistuksen suunnitelmat. (Bécue et al. 2020) Intralogistiikka on uusi termi, jota käytetään etenkin Saksan teollisuudessa. Intralogistiikka tarkoittaa sisäisen materiaalivirran organisointia, hallintaa, toteutusta, optimointia, tiedonkulkua ja tavaroiden käsittelyä. Intralogistiikan mahdollistamiseksi digitaalinen kaksonen voi kerätä tietoja parantamaan tuotannon suunnittelua ja valvonnan tehokkuutta. (Pawlewski et al. 2021)

Digitaalinen kaksonen tarjoaa etuja myös nopeasti muuttuviin markkinoihin. Digitaalinen kaksonen voi antaa tuotteiden suunnittelijoille mahdollisuuden parannella uuden tuotteen ominaisuuksia jo ennen kuin se on valmistettu. Etukäteen mallinnettu ja testattu tuote vähentää riskiä epäonnistumiseen ja voi lyhentää merkittävästi tuotteen markkinoille tuloaika. Digitaalinen kaksonen voi tuottaa hyvin tarkan virtuaalisen korvikkeen jo ennen kuin fyysinen tuote on valmistunut. Tämä mahdollistaa myös käyttäjäkokemuksen keräämisen etukäteen. (Tao et al. 2019b)

Ennustamiseen digitaalinen kaksonen tarjoaa hyödyllisen työkalun. Bécue et al. (2020) ja Tao et al. (2019b) toteavat artikkeleissaan, että digitaalinen kaksonen voi myös ennakoita mahdollisten vikojen syntymistä. Vian tai ennakoivan kunnossapidon ajankohta on mahdollista selvittää, kun yhdistetään fyysisen laitteen komponenttien kunnosta kertovat tiedot ja virtuaaliselta kaksoselta kerätty data. Ennakoivalla suunnitelmalla on mahdollista vähentää huomattavasti fyysisen laitteen seisonta-aikaa ja siitä johtuvia ylläpitokustannuksia. Tällöin on mahdollista myös säästää energiankulutuksessa. (Tao et al. 2019b)

Digitaalista kaksosta käsitteleviä artikkeleita on julkaistu lähemmäksi 500. Artikkelit liittyvät vahvasti teollisuuteen ja niiden perusteella tuotekehityksen on tällä alalla noudatettava yleistä ja yhteistä viitemallia. Artikkelien tekijät uskovat, että digitaalisen kaksosen rakentaminen vaatii standardoidun tietomallin, korkean suorituskyvyn tietojenkäsittelyyn ja teollisen viestinnän toimimaan hyvin yhdessä. (Lu et al. 2020) Nykyisten tuotteiden osalta digitaalinen kaksonen voi tallentaa tietoa ja analysoida niiden käyttäytymistä reaaliajassa. Tuotteiden käyttäjiltä saatujen palautteiden ansiosta ja yhdistettäessä ne digitaaliseen kaksoseseen, tietoja voidaan hyödyntää tuotteiden parantamiseen ja palvelemaan käyttäjien tarpeita paremmin. (Tao et al. 2019b)

5.4 Digitaalinen kaksonen ja yhteistyö ihmisten kanssa

Teollisuus 4.0:n tekniikka muuttaa ihmisten työntekoa enemmän yhteistyöksi robottien kanssa. Siksi on tärkeää sisällyttää digitaaliseen kaksoseseen inhimillinen ulottuvuus. Optimoimisen ja turvallisuuden kannalta on tärkeää ottaa huomioon ihmisen käyttäytyminen. Ihmisen käyttäytymisen mallinnus digitaalisessa kaksosessa mahdollistaa tehdassuunnittelun parantamisen niin suorituskyvyn kuin joustavuuden näkökulmista. (Bécue et al. 2020)

Digitaalinen kaksonen voi hyödyttää suunnittelun optimointia ja tukea sekä järjestelmän kokoonpanon hallintaa. Se voi auttaa myös päivityksien validoinnissa ja ohjelmistopäivi-

tyksien testauksissa ennen käyttöönottoa. Digitaalisen kaksosen jatkuva yhteys fyysiseen laitteeseen tukee tilannetietoisuutta ja tarjoaa rajapinnan operaattoreille. (Bécue et al. 2020)

Digitaalisen kaksosen avulla työntekijöiden on mahdollista seurata tuotteita tai järjestelmän toimintaa selkeällä tavalla. (Tao et al. 2019b) Työntekijöiden ja koneiden välistä vuorovaikutusta tulisi myös seurata ja mallintaa. Mallintamalla työntekijän toimintaa ja käyttäytymistä voidaan päätellä esimerkiksi työntekijän mielentilaa, väsymystä ja stressitasoa. Käyttäytymismalleissa huomioitaisiin myös turvallisuusnäkökohdat. (Bécue et al. 2020)

Bécue sanoo artikkelissaan, ihmisillä on iso rooli joustavuudessa ja ongelmanratkaisussa. Toisaalta artikkelissa esitetään, että erilaiset rajapinnat, joihin tarvitaan ihmisiä operoijiksi ovat hyvin alttiita inhimillisille virheille. Stressaantunut tai väsynyt työntekijä voi aiheuttaa ongelmia koneen toiminnassa tai huomion puute vaikuttaa lopulliseen tuotteeseen. Bécue esittää artikkelissaan, että lisätutkimusta tarvitaan muun muassa vielä mallien validointiin, työntekijätietojen keräämiseen ja tietojen tarjoamiseen itse mallin syötteiksi. (Bécue et al. 2020)

6. YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Tämän kandidaatintyön tarkoituksena oli selvittää mikä on digitaalinen kaksosen ja sen mahdollisuudet valmistavan teollisuuden tukena. Tästä asiasta johdettiin tutkimuskysymykset:

1. Mikä on digitaalinen kaksosen ja miten sitä on mahdollista hyödyntää erilaisilla toimialoilla?
2. Mitkä ovat yleiset haasteet digitaalisella kaksosella ja miten teknologia tulee hyödyttämään valmistavaa teollisuutta?
3. Miten digitaalinen kaksosen vaikuttaa tuotekehitykseen, tuotannon ennustamiseen ja tehtaiden työntekijöiden rooliin?

Ensimmäiseen kysymykseen vastattiin tämän työn kappaleissa 2 ja 3. Digitaalisen kaksosen ymmärtämiseksi oli hyvä käsitellä taustalla olevaa neljättä teollista vallankumousta. Lisäksi digitaalisen kaksosen kehityksen kulku ja sen potentiaaliset mahdollisuudet erilaisilla toimialoilla tuotiin esille 3. osiossa alaotsikoin. Kandidaatintyötä tehdessä kävi myös ilmi se, että digitaalinen kaksosen on vielä kehitteillä oleva teknologia ja siksi sen hyödyntäminen toimialoittain vaihtelee paljon.

Tutkimuskysymykseen kaksi vastattiin kappaleessa 4. Digitaaliselle kaksoselle lueteltiin monia erilaisia haasteita. Teknologian haasteet ovat samanlaisia kuin yleisesti digitalisaation ja teollisuus 4.0 haasteet. Digitaalisen kaksosen suurimmat haasteet liittyvät muun muassa kaksosen reaaliaikaisuuteen, datan luotettavuuteen ja sen avoimuuteen. Digitaalisen kaksosen käyttäjäystävällisyys ja teknologian uutuus ovat myös tekniikan kehittymisen kannalta haasteita. Työssä esiteltiin haasteiden ratkaisemiseksi mahdollisia ratkaisuja, kuten muun muassa kokeellinen mallintaminen ja akateemisen tutkimuksen kehittäminen. Alaluvussa 5.3 on vastattu digitaalisen kaksosen hyödyntämiseen valmistavassa teollisuudessa. Digitaalisen kaksosen kerrottiin hyödyntävän valmistavaa teollisuutta niin paremman prosessinohjauksen, optimoinnin, kuin fyysisten laitteiden ennakoinnin suunnittelussa.

Tutkimuskysymykseen kolme syvennyttiin kappaleissa 5.4 ja 5.5. Digitaalista kaksosta on mahdollista hyödyntää koko tuotteen elinkaaren suunnittelussa. Teknologian avulla on mahdollista ennustaa tarvittavan tuotantokapasiteetin suuruus vastaamaan esimerkiksi markkinoiden vaihtelua. Digitaalisen kaksosen vaikuttaa myös ihmisten työntekoon. Digitaalisen kaksosen suunnittelussa on otettava huomioon ihmisten käyttäytyminen niin turvallisuuden kuin myös digitaalisen kaksosen optimoimisen kannalta. Ihmisen tulee

pystyä seuraamaan tuotantoa selkeällä tavalla, jotta esimerkiksi inhimillisiltä virheiltä välttyttäisiin.

Tässä työssä onnistuttiin vastaamaan hyvin esitettyihin tutkimuskysymyksiin. Työn rajoitteita ovat digitaalisen kaksosen käsitteen laajuus ja se, että teknologian uutuuden takia tutkimusta aiheesta on vielä vähän. Työtä tehdessä oli ymmärrettävä, että digitaalista kaksosta voidaan käyttää käytännössä missä tahansa kontekstissa ja aiheen rajaaminen oli siksi erityisen tärkeää. Tätä työtä olisi ollut mahdollista jatkaa vielä laajemmin. Jatkotutkimusaiheita voisivat olla esimerkiksi digitaalisen kaksosen käsitteleminen yksityiskohtaisemmin mallintamisen ja sen tekniikoiden näkökulmasta. Teknologian kehittymisen kannalta akateemisten tutkimusten tulisi keskittyä jatkossa myös itse digitaalisen kaksosen toteuttamiseen.

LÄHTEET

Bécue, B. et al., 2020. *A New Concept of Digital Twin Supporting Optimization and Resilience of Factories of the Future*. *Applied sciences*. 10 (13), pp. 4482–
Saatavilla: <https://doi.org/10.3390/app10134482> [Haettu 24. helmikuu 2021].

Buer, S.-V. e. a., 2018. *The link between Industry 4.0 and lean manufacturing: mapping current research and establishing a research agenda*. *International Journal of Production Research*, 56 (8), pp. 2924–2940. Saatavilla: <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1442945> [Haettu 24. helmikuu 2021].

Dahmen, U. & Rossmann, J., 2018. 'Experimentable Digital Twins for a Modeling and Simulation-based Engineering Approach', in *2018 IEEE International Systems Engineering Symposium (ISSE)*. October 2018 IEEE. pp. 1–8. Saatavilla: <https://doi:10.1109/SysEng.2018.8544383> [Haettu 22. huhtikuu 2021]

Drath R. and Horch A., 2014 "Industrie 4.0: Hit or Hype? [Industry Forum]," in *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 8 (2), pp. 56–58, Saatavilla: <https://doi:10.1109/MIE.2014.2312079>. [Haettu 22.4.2021]

Gartner, 2018. *5 Trends Emerge in the Gartner Hype Cycle for Emerging Technologies, 2018*. Saatavilla: <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/5-trends-emerge-in-gartner-hype-cycle-for-emerging-technologies-2018> [Haettu 21 syyskuu 2020].

Haag, S. & Anderl, R., 2018. *Digital twin – Proof of concept*. *Manufacturing letters*. pp. 1564–66. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2018.02.006> [Haettu 22. huhtikuu 2021]

Heidel, D., 2008. *Manufacturing Sector*. *Journal of safety research*. 39 (2), pp 183–186. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2008.02.005> [Haettu 24. helmikuu 2021].

Heilala, J. H. H. K. R. K. J. & S., 2020. *A review of digitalisation in the Finnish manufacturing SME companies*. *VTT Technical Research Centre of Finland*. Saatavilla: <https://cris.vtt.fi> [Haettu 22. huhtikuu 2021]

KSSHP, 2020. Neurofysiologiset tutkimukset: AKTIGRAFIA. Saatavilla: [https://www.ksshp.fi/fi-FI/Potilaalle/Potilasohjeet/Aktigrafia\(60821\)](https://www.ksshp.fi/fi-FI/Potilaalle/Potilasohjeet/Aktigrafia(60821)). [Haettu 23. huhtikuu 2021].

Lorenz, M. et al., 2015. *Industry 4.0: The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries*. BCG Saatavilla: https://www.bcg.com/publications/2015/engineered_products_project_business_industry_4_future_productivity_growth_manufacturing_industries [Haettu 23 lokakuu 2020].

Lu, Y. et al., 2020. *Digital twin-driven smart manufacturing: Connotation, reference model, applications and research issues*. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.101837> [Haettu 25. helmikuu 2021].

Nikula, R. P. M. R. M. & K.-R., 2020. 'Towards online adaptation of digital twins', *Open Engineering*, 10, (1), pp. 776–783. Saatavilla: <https://doi.org/10.1515/eng-2020-0088>. [Haettu 18.4. huhtikuu 2021].

- Pawlewski, P., Kosacka-Olejnik, M. & Werner-Levansowska, K., 2021. *Digital Twin Lean Intralogistics: Research Implications. Applied sciences.* 11 (4), 1495–. Saatavilla: <https://doi.org/10.3390/app11041495> [Haettu 24. helmikuu 2021].
- Rasheed, A., San, O. & Kvamsdal, T., 2020. *Digital Twin: Values, Challenges and Enablers From a Modeling Perspective. IEEE access.* 821980–22012. Saatavilla: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2970143>. [Haettu 22. huhtikuu 2021]
- Rosen, R., Wichert, G., Lo, G. & Bettenhausen, K., 2015. *About The Importance of Autonomy and Digital Twins for the Future of Manufacturing. IFAC-PapersOnLine.* 48 (3), pp. 567–572. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.141> [Haettu 22. huhtikuu 2021]
- Tao, F. & Qi, Q., 2019. *Nature: Make more digital twins. Nature* 573, pp. 490-491 Saatavilla: <https://doi.org/10.1038/d41586-019-02849-1> [Haettu 25. helmikuu 2021].
- Tao, F., Zhang, H., Liu, A. & Nee, A., 2019a. *Digital Twin in Industry: State-of-the-Art. IEEE transactions on industrial informatics.* 15 (4), pp 2405–2415. Saatavilla: <https://doi.org/10.1109/TII.2018.2873186>. [Haettu 22. huhtikuu 2021]
- Tao, F., Zhang, M. & Nee, A., 2019b. *Tao Fei, Zhang Meng, Nee A.Y.C (2019) Digital twin driven smart manufacturing.* London, United Kingdom: Academic Press, an imprint of Elsevier. [Haettu 25. helmikuu 2021].
- Tilastokeskus, 2021. *Teollisuus, käsitteet.* Saatavilla: <https://www.stat.fi/meta/kas/teollisuus.html> [Haettu 24. helmikuu 2021].
- Välimäki, V., 2016. *Kaupunki järjestää suunnittelukilpailun hittipelissä – Cities: Skylinesissa tehdään uutta Hämeenlinnaa.* Yle Uutiset. Saatavilla: <https://yle.fi/uutiset/3-8696412> [Haettu 5. lokakuu 2020].
- Yusen, X., Bondaletova, N., Kovalev, V. & Komrakov, A., 2018. *Digital Twin Concept in Managing Industrial Capital Construction Projects Life Cycle, in 2018 Eleventh International Conference Management of large-scale system development (MLSD). [Online]. October 2018 IEEE.* pp. 1–3. Saatavilla: <https://doi.org/10.1109/MLSD.2018.8551867>. [Haettu 22. huhtikuu 2021]