

Ilkka Viita-aho

**DIGITAL TWIN-TEKNOLOGIAN
HYÖDYNTÄMINEN
KAPPALETAVARATUOTANNON
OPTIMOINNISSA**

Tekniikan ja luonnontieteen tiedekunta
Kandidaatintyö
Tammikuu 2021

TIIVISTELMÄ

Ilkka Viita-aho: Digital twin-teknologian hyödyntäminen kappaletavaratuotannon optimoinnissa
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Konetekniikka
Tammikuu 2021

Digitaalinen tuotanto ja teollisuuden neljäs vallankumous ovat tämän hetken teollisuuden merkittävimpiä tutkimuskohteita, jotka ovat yleistymässä myös perinteisen teollisuuden ulkopuolelle. Yksi digitaalisen tuotannon merkittävimmistä tutkimuskohteista on Digital twin-malli, eli digitaalinen kaksonen, joka yhdistää fyysisen ja virtuaalisen laitteiston yhdeksi kyberfyysiseksi kokonaisuudeksi. Digitaalinen kaksonen perustuu moderniin anturointi- ja tietoliikennetekniikkaan, mahdollistaen reaaliaikaisen yhteyden eri laitteiden välillä. Tämä antaa lukemattomat mahdollisuudet suunnitteluun, tuotantoon ja testaukseen. Tämä työ käsittelee erityisesti digitaalista kaksosta ja sen avulla suoritettavaa käytön optimointia kappaletavaratuotannossa.

Työ on kolmiosainen, ja jokainen aihealue jakautuu omaan lukuunsa, alkaen toisesta luvusta. Ensimmäinen luku käsittelee yleisesti tutkimuskysymyksiä, työn tavoitetta ja hyödyllisyyttä. Erityisesti työssä keskitytään uusimpien tutkimusten ja sovellusten käsittelyyn. Toinen kappale käy läpi digitaalisen kaksosen ja teollisuus 4.0 taustalla olevia teknologioita ja nousevia trendejä. Erityisesti toisessa kappaleessa kiinnitetään huomiota siihen, miten digitaalinen kaksonen muodostuu kaiken tämän pohjalta. Kolmas kappale käsittelee kappaletavaratuotannon käytön optimointia, joka on osa perinteisempää tuotantotekniikan tutkimusta. Käytön optimoinnilla tarkoitetaan tuotantolaitteiden ja tuotantosolujen maksimaalisen kapasiteetin hyödyntämistä, koska kaikki mikä ei tuota lisäarvoa tuotteelle tai hidastaa seuraavaan tuotantovaiheeseen siirtymistä, heikentää tuotannon tehokkuutta. Neljäs kappale kokoaa yhteen digitaalisen kaksosen ja sen hyödyntämisen kappaletavaratuotannon optimoinnissa, muodostaen kokonaisuuden potentiaalisista tutkimuskohteista tulevaisuudessa. Viides ja kuudes kappale ovat tekniikoiden analyysia ja johtopäätöksiä varten, ja analyysissä käydään läpi kriittisesti digitaalisen kaksosen tulevaisuutta, ja sen mahdollisia ongelmia ja riskejä.

Kokonaisuudessaan työ kokoaa yhteen uusimpia tutkimusartikkeleita ja käytännön sovelluksia digitaalisesta kaksosesta ja sen taustalla olevista teknologioista. Erityisesti työn motivaation kannalta merkittävin tekijä on aiheen uutuusarvo. Monet työn tutkimusartikkelit ovat julkaistu viimeisen vuoden sisällä. Yksi mielenkiintoinen osa työstä on myös digitaalisen kaksosen tulevaisuuden ennustaminen ja seuraaminen, kun työssä käsitellyt asiat yleistyvät myös teollisuudessa. Kirjoittaessa uusimmista artikkeleista puuttui usein syvällisempi perehtyminen ongelmiin tai mahdollisiin riskeihin, joita pyrittiin tuomaan esille tähän kandidaatintyöhön.

Avainsanat: Digital Twin-malli, kappaletavaratuotanto, optimointi, teollinen internet, Teollisuus 4.0

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -ohjelmalla.

ABSTRACT

Ilkka Viita-aho: Digital twin-model driven production optimization
Bachelor's thesis
Tampere University
Mechanical engineering
January 2021

Digital manufacturing is taking big leap as the Industry 4.0 inventions become more common. One of the major inventions of the Fourth Industrial Revolution is Digital twin-model. The cyber-physical system of digital twin is based on sensor and data communication technologies where the physical layer and virtual layer are driven side by side. This gives limitless possibilities to design, production and testing. This bachelor's thesis about optimization of the production process with the digital twin.

This thesis is divided into six chapters. First chapter is about research question and the motivation for this thesis. The second chapter goes through the technologies behind Digital twin-model and Industry 4.0. Third chapter is about optimization of the production and looking into key parameters of production. The fourth chapter combines the digital twin and the optimization and creates overview of current research and situation through research articles and practical examples from production industry. Fifth and sixth dedicated for analysis and conclusions.

Overall this thesis joins together recent research and applications about digital twin. It also includes current trends and predictions about digital twin and Industry 4.0.

Keywords: Digital twin, Production optimization, Industrial Internet of things, Industry 4.0

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin OriginalityCheck service.

SISÄLLYSLUETTELO

1	Johdanto	1
1.1	Työn tausta	1
1.2	Tavoitteet, tutkimuskysymykset ja rajaukset	1
2	Teollinen internet ja Digital twin-teknologia	3
2.1	Teollinen internet	3
2.1.1	Anturointi	5
2.1.2	Tietoliikenne	6
2.1.3	Datan käsittely ja analysointi	7
2.2	Digital twin-malli	7
2.2.1	Mallin muodostus	8
2.2.2	Datan keräys ja käsittely	10
3	Käytön optimointi	11
3.1	Optimoinnin lähestymistapoja	11
3.2	Oleelliset parametrit ja niiden ohjaus	12
3.2.1	Aika	12
3.2.2	Laatu	12
3.2.3	Kustannukset	13
3.2.4	Materiaalit	13
3.2.5	Energia ja ympäristö	13
3.2.6	Laitteet ja työntekijät	14
3.2.7	Joustavuus	15
4	Optimointi Digital twin-malli avulla	16
4.1	Virtuaalisen mallin käyttöönotto tuotannossa	16
4.2	Prosessin analysointi	17
4.3	Ongelmakohtien selvitys	18
4.4	Uusien prosessivaiheiden testaus	18
4.5	Esimerkkejä käytön optimoinnista tuotannossa digitaalisen kaksosen avulla	19
4.5.1	Pyörivän koneistuksen digitaalinen kaksonen ja parametrien viritys	19
4.5.2	Tyhjiölasivalmistuslinjan suunnittelu ja optimointi	20
4.5.3	STEP tools Inc. koneistuksen laadun optimointi	20
5	Analyysi	22
5.1	Digitaalisen kaksosen riskit ja ongelmat	22
5.1.1	Tietoturva	22
5.1.2	Kannattavuus	23
5.1.3	Järjestelmien yhdisteltävyys	24
5.2	Digitaalisen kaksosen tulevaisuus	24

6 Yhteenveto	26
Lähteet	27

KUVALUETTELO

2.1	Järjestelmätasot kuvattuna ISA-95 standardin mukaisesti	4
2.2	Tietoliikenneverkkojen kantavuudet esiteltynä. Laajimapina ovat kiinteät internet-yhteydet ja mobiiliverkot, seuraavana lähiverkot ja pienimpinä henkilökohtaiset PAN-verkot	6
2.3	Digitaalisen kaksosen kolme eri komponenttia kuvattuna suunnittelun ja tuotannon eri vaiheisiin	9
2.4	Digitaalisen kaksosen data-algoritmimalli, joka on sovellettuna CNC-yksikön digitaaliselle kaksoselle	10
3.1	Lastuavan työstön energiankäyttö ajan mukaan	14
3.2	Tuotannon arvot painotettuina nollasta yhteen	15
3.3	Kolme eri tuotantotapaa kuvattuna suunnittelun ja tuotannon eri vaiheisiin .	15
4.1	Digitaalisen kaksosen muodostama kyberfyysinen tuontantojärjestelmä . .	17
4.2	Pyörivää koneistusta simuloiva rullakoneisto, jossa esiteltynä digitaalisen kaksosen kolme eri tasoa	19

LYHENTEET JA MERKINNÄT

CPS	Cyber Physical System, Kyberfyysinen järjestelmä
DCS	Distributed Control System, hajautettu automaation ohjausjärjestelmä
DT	Digital Twin, digitaalinen kaksonen, virtuaalisesti ajettava konejärjestelmä
Ilot	Industrial Internet of Things, teollinen internet
IoT	Internet of things, asioiden internet
ISA	The International Society of Automation, kansainvälinen automaation standardijärjestö
IT	Information Technology, Tietotekniikka, joka kattaa tietokoneet ja tietoliikenneverkot
MEMS	Micro Electro-Mechanical Systems, pienikokoinen mekatroninen anturointijärjestelmä
MES	Manufacturing Execution System, tuotannonohjausjärjestelmä
OT	Operational Technology, Operaatiojärjestelmät, tuotannon toiminnalliset järjestelmät, kuten logiikkapiirit ja anturit
SCADA	Supervisory Control And Data Acquisition, automaation ohjaus- ja monitorointijärjestelmä
STEP	Standard for the Exchange of Product model data, ISO 10303-standardin muodostama malli tuotantodatan käsittelyyn

1 JOHDANTO

1.1 Työn tausta

Nykyhetken kuluttajillekin merkittävä termi, *internet of things*, asioiden internet, ja siihen pohjautuva laitteiden hallinta samassa verkossa aina jääkaapista valaistukseen on tällä hetkellä erittäin suuressa suosiossa. Asioiden internet kuitenkin pohjautuu teollisuudessa kehitettyyn teolliseen internetiin, jonka juuret ovat perinteisessä, 1990-luvulla yleistyneessä machine to machine-kontrollintekniikassa (Holler et al. 2018). Työssä käsiteltävä teollinen internet perustuu siis nimensä mukaisesti vahvasti teollisuuskäytössä oleviin ratkaisuihin, joissa tuotannonohjaus, päätelaitteet, logiikkapiirit, toimilaitteet, anturit ja mittalaitteet muodostavat yhteisen, keskusteleavan verkoston (Hersent, Boswarthick ja Elloumi 2011).

Teollinen internet, Industry 4.0 ja digital twin-malli ovat tämän hetken merkittäviä tutkimuskohteita, joiden avulla voidaan saavuttaa esimerkiksi tuotannon tehostamista, optimointia, energiatehokkuutta, elinkaaren hallintaa tai joustavuutta. Industry 4.0-termillä tarkoitetaan neljättä teollisuuden vallankumousta, jossa yhdistetään virtuaaliset mallit ja fyysiset laitteet yhdeksi kyberfyysiseksi järjestelmäksi (L. D. Xu, E. Xu ja L. Li 2018).

Vaikka työn aiheet ovat vahvasti uusia tekniikoita, on kappaletavaruotannon optimointi perinteisempää tuotantotekniikan osa-aluetta, jossa pyritään esimerkiksi parantamaan laatua, karsimaan tuotantokustannuksia tai lisäämään tuotantomääriä (Pawar ja V. Rao 2013). Toisaalta optimointi voi keskittyä johonkin tiettyyn näkökulmaan, kuten ekologisuuteen tai energiatehokkuuteen. Teollisen internetin ja erityisesti digital twin-malli tarjoavat kappaletavaruotannon optimoinnille uusia näkökulmia, koska nykyaikaisen laitteen toimintoja voidaan simulaation avulla testata ja analysoida tarkasti ensin virtuaalisella kaksoislaitteella. Saadut päätelmät ja parametrit voidaan ottaa käyttöön todellisessa tuotannossa, koska laitteiden kommunikaatio ja toiminnot ovat samat virtuaalisessa kaksoismallissa ja itse fyysisessä laitteessa (Tao, M. Zhang ja Nee 2019).

1.2 Tavoitteet, tutkimuskysymykset ja rajaukset

Tässä työssä pyritään avaamaan, miten teollisen internetin teknologiat ja digital twin-malli muodostavat modernin pohjan kappaletavaruotannon ja konejärjestelmien optimoinnille. Lisäksi työssä esitellään ja pohditaan uusimpien tieteellisten artikkelien tuloksia aiheesta. Työn muodostaman kokonaisuuden tarkoituksena onkin koota yleispätevä

ja päivitetty tietolähde digital twin-mallin hyödyntämisestä kappaletavaratuotannon optimoinnissa.

Keskeisimpinä tutkimuskysymyksinä on:

1. Miten digitaalinen kaksonen muodostetaan kappaletavaratuotannon optimoinnin näkökulmasta, hyödyntäen teollista internetiä ja sen tarjoamia teknologioita?
2. Kuinka digitaalisen kaksonen avulla voidaan suorittaa käytön optimointia, ja millaisia sovelluksia sillä voi olla kappaletavaratuotannossa?

Työ keskittyy erityisesti digital twin-teknologiaan ja optimointiin kappaletavaratuotannossa, koska niiden tutkiminen ja yhdistäminen on suhteellisen uutta. Teollisen internetin ja anturoinnin on tarkoitus olla pohjustavaa tietoa digitaaliselle kaksoelle, ja sen tarkastelu jätetään perustasolle, kuitenkin käyden läpi uusimpia teknologioita, sovelluksia ja toimintoja.

Työ käsittelee tutkimuskysymyksiä kahdessa osassa, toisen kappaleen muodostaessa teoreettisen pohjan eri tekniikoille. Kolmannessa kappaleessa käsitellään kappaletavaratuotannon optimointia, ja pohditaan erilaisia näkökulmia optimoinnille. Neljännessä kappaleessa käsitellään digital twin-mallin ja kappaletavaratuotannon optimoinnin muodostamaa kokonaisuutta, verrataan mallin hyötyjä ja esitellään erilaisia sovelluskohteita. Viides kappale analysoi työn taustalla olevien teknologioiden toimivuutta, ja siinä tarkastellaan myös digital twin-mallia ja optimointia kriittisesti ja pohditaan niiden mahdollisia kehitysuuntia tulevaisuudessa. Kuudennessa kappaleessa kootaan yhteen tutkimustulokset, ja niistä muodostetaan johtopäätökset.

2 TEOLLINEN INTERNET JA DIGITAL TWIN-TEKNOLOGIA

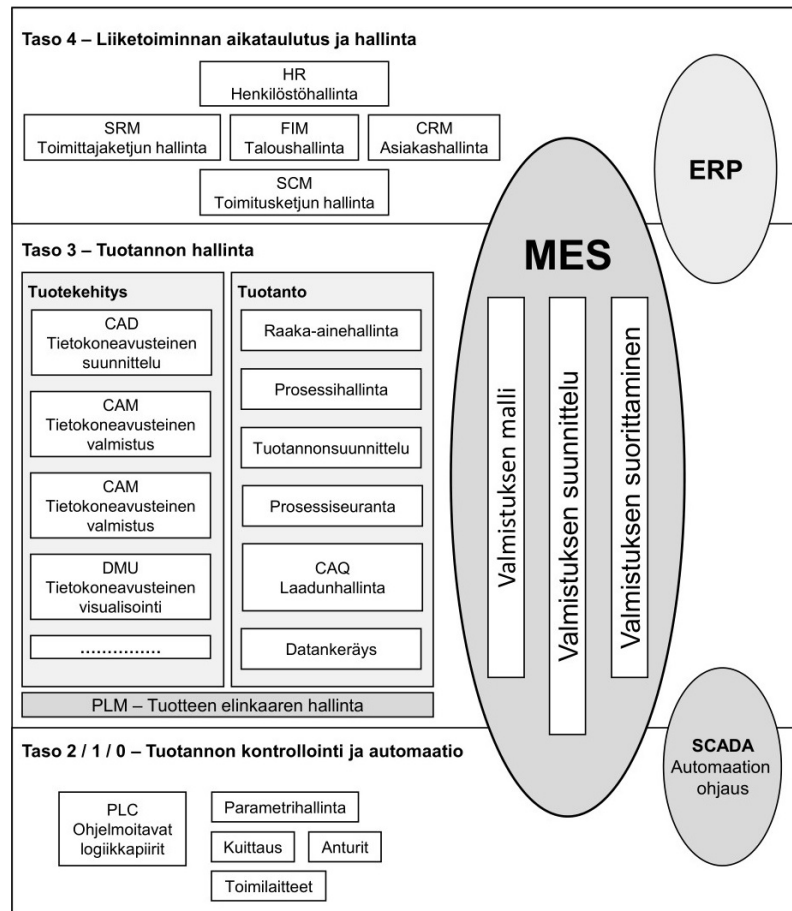
Neljännän teollisuuden vallankumouksen muodostama kokonaisuus pohjautuu laajaan tietoliikenneverkostoon ja siihen kytkettyyn laitteistoon, antureihin ja ohjaaviin logiikoihin. Näistä saadaan luotua kokonaisuus, jonka peilinä toimii virtuaalisesti suoritettava digitaalinen kaksonen (Y. Lu et al. 2019). Tässä luvussa käsitellään digitaaliseen kaksoseen liittyviä oleellisia tekniikoita.

2.1 Teollinen internet

Nykyaikaisen tuotannon laitteiden ja ohjelmistojen rajat ovat entistä häilyvämmät, koska yhä useammin ne ovat kytkeytyneenä yhteen teollisen internetin avulla (Bruner 2013). Laitteita voidaan kontrolloida ja valvoa tietoliikenneyhteyksien avulla. Samassa verkossa olevat laitteet, kuten toimilaitteet, anturit, päätelaitteet ja palvelimet muodostavat kyberfyysisen ja reaaliaikaisen kokonaisuuden, teollisen internetin. Toimilaitteiden muodostama paikallinen verkko on tämän lisäksi kytketty yleiseen tietoverkkoon, jolloin esimerkiksi järjestelmän ohjelmistoja ja laitteita voi tarkastella ja kontrolloida millä tahansa päätelaitteella, missä tahansa, jos internet-yhteys on muodostettu. Tämä mahdollistaa ohjauksen paikanpäältä, kun laitetta voidaan ohjata esimerkiksi tabletilla, samalla nähdessä miten prosessi muuttuu reaaliaikaisesti eri ohjausarvoilla (Collin ja Saarelainen 2016). Toisaalta ohjaus voidaan suorittaa täysin etänä, esimerkiksi toisella puolella maapalloa.

Teollisen internetin toiminnallisuutta varten on muodostettu useita malleja ja järjestelmiä. Yleisin malli pohjautuu International Society of Automation-järjestön standardiin, jossa tasot on jaettu toimintojen mukaan (ISA-95.00.01-2005 2005). Malli voidaan ajatella myös pyramidimalliksi, joka kuvaa laitteiston määrää. Ylimmällä tasolla on vähiten, ja laitteiden määrä kasvaa mitä alemmaksi mennään. Ylimmällä, neljännellä tasolla on yrityksen hallintaan liittyviä yleisiä sovelluksia, kuten toiminnanohjausjärjestelmä tai asiakkuuksien hallinta. Nämä tasot ovat kytkeytyneenä myös alempiin tasoihin, mutta usein niiden käsittelemät prosessit ja tiedot eivät ole jatkuvassa vuorovaikutuksessa alempiin tasoihin, ja ne voidaan tarvittaessa myös eriyttää täysin alemmista tasoista. Seuraavalla tasolla on suunnittelun ja tuotannon hallinta, joista erityisesti jälkimmäinen säätelee alempien tasojen yksittäisiä laitteita, kuten antureita, logiikkapiirejä ja niihin liittyviä parametrejä. Kolmannen tason järjestelmät ovat yleensä samanarvoisia, eli ne keskustelevat keskenään.

Esimerkiksi tuotannonhallinta voi hakea suunnittelusta uusimman revision, ja määrätä uudet parametrit alemmille tasoille. Malli on esitelty kuvassa 2.1.



Kuva 2.1. Järjestelmätasot kuvattuna ISA-95 standardin mukaisesti. Suomennettu lähteestä (Meyer, Fuchs ja Thiel 2005)

Teollinen internet pohjautuu erityisesti kolmanteen ja siitä alempiin tasoihin. Suurin osa teollisen internetin järjestelmän osista on laitteita, jotka eivät osaa itsessään tehdä välttämättä mitään, vaan ne tarvitsevat ohjelmiston tai ainakin ohjaussignaalin. Toisaalta on myös laitteita, joiden tehtävä on tulkita vain yhtä prosessin osaa, kuten anturit ja kuittaavat laitteet. Sen vuoksi eri tasojen rajapinnoissa on yleensä jonkinlainen yhtenäistävä ohjelmisto, esimerkiksi *Manufacturing execution system*, MES, tuotannonohjausjärjestelmä, joka ohjaa valmistuksen mallia, suunnittelua ja suorittamista. Usein tukena on automaation ohjausjärjestelmä, kuten SCADA, *Supervisory Control And Data Acquisition* tai DCS, *Distributed control system* (Macaulay ja Singer 2012). Automaatiota ohjaava järjestelmä valikoituu usein tuotannon monitasoisuuden mukaan, monimutkainen tuotanto on usein toteutettu hajautetulla mallilla, johon myös markkinoiden yleisin DCS-järjestelmä perustuu (Presswire 2014). Vaikka yksittäinen taso tai järjestelmä saattaa näyttää toimivan itsenäisesti, on niiden välille kuitenkin luotu kommunikoiava tietoliikenneyhteys. Kommunikointi on kuitenkin hierarkista, jolloin osa laitteista vastaa ainoastaan ylemmän tason kysyessä. Tällöin tietoliikenne on sujuvaa ja teollisen internetin eri osa-alueet pysyvät järjestelmällisinä.

2.1.1 Anturointi

Kuvassa 2.1 esitelty alin taso on yhdistelmä erilaisia antureita, mittareita, logiikkapiirejä ja toimilaitteita. Tällä tasolla laitteiden todelliset toiminnot tapahtuvat, kun logiikkapiirit ohjaavat toimilaitteita ylemmän tason tuotannonohjausjärjestelmän mukaisesti. Toimilaitteille on syötetty yleensä asetusarvoja, joiden mukaan toimilaitteet suorittavat tehtävänsä. Usein kuitenkin ympäristö ja itse laite tarvitsee ohjausdataa, jonka avulla toiminta siirtyy kohti haluttua lopputilaa. Tätä varten nykyaikainen tuotanto hyödyntää antureita, joita on huomattava määrä.

Perinteiset anturit ovat yleensä passiivisia, eli ne vain vastaanottavat tietoa. Anturitekniikka on kuitenkin jo ennen teollisuuden neljättä vallankumousta ollut siirtymässä aktiivisiin antureihin, jotka voivat keskustelevaltoisten antureiden kanssa tietoliikenneverkon sisällä (Collin ja Saarelainen 2016). Toisaalta anturit voidaan jakaa myös langallisiin ja langattomiin, joista jälkimmäinen on yleistymässä kehittyvän tekniikan myötä. Anturityypistä huolimatta oleellisinta on sen keräämä data esimerkiksi kiihtyvyydestä, nopeudesta, asennosta, lämpötilasta, virtauksesta, paineesta, värähtelystä, virrankulutuksesta tai sähkövirran vastuksesta (Collin ja Saarelainen 2016).

Langattomien antureiden energiantarve on usein rajoittava tekijä, jota voidaan parantaa akkuteknologian tai tiedonsiirtotekniikan avulla. Esimerkiksi tiedonsiirrossa 5G-yhteydet kuluttavat vähemmän energiaa tuoden pidemmän käyttöiän anturille (Collin ja Saarelainen 2016). Yleistymässä ovat myös ympäristöstään energiaa keräävät anturit, jotka saavat käyttöenergiansa esimerkiksi värähtelevästä kappaleesta. Tällöin mitattava kohde tarjoaa anturille lähes rajattoman käyttöenergian, jolloin mittaus ja kommunikointi onnistuvat ilman ulkoista energialähdettä (Kanounng 2018).

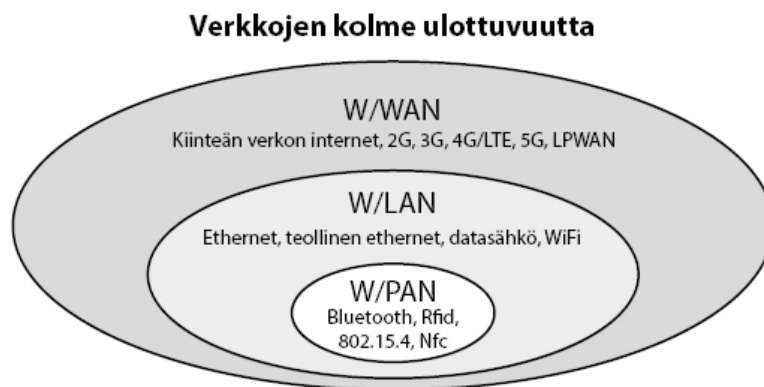
Collin ja Saarelainen mukaan merkittävä osa teollisen internetin anturoinnista on *micro electro-mechanical systems*-anturitekniikkaa, joka perustuu pieniin ja edullisiin mikroantureihin (Collin ja Saarelainen 2016). Merkittävän eron tuo niiden koko, joka on usein maksimissaan yhden millimetrin kokoinen, sisältäen itse anturin ja prosessorin joka ohjaa dataa muiden laitteiden välillä. Usein MEMS-anturit ovat monihaaraisia, eli yksi anturiyksikkö koostuu todellisuudessa monesta pienestä anturista, joita keskusprosessori yhdistää (Collin ja Saarelainen 2016).

Uudenlaiset konenäköön perustuvat anturit ovat yleistyneet, koska ne ovat monikäyttöisiä sensoreita, jotka voivat tarkkailla tiettyä kohdetta tai laajempaa kokonaisuutta. Konenäköä voidaan soveltaa myös datankäsittelyssä, esimerkiksi kappalemäärien laskemisessa tai sarjanumeron tarkastuksessa. Mielenkiintoinen sovelluskohde konenäköanturoinnille on ihmisen ja koneen yhteistyö, jossa esimerkiksi robottivarsi seuraa ihmisen liikkeitä, ja tekee omat prosessinsa sen mukaan. Uhlemann, Lehmann ja Steinhilper viittaavatkin tutkimuksessaan perinteisten anturien ja konenäkö yhdistelmän olevan kasvava trendi (Uhlemann, Lehmann ja Steinhilper 2017).

2.1.2 Tietoliikenne

Teollisen internetin merkittävä taustateknologia on tietoliikenne ja sen tiedonsiirto. Teollinen internet kokoaa yhteen langalliset ja langattomat yhteydet, jolloin anturit, logiikkapiirit ja toimilaitteet saadaan yhdeksi kokonaisuudeksi. Erityisesti digitaalinen kaksonen vaatii tietoliikenteeltä paljon, koska dataa on merkittävä määrä ja kaikki kommunikointi tapahtuu reaaliaikaisesti. Kommunikoinnin on oltava myös kaksisuuntaista, koska fyysinen laite ja virtuaalinen malli keskustelevat vastavuoroisesti.

Toinen merkittävä osa tietoliikenneverkkoja on eri tasojen laajuudet ja kantavuudet. Kiinteät internet-yhteydet ja mobiiliverkot muodostavat nykyaikaisen globaalin verkoston, lähiverkot kokovat esimerkiksi tehtaan kaikki laitteet yhteen ja PAN-verkot, eli henkilökohtaiset verkot muodostavat yksittäisen laitteen tiedot ja ohjauksen yhteen (Collin ja Saarelainen 2016). Tietoliikenneverkkojen tasot esiteltynä kuvassa 2.2.



Kuva 2.2. Tietoliikenneverkkojen kantavuudet esiteltynä, laajimapana mobiiliverkot, seuraavana lähiverkot ja pienimpänä henkilökohtaiset PAN-verkot (Collin ja Saarelainen 2016).

Langattomista yhteyksistä merkittävimmät ovat WLAN eli langaton paikallisverkko, PAN eli henkilökohtaiset verkot kuten Bluetooth- ja ZigBee-tiedonsiirtotekniikat, mobiiliverkkostandardit kuten 3G, LTE ja 5G, pienitehoiset mobiiliverkkojärjestelmät, kuten LoRa ja Sigfox ja perinteisemmät radiotaajuuteen perustuvat tekniikat, kuten RFID ja NFC (Collin ja Saarelainen 2016).

Usein kuitenkin teollisen internetin käyttöönottoon liittyy vanhoja laitteita, jolloin tarvitaan myös langallisia yhteyksiä. Toimilaitteet ja logiikkapiirit voivat olla valmiiksi kytkettynä kenttäautomaatioväyliin, kuten CAN- ja Profibus-verkkoihin, jolloin ne voidaan kytkeä osaksi teolliseen ethernetiin, eli lähiverkkoon (Gilchrist 2016). Modernit automaatioväylät kuten EtherCAT ja Profinet voivat yhdistää tietoliikenteen ja ohjauksen tarvittavan sähkövirran yhteen kaapeliin, jolloin esimerkiksi anturien ja ohjaimien asennus ja käyttö helpottuu huomattavasti. (Collin ja Saarelainen 2016).

2.1.3 Datan käsittely ja analysointi

Antureilta ja muilta yksiköiltä kerätään mittava määrä dataa, mutta saatu data tulee käsitellä määrämutoiseksi, jotta sitä voidaan jatkokäsitellä tai sen avulla voidaan tehdä toimintoja. Tyypillinen nykyaikainen datan käsittely perustuu loughintamalliin, jossa data tallentuu yksinkertaiseen, esimerkiksi tekstipohjaiseen tietokantaan, josta suorittava ohjelma käy läpi tarvittavan datan (Adelchi ja Scarpa 2012). Datan loughinta on tiedontallennusyylinä yksinkertainen, koska kaikki tallentuu tiedostoksi, mutta ongelmana on suuren datamäärän käsittely. Tätä varten on kehitetty erilaisia ratkaisuja, kuten tekoälyyn perustuvia koneoppivia järjestelmiä (Ao, Rieger ja Amouzegar 2010). Tekoälyn hyödyt tulevat erityisesti esiin järjestelmässä tapahtuvissa muutoksissa, tekoäly oppii jatkuvasti, ja ohjaa toimintaansa muutosten mukaan.

Merkittävä tekijä data-analyysin paikkaansapitävyudessa on tarkasteltavan datan laatu. Hand, Mannila ja Smyth mukaan yksittäinen datan laatu voidaan jakaa kahteen osioon, täsmälliseen ja tarkkaan dataan. Täsmällinen data on kerättyä dataa, jonka varianssi on mahdollisimman pieni. Täsmällisen datan avulla voidaan myös arvioida mittauksen luotettavuutta, koska suuri varianssi viittaa yleensä mittavirheeseen. Tarkka data taas on mahdollisimman lähellä odotusarvoa, ja sen avulla voidaan päätellä mittauksen paikkaansapitävyyttä. (Hand, Mannila ja Smyth 2001). Toisaalta Hand, Mannila ja Smyth toteaa tutkimuksessaan, että samanlainen jaottelu toimii myös suuremman datajoukon laadunarvioinnissa (Hand, Mannila ja Smyth 2001).

Datan käsittelyn kannalta on oleellista huomioida tapa, jolla dataa tallennetaan. Nykyisistä tekniikoista SQL, *structured query language*, on yleisin malli, jossa kaikki data kerätään taulukkomaisesti riveihin ja sarakkeisiin. Tällöin data on tallennettuna erittäin tarkasti, mutta sen heikkous on myös liian tarkka datan määrittäminen. Usein SQL-järjestelmät ovat hitaita suurien datamäärien kanssa (Collin ja Saarelainen 2016). Kilpailevat järjestelmät tunnetaan yleisesti nimellä NoSQL, eli *Not Only SQL*, eli järjestelmät, jotka eivät hyödynnä tarkkaa tallennuspaikkaa vaan hajauttavat tiedontallennuksen tietokantaan eri logiikoilla. Usein NoSQL-järjestelmät yhdistävät useita eri SQL-tietokantoja tiedontallennukseen, jolloin perinteisestä SQL-tietokannasta poiketen dataa tallentuu eri kantoihin (Celko 2013). Eri kantojen välillä toimiva käsittelijä on nykyaikaisessa tietokannassa koneoppiva järjestelmä, joka optimoi datanhakua sen mukaan, mitä siltä haetaan (Adelchi ja Scarpa 2012).

2.2 Digital twin-malli

Digital twin, eli digitaalinen kaksonen on neljännen teollisuuden vallankumouksen merkittävämpiä kehityskohteita. Digitaalinen kaksonen hyödyntää kyberfyysistä mallia, jossa todellinen fyysinen laite ja virtuaalisesti identtinen laite ovat samaan aikaan tarkastelussa (Uhlemann, Lehmann ja Steinhilper 2017). Kyseessä ei kuitenkaan ole perinteinen simulointi, jossa tarkastellaan mahdollisia skenaarioita, vaan Lu et al. mukaan digitaalinen

kaksonen on reaaliaikainen monitoroinnin, kontrolloinnin, diagnosoinnin ja ennakkoinnin työkalu (Y. Lu et al. 2019).

Kuten moni muukin keksintö, perustuu digitaalinen kaksonen tarpeeseen ennustaa tulevaa. Ensimmäisen kerran digitaalista kaksosta käytettiin lentokoneen rakennekestävyyden tutkimuksessa (Tuegel et al. 2011). Perinteinen elementtimenetelmän ja simuloinnin tarkastelu ei vastannut käytössä todettuun rakennekestävyyteen, joten lentokoneen rakennesuunnittelussa otettiin huomioon myös käyttödataa esimerkiksi lentokuormista ja käytössä tapahtuneista rakennemuutoksista. Tuegel et al. mukaan tarkasteluun saatiin muuttujia, joita ei ole aikaisemmin pysytty ottamaan huomioon. Myös rakennesuunnittelun päivitettävyyden parani, koska käyttödataa kertyi jatkuvasti, ja sitä kautta myös digitaalinen kaksonen päivittyi (Tuegel et al. 2011).

Digitaalisen kaksosen hyödyntäminen on erityisesti kasvussa korkean tekniikan maissa, koska usein itse tuotettava laite tai järjestelmä sijaitsee halvemman teollisuuden maissa, tai kokoonpano tai käyttöönotto suoritetaan muualla kuin suunnittelu. Nortio ja Lappi mukaan myös laitteen fyysinen koko voi ohjata suunnittelun ja käyttöönoton kohti digitaalista kaksosta. Esimerkiksi Mantsinen Group Ltd Oy on kansainvälinen hydraulinostimien valmistaja, joka on hyödyntänyt digitaalista kaksosta jo useita vuosia, koska Mantsisen valmistamat laitteet ovat fyysiseltä kooltaan niin suuria. Yksittäisen nostinlaitteen paino voi olla jopa 380 tonnia, joten testausta ei olisi järkevää toteuttaa omassa tuotantolaitoksessa. Myöskin tällaisen prototyypin valmistaminen olisi erityisen kallista ja hankalaa, joten suunnittelu toteutetaan suurimmaksi osaksi jo valmiiden laitteiden dataan perustuen. Hydraulinostin kasataan ja käyttöönotetaan samassa paikassa, mihin asiakas on sen tilannut. Nostimen digitaalinen kaksonen varmistaa käyttöönoton sujuvuuden, riippumatta siitä missä itse fyysinen laite sijaitsee (Nortio ja Lappi 2019).

Digitaalisen kaksosen tulevaisuus näyttää myös potentiaaliselta, MarketsAndMarkets tutkimuksen mukaan sen vuosittaisen käytön määrä on arvioitu kasvavan 45 prosenttia, ja sen markkinoiden on arvioitu olevan 36 miljardia dollaria vuonna 2025 (MarketsAndMarkets 2019). Kehitys on mittavaa perinteisellä tuotantotekniikan alalla, koska kasvu ensimmäisestä tutkimuksesta merkittäväksi taloudelliseksi tekijäksi on tapahtumassa alle 15 vuodessa. Suurimpia markkinoita ennustetaan avaruus ja puolustustekniikalle, auto- ja kuljetusteollisuudelle, koti- ja kuluttajatekniikalle, terveydenhuollolle, energia- ja kunnallistekniikalle ja öljyn- ja kaasuntuotannolle. (MarketsAndMarkets 2019).

2.2.1 Mallin muodostus

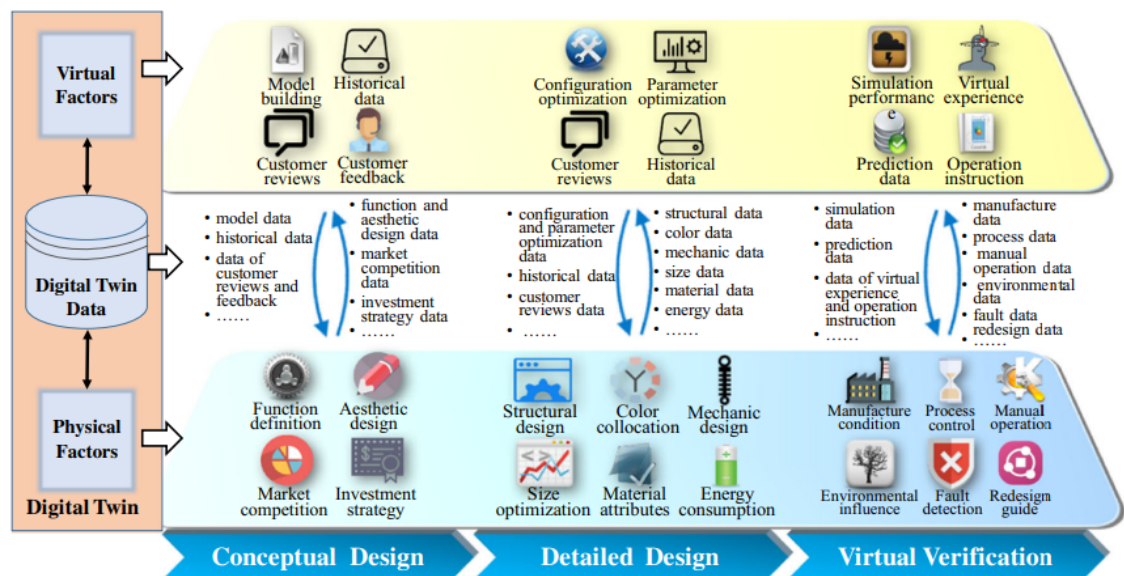
Y. Lu et al. määrittävät tutkimuksessaan digitaalisen kaksosen osaksi älykästä tuotantoa. Älykkäällä tuotannolla tarkoitetaan tässä tapauksessa joustavaa ja korkean hyötysuhteen tuotantoa, jonka tuotantosolut ovat kytkettynä älykkääseen ja nopeasti muutoksiin reagoivaan verkkoon. Tätä kautta älykäs tuotanto on myös adaptiivinen ja mahdollistaa suurien tuotantoerien personoinnin asiakkaan toivomusten mukaan (Y. Lu et al. 2019).

Mallia muodostaakseen täytyy määritellä myös mitä tasoa tarkastellaan virtuaalisesti. Y.

Lu et al. mukaan digitaalisen kaksosen tarkastelu ulottuu yksittäisestä tuotantolaitteesta aina tuotantotyöntekijään asti (Y. Lu et al. 2019). Tyypillisin tarkastelun kohde on kuitenkin esimerkiksi yhden työsolun tai yksittäisen konejärjestelmän, kuten esimerkiksi kaivinkoneen tai koneistusyksikön toiminta.

Kun haluttu tarkastelutaso on päätetty, määritellään digitaaliselle kaksoselle kolme oleellista komponenttia. Ensimmäisenä komponenttina on informaatiomalli, joka tulee fyysiseltä laitteelta. Toisena komponenttina on kommunikaatiota varten viestiväline, joka välittää kommunikaatiota kaksisuuntaisesti laitteen ja virtuaalimallin välillä. Kolmas komponentti on datankäsittelijä, joka muodostaa mallin fyysisen laitteen datasta ja muualta teollisen internetin jakamasta datasta (Y. Lu et al. 2019). Mallin muodostaja voi päivittää lähes rajattomasti virtuaalista mallia erilaisella datalla esimerkiksi aikaisemmasta käyttöhistoriasta tai suunnittelupalautteesta.

Koska digitaaliselle kaksoselle ei ole standardin mukaista määritelmää, malli vaihtelee sen toteuttajan mukaan. Kuvassa 2.3 on aikaisemmassa kappaleessa mainitut kolme komponenttia asetettuna matriisimalliseen kaavioon, jossa mallin suunnitteluvaiheet ovat jaoteltu konsepti-, yksityiskohta- ja virtuaalivahvistustasolle (Tao, J. Cheng et al. 2017). Mallista voidaan havaita myös virtuaaliseen malliin vaikuttavat tekijät, kuten asiakaspalautteet, optimointitoimenpiteet ja pelkästään virtuaalisesti suoritettavat tapahtumat ja niistä saadut tiedot. Nämä tekijät vaikuttavat osaltaan myös fyysiseen laitteeseen, eli digitaalinen kaksosen voidaan todeta olevan aidosti kaksisuuntainen teknologia.



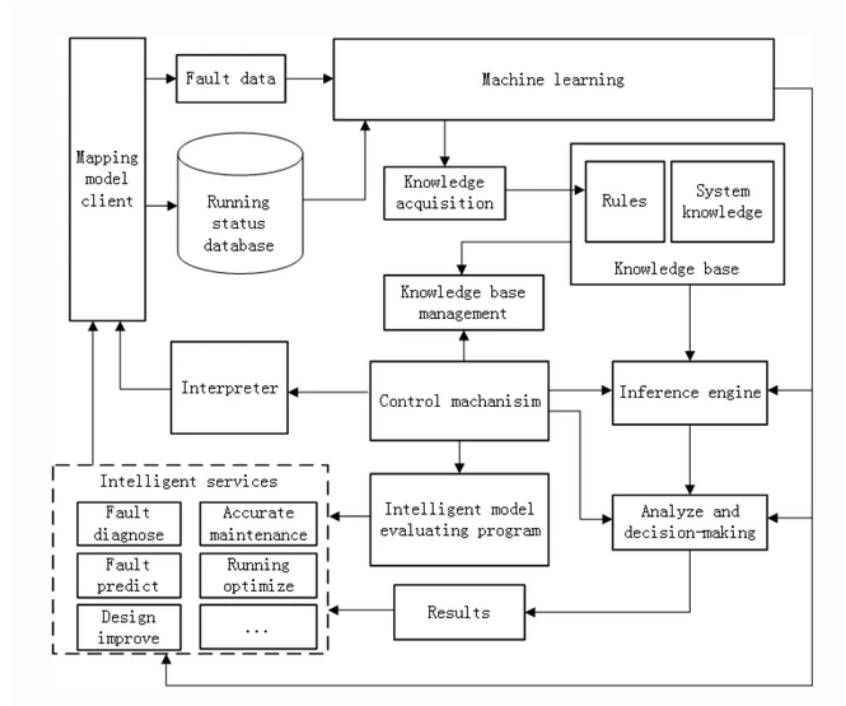
Kuva 2.3. Digitaalisen kaksosen kolme eri komponenttia kuvattuna suunnittelun ja tuotannon eri vaiheisiin (Tao, J. Cheng et al. 2017).

Tulevaisuudessa erityisesti fyysisen tason tuotantovaihe tulee entistä lähemmäksi digitaalisen mallin avulla. Tällöin myös suunnittelun ja tuotannon eri vaiheet sulautuvat entistä enemmän toisiinsa, ja jo suunnitteluvaiheessa voidaan tehdä päätöksiä jotka siirtyvät myös tuotantovaiheeseen, esimerkiksi valmiin koneistusmallin muodossa.

2.2.2 Datan keräys ja käsittely

Yleisesti tuotantoa ja digitaalisen kaksosen käyttöä varten on muodostettu useita tietomallistandardeja, joiden mukaan data tulee muodostaa, käsitellä ja jakaa eteenpäin. (Y. Lu et al. 2019). Y. Lu et al. mukaan yleisimpiä ovat ISO-standardit 10303 ja 146649 (Y. Lu et al. 2019). Erityisesti ISO 10303 tunnetaan lyhenteestään STEP, eli *Standard for the Exchange of Product model data* (ISO10303-242:2020 2020). STEP-malli sisältää tuotettavan kappaleen suunnittelun lisäksi tietoa valmistuksesta ja tuotteen elinkaaresta. Erityisesti vuonna 2014 julkaistut sovellusprotokollat ovat tarkoitettu erityisesti teollisuus 4.0 tarpeisiin. Niissä on määritelty entistä tarkemmin tiedot kokoonpanoista ja koneistuksesta (ISO10303-242:2020 2020).

Muodostuva datamäärä luo kuitenkin ongelmia perinteiselle tietojenkäsittelylle. Datakäsittelyä varten on luotu algoritmimalli, joka yleensä koostuu ra'an datan kannasta, tietokannasta, käsittelijästä, kontrollerista ja koneoppivasta järjestelmästä (Luo et al. 2018). Malli on esitelty kuvassa 2.4.



Kuva 2.4. Digitaalisen kaksosen data-algoritmimalli, joka on sovellettu CNC-yksikön digitaaliselle kaksoselle (Luo et al. 2018)

Luo et al. toteaa, että toimivan algoritmin avulla järjestelmä on tarkasti simuloituva, itsenäinen datankerääjä, itsestään säätyvä, itsestään ennustava ja itsearvioiva (Luo et al. 2018). Malli on esimerkillinen myös hajautetusta järjestelmästä, jossa eri osioit pystyvät itsenäiseen päättelyyn, jolloin kokonaisuus pysyy kevyest suoritettavana, ilman raskasta keskitettyä järjestelmää (Collin ja Saarelainen 2016).

3 KÄYTÖN OPTIMOINTI

Modernille tuotannolle voidaan asettaa monia erilaisia tavoitteita, joilla saadaan tuotanto halutunlaiseksi. Tavoitteita koitetaan saavuttaa erilaisten tekniikoiden ja mallinnusten avulla. Tavoitteiden asettamia vaatimuksia varten tuotannon eri parametrit tulevat täsmätä parhaalla mahdollisilla tavalla, jotta käyttö on optimoitua (R. V. Rao 2009). Tämä luku käsittelee erityisesti kappaletavaratuotannon erilaisia optimoinnin lähestymistapoja, ja miten niitä voidaan soveltaa digitaalisen kaksosen kautta tapahtuvassa optimoinnissa.

3.1 Optimoinnin lähestymistapoja

Perinteisesti kappaletavaratuotanto tähtää halpuihin tuotantokustannuksiin, eli hukkamateriaalia tulee muodostua mahdollisimman vähän, tuotantolaitteen käyntiaika tulee olla mahdollisimman lyhyt, jotta energiaa ei kulu liikaa, ja tuotteen valmistukseen kuluu mahdollisimman vähän ihmistyövoimaa. Aiemmin mainittujen perinteisten tuotannon osalueiden lisäksi on tullut uusia näkemyksiä esimerkiksi ilmastonmuutoksen ja yleisten mieliteiden muutoksien myötä. Tuotantoa voidaan esimerkiksi optimoida ekologiseen suuntaan, eli sen kuormitus luonnolle on mahdollisimman pieni (J. Li et al. 2017). Toisaalta tuotantoa voidaan painottaa turvallisuuden kannalta, koska nykyään yleisenä tahtotilana on minimoida työtaturmat.

Kaikki edellisessä kappaleessa mainitut tutkimusnäkökulmat pohjautuvat osittain käytön optimointiin. Kappaletavaratuotannossa käytön optimoinnilla tarkoitetaan tuotantolaitteiden ja tuotantosolujen maksimaalisen kapasiteetin hyödyntämistä, koska kaikki mikä ei tuota lisäarvoa tuotteelle tai jarruttaa seuraavaan tuotantovaiheeseen siirtymistä, heikentää tuotannon tehokkuutta. Käytön optimointiin voidaan liittää myös epäsuorasti vaikuttavat tekijät, kuten osien vaihdot ja huoltotoimenpiteet. Usein käytön optimoinnin laajuutta on haastavaa huomioida, koska esimerkiksi energiatehokkuuteen tähtäävässä tuotannossa laitteen käyttöaika on yksi kriittisistä tekijöistä. Käytön optimoinnin avulla voidaan selvittää, kannattaako esimerkiksi tuotantolaitteita pitää jatkuvasti käynnissä, vai kuluttaako se vähemmän energiaa esimerkiksi sammuttamalla ja käynnistämällä uudelleen tuotantovaiheen välillä.

Merklein, Franke ja Hagenah selvittivät käytön optimointia toisesta näkökulmasta, jossa ympäristön olosuhteita muutettiin prosessin optimoimiseksi. Koneistettavat kappaleet lämmitettiin normaalia huonelämpötilaa huomattavasti korkeampiin lämpötiloihin, jolloin tarvittiin vähemmän koneistuksen tehoa, ja leikkuuterät kestivät huomattavasti pidem-

pään, koska kuumennettu materiaali on merkittävästi pehmeämpää (Merklein, Franke ja Hagenah 2013). Tällaista käytön optimointia voitaisiin soveltaa esimerkiksi valimon yhteydessä olevaan koneistusyksikköön, koska lämpöenergiaa muodostuu jo valmiiksi huomatava määrä valimon tuotannosta.

3.2 Oleelliset parametrit ja niiden ohjaus

Huolimatta siitä mikä on valittu lähestymistapa, tuotannon kannalta on tarpeen valita oleelliset parametrit ja päättää kuinka niitä ohjataan. Käytön optimointia varten on sovellettu perinteistä simulointia, mutta se perustuu tiedettyyn ongelmakohtaan, ja usein pääteltävä data tai parametri on pitänyt syöttää käsin. Myös usein erilaiset syöttöarvot on jouduttu arvioimaan ja tarkan arvon saaminen on työlästä. Simulointia on ajanut eteenpäin tietokoneiden ja ohjelmistojen laskentatehon kasvu, jolloin samaa tapahtumaa tai prosessia on voitu simuloida useilla eri arvoilla saaden laajan testausdatan. Ongelmana perinteisessä simuloinnissa on kuitenkin sen käytännön toteuttaminen ja pitkä suunnittelu-aika. Lisäksi usein testilaitteiden ominaisvirheitä tai testaustilannetta ei ole otettu huomioon, ja tällöin on parametrien optimointi on aloitettu uudestaan simuloinnin perusteella.

3.2.1 Aika

Yleisimpänä tarkasteltavana parametrina on aika. Valmiille tuotteelle on erittäin hankala määrittää valmistusaikaa, koska se riippuu usein muuttuvista työvaiheista. Suunnittelu, mahdolliset muokkaukset, työvaiheiden välillä siirtely ja kiinnitys, kuivumisajat ja viimeistely ovat esimerkkejä muuttuvista tekijöistä, joiden ajallinen kesto voi vaihdella suuresti. Vakioajat voidaan määrittää usein vain esimerkiksi koneistukselle, jolloin koneistusmalli on simuloituna jo virtuaalisessa ympäristössä (Yangfan, Hongyao ja Jianzhong 2017). Kun tiedetyt käyntiajat on kerätty, voidaan kokonaista tuotantoaikaa määrittää esimerkiksi muuttuvien käyntiaikojen keskiarvoista.

3.2.2 Laatu

Laatu on yksi merkittävimmistä parametreista. Perinteinen laadun optimointi on kuitenkin hankalaa, koska laaduntarkkailu on usein vasta tuotannon loppupäässä tai pelkästään osa valmiin tuotteen arviointia. Tuotantoketjun optimoinnin kannalta on parempi kerätä jatkuvaa dataa laadusta, ja ohjata tuotannon laatua jo eri välivaiheissa.

Laadun optimoinnin kannalta voidaan tehdä erilaisia päätöksiä. Yleistyvä malli on tuottaa jo alkuun tarpeeksi laadukkaita tuotteita, jolloin kaikki mahdolliset virhettä muodostavat tekijät on huomioitu jo ennen tuotantoa (Franciosa et al. 2020). Laatu on toisaalta myös kaikkia muita parametrejä yhteen kokoava arvo. Konrad, Lieber ja Deuse mukaan laatuun voidaan vaikuttaa hallitsemalla kaikkea dataa, jota tuotannossa muodostuu. Saadusta datasta voidaan arvioida laatumalli esimerkiksi datalouhinnan avulla (Konrad, Lieber ja Deuse 2013).

3.2.3 Kustannukset

Kustannukset on ehkä merkittävin tekijä tuotannossa. Se myös sitoo eri parametrejä yhteen, koska moderni tuotanto tarkastelee jokaisen vaiheen kustannuksia. Kustannuslaskenta on erityisen haastavaa teollisen internetin aikakaudella, koska aloituskustannukset ovat yleensä merkittävät (Bukantaite 2020). Tällöin tuotannon kustannukset tulee jakaa investointikustannusten kanssa siten, että laitteisto maksaa itsensä takaisin jossain vaiheessa. Kustannusten vuosittaiset poistot tulisi suunnitella siten, ettei tuotantotekniikkaan investointi näkyisi liikaa lopputuotteen hinnassa. Yleensä tämä tarkoittaa pitkän aikavälin kustannussuunnitelmaa.

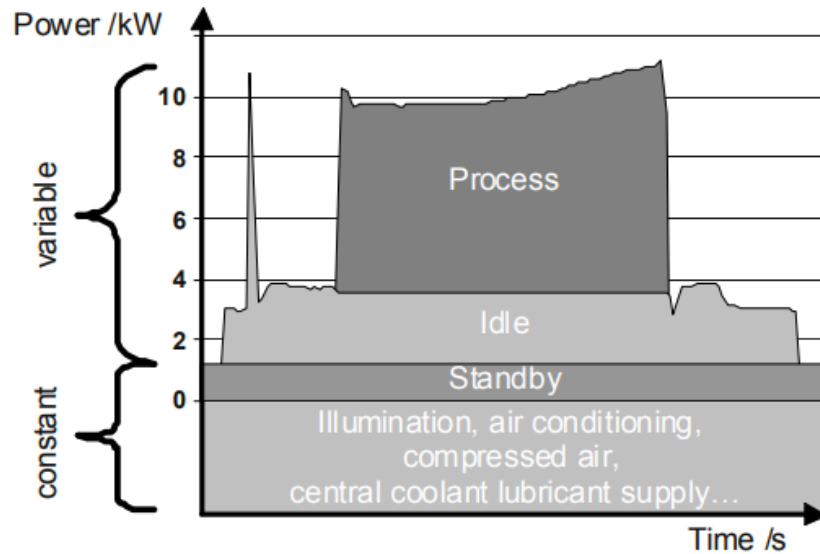
3.2.4 Materiaalit

Materiaalit ja raaka-aineet kuuluvat yhteen parametriin, jota optimoimalla voidaan saavuttaa useita hyötyjä. Materiaali on usein määritetty ennalta jo suunnitteluvaiheessa, mutta erityisesti materiaalin käyttöön voidaan vaikuttaa. Koneistuskappaleen koko ja koneistusradat määrittävät kuinka paljon esimerkiksi tuotannosta syntyy hukkamateriaalia. Suunnittelun ja koneistusmalli määrittävät tuotannossa tarvittavan materiaalin, jonka taustalla oleva tuotantojärjestelmä voi varata varastosta tai toimittajalta, optimaalisessa järjestelmässä ilman ihmisen väliintuloa (Tao, J. Cheng et al. 2017). Myös hukkamateriaalin hyödyntämisen voidaan ottaa osaksi materiaaliparametriä, jos sitä voidaan uudelleenkäyttää tuotannossa.

3.2.5 Energia ja ympäristö

Ilmastokriisin aikana energiasta ja ympäristöstä on muodostunut merkittävä parametri. Jo pelkästään valmiin tuotteen myyntiin saattaa vaikuttaa sen luontoa rasittava jalanjälki. Myös siirtyminen pois perinteisistä energialähteistä, kuten fossiilisista polttoaineista on tuonut lisäkustannuksia, ja siten myös energian kulutukseen kiinnitetään enemmän huomioita. Tuotetulle tavaralle voidaan haluta hyvittää hiilijalanjälki, jolloin myös tuotannon tarkat hiilidioksidipäästöt ja muut haitat tulee huomioida.

Energiankulutuksen optimointi on haastavaa, erityisesti kokonaiskuvan muodostamiseen voi kuulua paljon selvitystyötä. Kappaletavaratuotannossa yksittäisen tuotantolaitteen energiankulutus voi olla hetkellistä ja pientä, mutta taustalla olevat prosessit voivat viedä huomattavan määrän energiaa (Schlosser, Klocke ja Lung 2011). Laitteet voivat vaatia jatkuvaa paineilmaa, ilmastointia tai valaistusta, jotta tuotantoprosessi voidaan suorittaa. Kuvassa 3.1 on esitelty tyypillisen lastuavan työstön energiankäytön jakautumista ajan mukaan. Prosessista puolet kuluu taustalla oleviin toimintoihin ja laitteen joutokäyntiin.



Kuva 3.1. Lastuavan työstön energiankäyttö ajan mukaan (Schlosser, Klocke ja Lung 2011)

Osan energian ja ympäristön käytön optimoinnille tuo tuotettavalle laitteelle määritetty elinkaari. Tuotteelle voidaan määrittää koko elinkaaren pituinen hiilidioksidikuormitus tai sen kierrätettävyyttä voidaan määrittellä käytön loputtua (T. Lu et al. 2011). Tällaiset arvot tulevat painottumaan tulevaisuudessa, ja asiakas voi vaatia tietyntasoista kierrätettävyyttä tai hiilijalanjälkeä.

3.2.6 Laitteet ja työntekijät

Laitteet ja työntekijät ovat yksi parametreista, joiden määrittäminen ja ohjaus voivat olla haastavia, erityisesti silloin, kun ihminen tekee työtä laitteiden työvaiheiden välillä. Ihmisen toimintaan voi kuitenkin vaikuttaa koulutuksella ja perehdytyksellä. Laitteiden kannalta oleellisinta on toiminta osana kyberfyysistä tuotantoa. Toisaalta moderni tekniikka mahdollistaa entistä parempaa koneen ja ihmisen yhteistyötä, koska anturitekniikan kehityksen ansiosta se on turvallista ja tuotannon kannalta tehokasta (Bilberg ja Malik 2019). Aina myöskään täysin automatisoitu tuotanto ei välttämättä ole kustannusten kannalta hyödyllisintä. Bukantaite tutkii artikkelissaan kappaletuotannon kannattavuutta ihmispohjaisen, osittain robotisoidun ja kokonaan robotisoidun tuotannon näkökulmista. Ensimmäiseksi arvioitiin tuotannon eri arvot, eli kuinka suuri merkitys niillä on nollasta yhteen. Arvot on löytyvät kuvasta 3.2.

Factor	Value
1. Cost of production line	0.95
2. Possibility to produce complex products	0.90
3. Quality of produced items	0.80
4. Quantity of items produced	0.70
5. Production time	0.70
6. Area used	0.65
7. Energy consumption	0.65

Kuva 3.2. Tuotannon arvot painotettuina nolasta yhteen (Bukantaite 2020).

Seuraavaksi arvioitiin eri tuotantoresurssien kykyä vastata eri arvoihin. Arvot löytyvät kuvasta 3.3 Tuotantolinjan kustannuksia tarkastellessa ei ole huomioitu robottien hankinta-kustannuksia. Merkittävimmät erot voidaan huomata ihmisen ja robotin välillä tuotannon laadussa, tuotantomäärässä ja tuotantoajassa. Tässä tapauksessa ihmistyön arvot vastaavat kuitenkin haluttua, jolloin voidaan ajatella, että robotin työn laatu ja tuotantomäärä on turhaan liian hyvä.

Situation	Factors						
	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.
Existing situation	1	1	0.90	0.8	0.9	1	1
Partly robotic situation	0.70	1	0.95	1	1	1	0.95
Fully robotic situation	0.50	1	1	1	1	1	0.9

Kuva 3.3. Kolme eri tuotantotapaa kuvattuna suunnittelun ja tuotannon eri vaiheisiin (Bukantaite 2020).

Huomataan, ettei samalla tuotantokapasiteetilla saavuteta juurikaan suuria etuja ihmisen ja robotin suorittaman tuotantotyön välillä. Automatisoidun tuotannon hyödyt tulevat siis vasta todella ilmi, kun tuotantokapasiteetti kasvaa tietyn pisteen yli. Tällaisen yksinkertaistetun pisteytyksen avulla voidaan tarkastella myös yleisesti eri tuotantovaiheiden toteutuksia eri järjestelmillä ja työntekijöillä. Painotus voidaan valita haluttujen parametrien mukaan.

3.2.7 Joustavuus

Joustavuus on osa uudempaa tuotannon tarkastelua, jossa tutkitaan kootusti kaikkia tuotannon parametreja, ja niiden perusteella määritellään miten tuotantojärjestelmä käyttäytyy jos siihen tehdään muutoksia. Joustavuus on erinomainen parametri digitaalisen kaksosen tarkasteluun, koska joustavuus ja digitaalinen kaksosen perustuvat vahvasti reaaliaikaisen datan hyödyntämiseen (Roy et al. 2020).

4 OPTIMOINTI DIGITAL TWIN-MALLI AVULLA

Digitaalisen kaksosen avulla tapahtuva optimointi voidaan suorittaa monesta eri näkökulmasta, mutta useimmiten siihen on kaksi erilaista lähestymistapaa. Perinteisenä mallina on valmiin tuotteen tai tuotannon tuottaman tietomäärän hyödyntäminen, kuten jo aikaisemmin mainitun lentokoneen rakenneväsymisen selvitys. Tällöin itse prosessi ei välttämättä sisällä mittavaa määrää antureita tai muuta älykästä tekniikkaa, vaan digitaalinen kaksonen muodostuu valmiista datasta tehdyistä tulkinnoista, ja esimerkiksi antureita voidaan lisätä niihin kohtiin, joissa niistä on apua optimoinnissa. Toinen yleistyvä tapa on jo valmiiksi paljon anturidataa keräävän järjestelmän vienti digitaalisesti kaksoseksi. Tällöin optimointi voidaan kohdistaa esimerkiksi lopputuotteen laadun simulointiin, koska itse tuotantoprosessi on jo tarkasti tiedossa. Esimerkkinä voidaan pitää lisäävän valmistuksen tuotanto, jossa jo valmiiksi nykyaikaiset ja älykkäät laitteet tuottavat tarpeeksi tarkkaa tuotantodataa digitaaliselle kaksoselle (DebRoy et al. 2017). Knapp et al. mukaan optimoinnissa on voitu keskittyä lisäävän materiaalin ominaisuuksiin, asettamalla esimerkiksi laserin tehon ja syötettävän materiaalin nopeutta siten, että rakenteesta on saatu kestävämpää (Knapp et al. 2017).

Toisaalta digitaalinen kaksonen voi ulottua koko tuotannon alueelle, jolloin myös käytön optimointi on tehokkaimmillaan. Digitaalinen kaksonen huomioi jokaisen tuotantovälineen, prosessin ja palautuvan datan. Tao, M. Zhang, J. Cheng et al. kuvaa tällaista tuotantoa termillä *Digital Twin Shop Floor*, DTS, eli digitaalinen työtila (Tao, M. Zhang, J. Cheng et al. 2017).

4.1 Virtuaalisen mallin käyttöönotto tuotannossa

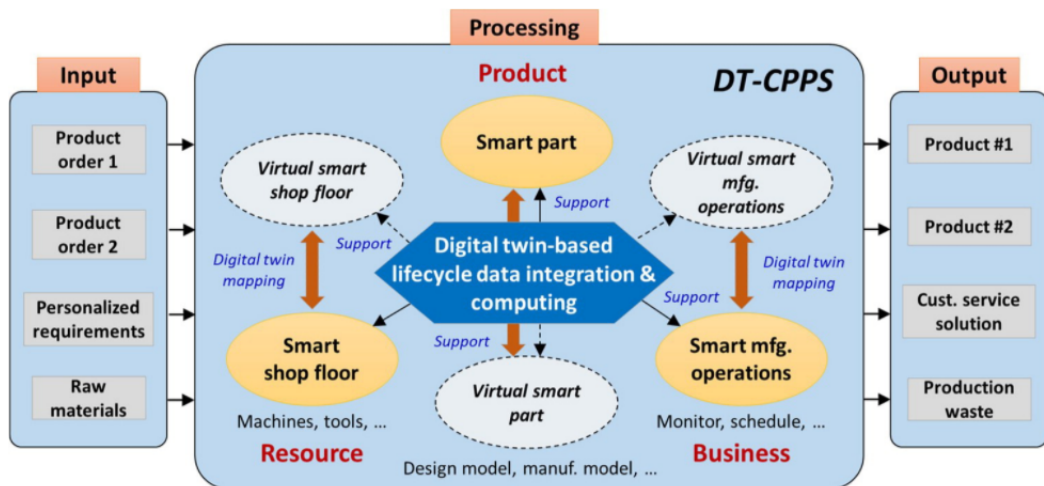
Varsinaista käyttöönottoa ei tapahdu, koska fyysinen ja virtuaalinen laite ovat yhteydessä jatkuvasti. Kuitenkin esimerkiksi pelkästään virtuaalisella puolella tapahtuvassa testauksessa tulee huomioida mahdollisesti muuttuneet parametrit. Päätöksiä tekevä algoritmi ja sen koneoppiva neuroverkko ei välttämättä huomioi virheellisiä parametrejä, jos virtuaalinen ajo on muuten onnistunut ilman virheitä. Tällöin fyysinen laite voi vioittua tai tuotettava kappale voi olla virheellinen.

Läpikäydyn tutkimusmateriaalin perusteella varsinaista rajaa digitaalisen kaksosen käytölle ei ole, mutta usein esimerkiksi taloudelliset resurssit voivat olla liian suuret. Bukantaite toteaaakin, että digitaalisen kaksosen vaatima vanhan laitteiston modernisointi voi olla yritykselle liian kallis. Toisaalta Bukantaite mainitsee myös, että digitaalisen kakso-

sen alun investointikustannukset ovat kalliit, mutta pidemmällä aikavälillä tarkasteltuna tuottaa yritykselle taloudellista hyötyä (Bukantaite 2020).

4.2 Prosessin analysointi

Digitaalisen kaksosen analysoinnin vahvuus on sen datanhallinnassa. Reaaliaikainen järjestelmä tallentaa jatkuvasti uutta dataa, mutta digitaalinen kaksosen hyödyntää myös jo olemassa olevaa dataa, ja osaa sen perusteella tehdä muutoksia prosessiin (Luo et al. 2018). Datahallinta vaatii osakseen algoritmin, jonka perusteella prosessi tapahtuu. Tätä varten on kehitetty digitaalisen kaksosen kyberfyysinen tuotantojärjestelmä, DT-CPPS, *Digital Twin-based Cyber-Physical Production System*, joka muodostaa yhteisen mallin valmistukselle ja siihen tarvittavalle tuotantolaitteille (Ding et al. 2019). Malli on esitelty kuvassa 4.1.



Kuva 4.1. Digitaalisen kaksosen muodostama kyberfyysinen tuotantojärjestelmä (Ding et al. 2019).

Digitaalisen kaksosen kyberfyysinen tuotantojärjestelmä on suunniteltu kappalevara-tuotantoa varten, erityisesti koneistukseen, jossa on suuri vaihtuvuus valmistettavissa tuotteissa. DT-CPPS malli on tuotantomalliltaan yksinkertainen, tietty syöte käsitellään digitaalisen kaksosen kautta, ja lopputuloksena on valmis tuote. Merkittävä poikkeus muodostuu kuitenkin systeemin autonomisessa päättelyssä ja analysoinnissa. Syöteenä voi olla täysin uusi tuotettava kappale, mutta digitaalinen kaksosen osaa muodostaa asiakkaan mukaisen lopputuotteen perustuen syötettyyn dataan ja aikaisempaan tuotantodataan. Tuotetun kappaleen lisäksi DT-CPPS muodostaa analyysin omasta toiminnastaan, arvioiden tuotannon yli jääneen materiaalin ja asiakastilauksen valmiuden (Ding et al. 2019). Esimerkiksi tilaus voi olla moniosainen ja tuotettavana on useita eri kappaleita, jolloin DT-CPPS pystyy analysoimaan tuotantojärjestyksen ja tuotantoajan, samalla keräten kaikille kappaleille oman valmistustietonsa, joka voidaan jakaa eteenpäin asiakkaalle.

4.3 Ongelmakohtien selvitys

Käytön optimoinnissa ongelmakohdat johtuvat usein aikaisemmassa luvussa mainittujen oleellisten parametrien virheistä. Digitaalisen kaksosen avulla ongelmaratkaisuun voidaan kuitenkin syventyä, erityisesti jos jokainen tuotantovaihe on kytketty yhtenäiseksi digitaaliseksi tuotantotilaksi. Dataa käsittelevä algoritmi käy läpi jokaisen tuotantovaiheen reaaliaikaisesti, ja tarvittaessa korjaa tuotannon halutun kaltaiseksi.

Ongelmia kohdatessa digitaalinen kaksonen on helppo jakaa kahteen osaan, fyysiseen ja virtuaaliseen. Tällöin molemmilla voidaan ajaa sama ohjelma, ja todeta sen perusteella, onko ongelma laitteissa vai mallissa. Jos vika löydetään laitteista, voidaan korjaustoimenpiteiden aikana jatkaa prosessin tutkimusta eteenpäin pelkästään virtuaalimallin avulla. Mallissa huomattavat ongelmat heijastuvat yleensä myös laitteistoon, jolloin mallin parametrejä tulee muuttaa.

4.4 Uusien prosessivaiheiden testaus

Kuten aikaisemmin jo todettiin, tarkastellessa kyberfyysistä kokonaisuutta, voidaan se tarvittaessa myös pilkkoa osiin. Tämä on erityisen hyödyllistä silloin, kun halutaan lisätä ominaisuuksia esimerkiksi tuotantoprosessiin. Zheng, Yang ja H. Cheng toteaa, että digitaalisen kaksosen vahvuudet tulevat esiin tuotannossa ja erityisesti testauksessa, mutta tekniikka on vielä liian uutta laajemmalle käytölle (Zheng, Yang ja H. Cheng 2019). Uuden prosessivaiheen sisäänajo vaihtelee sen laajuuden mukaan, mutta Söderberg et al. mallin mukaan se on yksinkertaistettuna kolmivaiheinen. Ensimmäisessä vaiheessa kappaleen tuotanto ajetaan täysin simulaationa, esimerkiksi CAM-ohjelmassa. Seuraavassa vaiheessa digitaalinen kaksonen muodostuu, kun koneistus käydään läpi samaan aikaan fyysisellä laitteella ja simulaationa virtuaalisella päätteellä. Kolmas vaihe on toiminnoiltaan samanlainen, mutta nyt prosessissa on myös mukana raaka-aineet, esimerkiksi koneistusaiho (Söderberg et al. 2017). Mahdolliset virheet tulevat ilmi vaiheiden välillä, esimerkiksi fyysinen laite voi ilmottaa mahdottomasta vaiheesta, jolloin ohjelmisto muokkaa vaihetta haluttuun suuntaan.

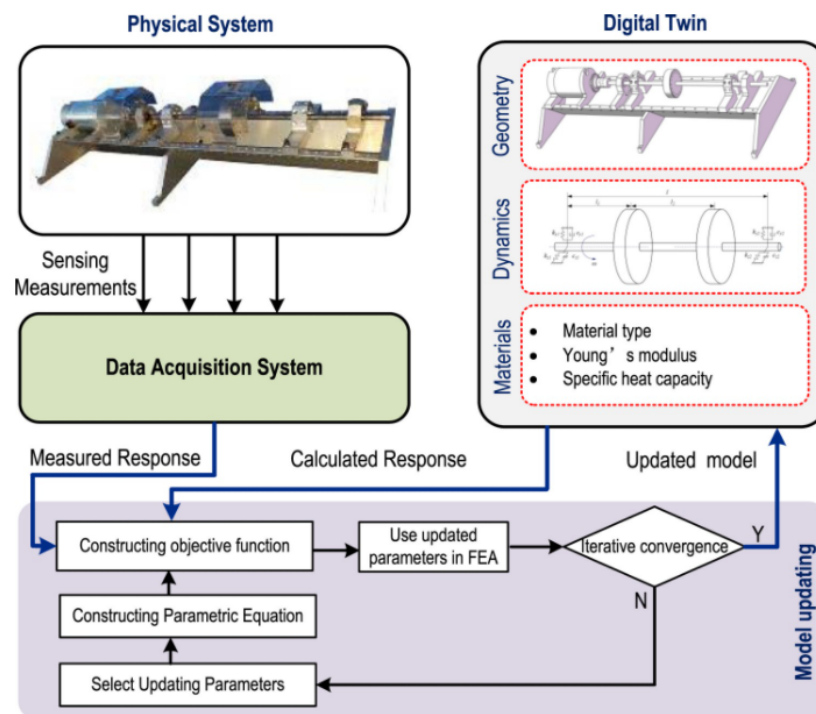
Uuden prosessin lisääminen ei välttämättä tarkoita täysin uuden vaiheen suunnittelua, vaan datankäsittelyn ja koneoppimisen avulla jo olemassa olevaa dataa voidaan hyödyntää. Liu et al. esittää artikkelissaan, että vasta suunnitteluvaiheessa kappaleelle voidaan mallintaa sen tuotanto hyödyntäen samanlaisten kappaleiden tuotantotietoja (Liu et al. 2019). Samalla saadaan lyhennettyä kappaleen siirtymistä suunnittelusta tuotantoon, ja tuotannonsuunnittelu yksinkertaisille kappaleille saadaan parhaimmillaan täysin automaattiseksi.

4.5 Esimerkkejä käytön optimoinnista tuotannossa digitaalisen kaksosen avulla

Vaikka tutkimuskohteena digitaalinen kaksonen ja käytön optimointi yhdistelevät uutta ja vanhaa, on sen pohjalta saatu paljon käytännön hyötyä. Tutkimustyö on kuitenkin edelleen vahvasti kehitysvaiheessa, ja uusia tutkimuksia tulee yhä laajemmista sovelluksista. Tähän alakappaleeseen on kerätty erilaisia esimerkkejä käytön optimoinnista ja digitaalisen kaksosen hyödyntämisestä. Esimerkit on pyritty valitsemaan mahdollisimman laajasti, jotta lukijalle välittyy tieto näiden tekniikoiden ja kappaletavaratuotannon laajuudesta.

4.5.1 Pyörivän koneistuksen digitaalinen kaksonen ja parametrien viritys

Käytön optimointi ei ainoastaan rajoitu tuotettavaan kappaleeseen, vaan myös tuotantokoneiston käyntiä ja toimintoja tulee optimoida tarpeen mukaan. Wang et al. mallintavat artikkelissaan pyörivässä koneistuksessa muodostuvaa virhettä rullakoneiston avulla. Pyörivässä koneistuksessa, kuten esimerkiksi sorvauksessa virhe voi muodostua epätasapainoisesta pyörimisestä tai huonosta kiinnityksestä istukkaan (Wang et al. 2019). Yleensä muodostuvan virheen huomioiminen on osa koneistajan, eli ihmisen tehtävää, mutta yksinkertaisen anturoinnin ja kyberfyysisen mallin avulla muodostettiin jatkuvasti päivittyvä järjestelmä, joka on esitelty kuvassa 4.1.



Kuva 4.2. Pyörivää koneistusta simuloiva rullakoneisto, jossa esiteltynä digitaalisen kaksosen kolme eri tasoa (Wang et al. 2019).

Testissä koneistettavaa osaa kuvaavaksi kappaleeksi on valittu kaksi kiekkoa ja akseli, ja kokonaisuudelle on määritetty dynaaminen malli. Akselin molempiin päihin on kiinnitetty kaksi pyörrevirtaan perustuva anturia, jotka keräävät dataa x- ja y-akseleilta. Akseleille on kiinnitetty lisäpainoja epätasaisesti, jolloin hitausmomentti akselin suhteen ei ole tasainen. Tämä simuloi todellista koneistustilannetta, koska koneistettava kappale ei ole aina akselin suhteen tasapainossa. Anturien poikkeamien perusteella digitaalinen kaksosen laskee uuden kriittisen pyörimisnopeuden ja epätasapainoisen pyörimisen värähtelytaajuuden. Mallin reagointiaikaan pystyttiin myös vaikuttamaan, kun otettiin huomioon parametreinä sekä pyörimisnopeus ja värähtely, koska kahden muuttujan iterointikerrat sopivien arvojen löytämiseksi olivat huomattavasti pienemmät. Digitaalisen kaksosen paikkaansa pitävyyttä testattiin myös ilman fyysisen ja virtuaalisen laitteen yhteyttä, jolloin mitattu arvo ja kaksosen arvo heitti hieman. Tilanne kuitenkin korjaantui, kun digitaalinen kaksosen päivitettiin anturien antaman datan perusteella (Wang et al. 2019).

4.5.2 Tyhjiölasivalmistuslinjan suunnittelu ja optimointi

Neljättä teollisuuden vallankumousta ajaa Kiinassa valtiojohtoinen projekti, Made In China 2025, joka on sisällöltään vahvasti samaa kuin länsimaissa on määritelty Industry 4.0 (The Institute for Security and Development Policy 2018). Yksi merkittävä kohde on tuotantolaadun varmistaminen ja sen optimointi halutulle tasolle. Zhang et al. esittää tutkimuksessaan tyhjiölasin tuotantolinjan suunnittelua ja optimointia digitaalisen kaksosen avulla. Merkittävää tästä tutkimuksesta tekee sen, että digitaalisen kaksosen avulla pystyttiin tuottamaan erityyppisiä laseja vaihtamatta merkittävää määrää parametreja, ja täten lyhentäen tuotantoaika merkittävästi (H. Zhang et al. 2017). Tutkimuksesta käy myös ilmi anturitekniikan merkitys, digitaalisen kaksosen muodostamiseen ei vaadittu merkittävää käsittelyä, vaan malli pystyttiin muodostamaan ohjelmiston avulla perustuen saatun dataan.

Tutkimuksessa tuodaan esiin digitaalisen kaksosen toimivuutta suuremman luokan kappaletavaratuotantolaitoksissa, jossa koko työpajan laitteisto on yhden digitaalisen kaksosen alla. Myös samoilla laitteilla tuotettavien erilaisten kappaleiden määrä on suuri, yli 200 erilaista tyhjiölasiputkea. Järjestelmää ajettiin myös optimoiden eri tilausmäärillä, jolloin pelkästään virtuaalista mallia ajamalla saatiin optimi tuotantoaika ja tuotantolaitteiden kuormitus (H. Zhang et al. 2017).

4.5.3 STEP tools Inc. koneistuksen laadun optimointi

Reaaliaikainen laaduntarkastus on oleellinen osa tuotantoa, jotta mahdolliset virheet eivät toistuisi seuraavissa tuotettavissa kappaleissa. Esimerkiksi koneistusyksikössä kulunut työkalu voi aiheuttaa virheitä koneistustarkkuudessa, ja pahimmillaan vaikuttaa koko tuotantoerään. STEP tools Inc. on erikoistunut STEP-mallin mukaiseen tuotantoon, ja kehittänyt digitaaliseen kaksoseen pohjautuvan laadun optimointijärjestelmän. Koneistuksen laatua tarkkaillaan rinnakkaisen virtuaalikoneen ja digitaalisen kaksosen avulla, jo-

ka ajaa optimaalista tuotantolaatua. Tätä verrataan koneistetun laatuun reaaliaikaisesti. Poikkeamat aiheuttavat hälytyksen, jolloin koneen operaattori voi tarkastaa koneistuksen heiton selainpohjaisen sovelluksen avulla (STEP Tools Inc. 2017).

5 ANALYYSI

Monet mullistavalta kuulostavat neljännen teollisuuden vallankumouksen tekniikat ovat jo käytössä teollisuudessa, mutta usein niihin liittyvät tutkimukset ovat toteutettu ainoastaan konseptitasolla. Tässä kappaleessa käsitellään kriittisesti eri näkökulmista digitaalisen kaksosen hyödyntämistä kappaletavaratuotannossa. Kriittinen tarkastelu antaa myös arviota digitaalisen kaksosen tulevaisuudesta, ja siitä miten teollisuus 4.0 tulee ylipäättään muodostumaan tulevaisuudessa.

5.1 Digitaalisen kaksosen riskit ja ongelmat

Työssä läpikäytyjen lähteiden perusteella suurin osa ohitti osittain tai täysin digitaaliseen kaksoseen liittyvät riskit ja ongelmat. Uudenlainen teknologia vaatii kuitenkin kriittistä tarkastelua, jotta voidaan määrittää sen seuraavia askelia. Osittain digitaalisen kaksosen ongelmat liittyvät teknologioiden hitaaseen yleistymiseen, jolloin täyttä potentiaalia ei pystytä muodostamaan. Kappaletavaratuotannon kannalta eri tutkimuksia lukiessa huomattiin myös, että suuremman mittaluokan tarkastelu on jäänyt tutkimusartikkeleissa vähäiseksi. Tämä tuo osaltaan hidastavia tekijöitä digitaalisen kaksosen yleistymiseksi.

5.1.1 Tietoturva

Toinen merkittävä riski on tietoturva. Eckhart ja Ekelhart mukaan merkittävin osa kyberfyysisten järjestelmien tietoturva-aukoista muodostuvat operatiivisten järjestelmien vuoksi (Eckhart ja Ekelhart 2019). Usein digitaalisen kaksosen taustalla olevasta järjestelmästä informaatioteknologia on hyvin suojeltua, esimerkiksi työntekijöiden tietokoneet, verkolevyt ja tietoliikenneyhteydet operatiivisten järjestelmien ulkopuolella. Kuitenkin operatiivisen järjestelmän laitteet, kuten ohjauspiirit ja toimilaitteet on suunniteltu pääasiassa toimimaan reaaliaikaisesti ja mahdollisimman yksinkertaisesti, jotta yhteysongelmilta vältyttäisiin. Tämä kuitenkin aiheuttaa tietoturvan kannalta ongelmia, koska operatiivisten laitteiden kautta on pääsy myös informaatioteknologian puolelle. Usein tietomurrot perustuvatkin heikoimman kohdan löytämiseen, ja sitä kautta koko järjestelmään pääsyn (Hahn 2016).

Tietoturvan kannalta kehitys kuitenkin vaatii valitettavia ennakkotapauksia, joita tutkimalta voidaan kehittää tietoturvaa. Lee, Assante ja Conway on analysoinut Ukrainan sähköverkkoon kohdistunutta hyökkäystä, jossa kyberfyysiseen järjestelmään pääsemiseksi

käytettiin useita eri keinoja, kuten esimerkiksi operatiivisten laitteiden tietoturva-aukkoja, sähköposteihin ja tiedostoihin sisällytettyjä haittaohjelmia ja henkilötietojen kalastelua. Lisäksi asiakaspalvelu ruuhkautettiin tahallisesti huijauspuheluilla, jotta ilmoitukset verkon alasajosta ei tulisi sähköverkkoyhtiölle asti ja hyökkäys voisi jatkua huomaamatta (Lee, Assante ja Conway 2016). Samanlaisia keinoja voitaisiin käyttää missä tahansa kyberfyysisessä järjestelmässä, esimerkiksi kappaletavaratuotannossa. Toisaalta hyökkäyksen tavoite voi olla myös arvokkaan tiedon varastamisessa, jolloin hyökkäyksestä ei jää edes välttämättä mitään jälkiä. Ukrainan sähköverkkohyökkäyksestä voidaan myös todeta, että merkittävä tietoturvariski on myös ihminen, joka voi toiminnallaan aiheuttaa suurta haittaa pienillä teoilla, esimerkiksi avaamalla sähköpostilinkkejä varomattomasti.

Tietoturvan muodostaminen on monitasoinen ongelma, joka vaatii jokaiselta kyberfyysisen tason toiminnoilta oman panoksensa. Erityisesti operatiivisten laitteiden määrän noustessa myös tietoturvariskit kasvavat. Tulevaisuudessa myös operatiivisten järjestelmien tulisi keskittyä tietoturvan takaamiseen, jotta järjestelmään ei muodostuisi heikkoja kohtia.

5.1.2 Kannattavuus

Digitaalinen kaksonen teknologiana voi kuulostaa sopivan kaikenlaiseen kappaletavara-tuotantoon, mutta usein taloudellisen kannattavuuden tarkastelun jälkeen tuotannon päivitys kyberfyysiseksi saatetaan todeta liian kalliiksi. Merkittävänä ongelmana digitaalisen kaksosen yleistymiselle on sen kannattavuus. Jos kustannuslaskelmia ei ole tehty perusteellisesti, voidaan huomata, että digitaalinen kaksonen ei olekaan kannattavaa ja tuotettavalle tuotteelle tulee turhaan lisäkustannuksia. Toisaalta digitaalisen kaksosen hyödyt eivät tule esiin pelkkää kappaletavara-tuotantoa tarkastelemalla, vaan esimerkiksi sen hyödyt voivat olla tuotteen elinkaaren muissa vaiheissa, esimerkiksi käytöstä poistettavan laitteen uudelleenhyödyntämisessä. Tällaisessa tapauksessa kannattavuutta on vaikea arvioida.

Tao, M. Zhang ja Nee mukaan valtaosa nykyisistä digitaalisen kaksosen sovelluksista perustuu lopputuotteen suureen arvoon, jolloin myös digitaalisen kaksosen hankinta on nähty kannattavaksi. (Tao, M. Zhang ja Nee 2019). Tämä ilmiö osaltaan myös jarruttaa digitaalisen kaksosen yleistymistä, koska perinteinen kappaletavara-tuotanto näkee digitaalisen kaksosen vain korkeakustannuksisten tuotteiden valmistuksen apukeinona tai tutkimuskäyttöön tarkoitettuna hienona teknologiana. Suurempi läpimurto voitaisiin saavuttaa esimerkeillä suuremmissa yrityksissä, joissa on jo valmiina erilaisia digitaalisen kaksosen tekniikoita. Myös usealla yrityksellä on jo valmiiksi halu tehdä älykästä tuotanteknologiaa, koska sen oheistuotemyyntiarvo on huomattu kannattavuuslaskennoissa. Tällaisista taloudellisista panostuksista esimerkiksi teolliseen internetiin tai pilvipalveluihin ei olisi liian suuri harppaus digitaalisen kaksosen käyttöönottoon ja DT-teknologian yleistymiseen.

5.1.3 Järjestelmien yhdisteltävyys

Nykyajan kappaletavaratuotannossa yksittäisten tuotantolaitteiden tekniikkaan sisältyy jo jonkin tasoista kyberfyysisiä toimintoja. Esimerkiksi hitsauslaitteita valmistava Kemppi toimittaa myös WeldEye-sovellusta, joka kerää reaaliaikaista dataa hitsausprosesseista, ja mahdollistaa myös niiden säädön tietoverkon kautta (WeldEye 2020). Tällöin koko prosessia ohjaava digitaalisen kaksosen sovellus tulisi osata kommunikoida alemman tason hitsaussovelluksen kanssa. Tämä tuo ohjelmistokehitykselle lisätyötä, jotta ohjelmistointegraatio saadaan saumattomaksi. Monimutkaisessa kappaletavaratuotannossa tällaisia laitteita voi olla tuhansittain, joten yhteen liitettäviä ohjelmistoja muodostuu myös merkittävästi. Järjestelmien yhdistäminen tulee erityisesti ongelmalliseksi vanhan tuotantoprosessin uudistamisessa digitaalseksi kaksoseksi, koska vanhojen ohjelmistojen yhteensovittamisesta ei voida olla täysin varmoja.

Hyvänä esimerkkinä valmiudesta digitaaliseen kaksoseen on mittalaitteita valmistava SICK AG, joka tarjoaa antureilleen omaa digitaalisen kaksosen sovellusta. SICK Asset-Hub on sovellus, joka tarjoaa valmiiksi omaa pohjaa digitaalisen kaksosen tarkasteluun, ja siihen voidaan liittää myös muiden valmistajien laitteita (SICK(AG) 2020). Tämä tuo uuden ongelman digitaalisen kaksosen kehitykselle, koska monen yrityksen tuotteen hintaan vaikuttaa merkittävästi oman ohjelmiston myynti fyysisen tuotteen ohella. Yritykset eivät välttämättä halua myydä tuotetta ilman ohjelmistoa, koska se takaa tuloja myös myynnin jälkeen esimerkiksi teknisen tuen, päivitysten tai huollon muodossa.

5.2 Digitaalisen kaksosen tulevaisuus

Y. Lu et al. toteaa artikkelissaan seitsemän tutkimusongelmaa digitaaliselle kaksoselle. Rakenteellinen kuvio, kommunikoinnin viive, datatallennusmekanismit, digitaalisen kaksosen standardit, digitaalisen kaksosen ominaisuudet, versionhallinta ja ihmisen vaikutus digitaalisen kaksosen sovelluskohteisiin (Y. Lu et al. 2019). Tulevaisuudessa kehitystyö tuo osaan ratkaisun, esimerkiksi datantallennusmekanismeihin ja kommunikoinnin viiveisiin. Monet tutkimusongelmat ovat kuitenkin epämääräisempiä, ja niihin ratkaisun tuo esimerkiksi ihmisten päätökset. Erityisesti digitaalinen kaksosen tarvitsisi ylemmän tason standardin, jonka mukaan malli muodostettaisiin.

Digitaalisen kaksosen kehitystä ajaa eteenpäin globaalit ilmiöt, kuten pandemian aiheuttamat sulkutilat, jossa pääsy fyysisille tuotantolaitteille on rajattua. Tällöin on suositeltavaa ylläpitää kyberfyysisistä digitaalista kaksosta, jotta tuotantoa voidaan jatkaa ja kehittää pandemiasta huolimatta. Rassudov ja Korunets on tutkinut artikkelissaan COVID-19 pandemian vaikutusta tuotantoon ja koulutukseen, ja nostaa tutkimuksessaan ratkaisuksi digitaalisen kaksosen, jotta kappaletavaratuotantoa voidaan jatkaa olosuhteista huolimatta. Artikkelissa todetaan neljä kriittistä osaa, joiden tulee toimia myös pelkästään virtuaalisen mallin ohjauksella. Ensimmäisenä on järjestelmän analysointi ja optimointi, toisena on vianetsintä ja korjaustoimenpiteiden arviointi. Kolmantena on järjestelmän käyttöön-

oton optimointi, jolloin paikanpäällä tehtävästä käyttöönotosta saadaan sujuvampaa ja käyttöönottoon kuluva aika vähenisi merkittävästi. Neljäntenä on koulutus, jota tarvitaan laitteen parissa toimiville työntekijöille, laitteiden kehittäjille ja opiskelijoille, joilla ei ole mahdollista päästä tutustumaan laitteeseen fyysisesti (Rassudov ja Korunets 2020).

Digitaalisen kaksosen tavoitteet tulevaisuuden tuotannossa on jo osittain saatu käytäntöön eri mittakaavoissa, mutta suuremman luokan onnistumiset odottavat vielä kaikkien teknologoiden yleistymistä. Tätä varten digitaalinen kaksosen vaatii yleistä muutosta suurissa yrityksissä, jotka ovat vähitellen omaksumassa teollisuus 4.0 esiaskelia, kuten teollista internetiä. Eri teknologioiden käyttöönotto johtaa lopulta siihen, että esimerkiksi digitaalisen kaksosen käyttöönotto on vain ohjelmistosovelluksen muodostamista, koska kaikki tarvittava data ja verkosto on jo valmiina.

6 YHTEENVETO

Neljäs teollisuuden vallankumous luo suuret mahdollisuudet tulevaisuuden suunnittelulle ja tuotannolle. Potentiaalisia kohteita on suuri määrä, ja yksi merkittävä yhdistävä tekijä on digitaalinen kaksonen.

Digitaalinen kaksonen ei kuitenkaan tällä hetkellä toimi välttämättä jokaisella aihealueella. Suunniteltavat laitteet saattavat olla liian suuria tai kappaletavaratuotanto liian monimutkaista, jolloin esimerkiksi tietokoneiden laskennallinen teho tai tiedonsiirto aiheuttavat ongelmia. Toisaalta digitaalista kaksosta ei myöskään ole hyödyllistä käyttöönottaa kaikkialla, koska usein virtuaalisen todellisuuden muodostaminen veisi liikaa resursseja itse suunniteltavaan tuotteeseen nähden. Tulevaisuudessa voisikin olla yksi kehitettävä kohde, jossa luodaan yleismallinen ohjelmistopohja digitaalista kaksosta varten, jolloin yritykset voisivat ostaa esimerkiksi lisenssin tuotetta ja laitteista varten.

Käytön optimoinnin kannalta digitaalinen kaksonen tuo vapauden kokeilla erilaisia asioita aiheuttamatta suuria taloudellisia kustannuksia, toki huomioiden digitaalisen kaksosen hankintakustannukset. Kuten erilaisista sovelluksista nähdään, voidaan digitaalisen kaksosen avulla myös sulkea pois ongelmakohtia ja saada lisää kriittistä tietoa jo ennen kuin esimerkiksi tuotanto käynnistyy tai laite otetaan käyttöön. Digitaalinen kaksonen kuitenkin poistaisi suuria rajoitteita, jolloin myös suunnittelussa ja tuotannossa voitaisiin tavoittaa uusia innovaatioita ja kehittyneempää teknologiaa, myös kappaletavaratuotannon ulkopuolella.

LÄHTEET

- Adelchi, A. ja Scarpa, B. (2012). *Data analysis and data mining an introduction*. Oxford University Press. ISBN: 1-280-59575-2.
- Ao, S.-I., Rieger, B. ja Amouzegar, M. (2010). *Advances in Machine Learning and Data Analysis*. 1st ed. 2010. Lecture Notes in Electrical Engineering, 48. Dordrecht: Springer Netherlands. ISBN: 1-282-83674-9.
- Bilberg, A. ja Malik, A. A. (2019). Digital twin driven human–robot collaborative assembly. eng. *CIRP annals* 68.1, 499–502. ISSN: 0007-8506.
- Bruner, J. (2013). *Industrial internet*. O'Reilly. ISBN: 1-4493-6826-3.
- Bukantaite, S. (2020). Factors of Smart Production Processes Modernization, 1–5.
- Celko, J. (2013). *Joe Celko's Complete Guide to NoSQL What Every SQL Professional Needs to Know about Non-Relational Databases*. Burlington: Elsevier Science. ISBN: 0-12-407192-9.
- Collin, J. ja Saarelainen, J. (2016). *Teollinen internet*. Helsinki: Talentum. ISBN: 978-952-14-2851-7.
- DebRoy, T., Zhang, W., Turner, J. ja Babu, S. (2017). Building digital twins of 3D printing machines. *Scripta Materialia* 135, 119–124. ISSN: 1359-6462. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2016.12.005>.
- Ding, K., Chan, F. T., Zhang, X., Zhou, G. ja Zhang, F. (2019). Defining a Digital Twin-based Cyber-Physical Production System for autonomous manufacturing in smart shop floors. *International journal of production research* 57.20, 6315–6334. ISSN: 1366-588X.
- Eckhart, M. ja Ekelhart, A. (2019). Digital Twins for Cyber-Physical Systems Security: State of the Art and Outlook. *Security and Quality in Cyber-Physical Systems Engineering: With Forewords by Robert M. Lee and Tom Gilb*. Toim. S. Biffel, M. Eckhart, A. Lüder ja E. Weippl. Springer International Publishing, 383–412. ISBN: 978-3-030-25312-7. DOI: 10.1007/978-3-030-25312-7_14. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-25312-7_14.
- Franciosa, P., Sokolov, M., Sinha, S., Sun, T. ja Ceglarek, D. (2020). Deep learning enhanced digital twin for Closed-Loop In-Process quality improvement. *CIRP annals* 69.1, 369–372. ISSN: 0007-8506.
- Gilchrist, A. (2016). *Industry 4.0 The Industrial Internet of Things*. Berkeley, CA: Apress. ISBN: 1-4842-2047-1.
- Hahn, A. (2016). Operational Technology and Information Technology in Industrial Control Systems. *Cyber-security of SCADA and Other Industrial Control Systems*. Advances in Information Security. Springer International Publishing, 51–68. ISBN: 3319321234.

- Hand, D., Mannila, H. ja Smyth, P. (2001). *Principles of data mining*. Adaptive computation and machine learning series. Cambridge, Massachusetts: MIT Press. ISBN: 0-262-30408-2.
- Hersent, O., Boswarthick, D. ja Elloumi, O. (2011). *The Internet of Things: Key Applications and Protocols*. 2. Aufl. Somerset: Wiley. ISBN: 1119994357.
- Holler, J., Tsiatsis, V., Karnourkos, S., Boyle, D. ja Mulligan, C. (2018). *Internet of Things: Technologies and Applications for a New Age of Intelligence*. 2. painos. Academic Press. ISBN: 9780128144350.
- ISA-95.00.01-2005 (2005). *Enterprise - Control System Integration, Part 1: Models and Terminology, ISA Standard, 2005*.
- ISO10303-242:2020 (2020). *Product data representation and exchange*.
- Kanounng, O. (2018). *Energy Harvesting for Wireless Sensor Networks : Technology, Components and System Design*.
- Knapp, G., Mukherjee, T., Zuback, J., Wei, H., Palmer, T., De, A. ja DebRoy, T. (2017). Building blocks for a digital twin of additive manufacturing. *Acta Materialia* 135.C, 390–399. ISSN: 1359-6454.
- Konrad, B., Lieber, D. ja Deuse, J. (2013). Striving for Zero Defect Production: Intelligent Manufacturing Control Through Data Mining in Continuous Rolling Mill Processes. *Robust Manufacturing Control*. Toim. K. Windt. Springer Berlin Heidelberg, 215–229. ISBN: 978-3-642-30749-2.
- Lee, R. M., Assante, M. J. ja Conway, T. (2016). Analysis of the cyber attack on the ukrainian power grid, techreport, SANS Institute. URL: https://ics.sans.org/media/E-ISAC_SANS_Ukraine_DUC_5.pdf.
- Li, J., Lennartson, B., Tang, Y., Biller, S. ja Matta, A. (2017). *Sustainable Production Automation*. Momentum Press. ISBN: 9781606509067.
- Liu, J., Liu, J., Zhou, H., Zhou, H., Tian, G., Tian, G., Liu, X., Liu, X., Jing, X. ja Jing, X. (2019). Digital twin-based process reuse and evaluation approach for smart process planning. *International journal of advanced manufacturing technology* 100.5, 1619–1634. ISSN: 0268-3768.
- Lu, T., Gupta, A., Jayal, A. D., Badurdeen, F., Feng, S. C., Jr, O. W. D. ja Jawahir, I. S. (2011). A Framework of Product and Process Metrics for Sustainable Manufacturing. *Advances in Sustainable Manufacturing*. Springer Berlin Heidelberg, 333–338. ISBN: 3642201822.
- Lu, Y., Liu, C., Wang, K., Huang, H. ja Xu, X. (heinäkuu 2019). Digital twin-driven smart manufacturing: Connotation, reference model, applications and research issues.
- Luo, W., Hu, T., Zhang, C. ja Wei, Y. (2018). Digital twin for CNC machine tool: modeling and using strategy. *Journal of ambient intelligence and humanized computing* 10.3, 1129–1140. ISSN: 1868-5145.
- Macaulay, T. ja Singer, B. (2012). *Cybersecurity for industrial control systems SCADA, DCS, PLC, HMI, and SIS*. Boca Raton: CRC Press. ISBN: 0-429-16380-0.
- MarketsAndMarkets (2019). Digital Twin Market by Technology, Type (Product, Process, and System), Industry (Aerospace, Defense, Automotive, Transportation, Home, Com-

- mercial, Healthcare, Energy, Utilities, Oil, Gas), and Geography - Global Forecast to 2025. URL: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/digital-twin-market-225269522.html> (viitattu 02.07.2020).
- Merklein, M., Franke, J. ja Hagenah, H. (2013). *WGP congress 2013 : progress in production engineering : selected, peer reviewed papers from the 2013 WGP Congress, July 22-23, 2013, Erlangen, Germany*. Durnten-Zurich, Switzerland: WGP Congress (2013 : Erlangen, Germany).
- Meyer, H., Fuchs, F. ja Thiel, K. (2005). *Manufacturing execution systems optimal design, planning, and deployment*. McGraw-Hill. ISBN: 1-282-09205-7.
- Nortio, J. ja Lappi, J. (2019). Automaatioväylä : Suomen säätöteknillisen seuran jäsenlehti 1/2019. 1, 11. ISSN: 0784-6428.
- Pawar, P. ja Rao, V. (2013). Parameter optimization of machining processes using teaching-learning-based optimization algorithm. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 67.5, 995–1006. ISSN: 0268-3768.
- Presswire, M. (2014). Process Instrumentation, Automation Market (SCADA, PLC, DCS, MES) Forecasts to 2020. (Viitattu 02.12.2020).
- Rao, R. V. (2009). *Advanced modeling and optimization of manufacturing processes : international research and development*. London.
- Rassudov, L. ja Korunets, A. (2020). 2020 XI International Conference on Electrical Power Drive Systems (ICEPDS): COVID-19 Pandemic Challenges for Engineering Education, 1–3. DOI: 10.1109/ICEPDS47235.2020.9249285.
- Roy, R. B., Mishra, D., Pal, S. K., Chakravarty, T., Panda, S., Chandra, M. G., Pal, A., Mishra, P., Chakravarty, D. ja Misra, S. (2020). Digital twin: current scenario and a case study on a manufacturing process. *International journal of advanced manufacturing technology* 107.9-10, 3691–3714. ISSN: 0268-3768.
- Schlosser, R., Klocke, F. ja Lung, D. (2011). Sustainability in Manufacturing – Energy Consumption of Cutting Processes. *Advances in Sustainable Manufacturing*. Springer Berlin Heidelberg, 85–89. ISBN: 3642201822.
- SICK(AG) (2020). Digital Services for Integration SICK AssetHub. URL: <https://www.sick.com/us/en/sick-integrationspace/digital-services-for-integration/sick-assethub/c/g547656> (viitattu 02.12.2020).
- Söderberg, R., Wärmefjord, K., Carlson, J. S. ja Lindkvist, L. (2017). Toward a Digital Twin for real-time geometry assurance in individualized production. *CIRP annals* 66.1, 137–140. ISSN: 0007-8506.
- STEP Tools Inc. (2017). Digital Twin Machining. URL: http://www.steptools.com/blog/20171011_twin_machining/ (viitattu 01.07.2020).
- Tao, F., Zhang, M. ja Nee, A. (2019). *Digital Twin Driven Smart Manufacturing*. Academic Press. ISBN: 9780128176306.
- Tao, F., Cheng, J., Qi, Q., Zhang, M., Zhang, H. ja Sui, F. (2017). Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data. *International journal of advanced manufacturing technology* 94.9-12, 3563–3576. ISSN: 1433-3015.

- Tao, F., Zhang, M., Cheng, J. ja Qi, Q. (tammikuu 2017). Digital twin workshop: a new paradigm for future workshop. *Computer Integrated Manufacturing Systems* 23, 1–9. DOI: 10.13196/j.cims.2007.01.001.
- The Institute for Security and Development Policy (2018). Made in China 2025. URL: <https://isdpc.eu/publication/made-china-2025/> (viitattu 01.07.2020).
- Tuegel, E., Ingraffea, A., Eason, T. ja Spottswood, S. (lokakuu 2011). Reengineering Aircraft Structural Life Prediction Using a Digital Twin. *International Journal of Aerospace Engineering* 2011. DOI: 10.1155/2011/154798.
- Uhlemann, T., Lehmann, C. ja Steinhilper, R. (2017). The Digital Twin: Realizing the Cyber-Physical Production System for Industry 4.0. *Procedia CIRP* 61, 335–340. DOI: 10.1016/j.procir.2016.11.152.
- Wang, J., Ye, L., Gao, R., Li, C. ja Zhang, L. (2019). Digital Twin for rotating machinery fault diagnosis in smart manufacturing. *International Journal of Production Research* 57.12, 3920–3934. DOI: 10.1080/00207543.2018.1552032.
- WeldEye (2020). WELDEYE - INSIGHT CREATES VALUE. URL: <https://www.weldeye.com/en-US/what-is-weldeye/introduction/weldeye/> (viitattu 02.12.2020).
- Xu, L. D., Xu, E. ja Li, L. (2018). Industry 4.0: state of the art and future trends. *International Journal of Production Research* 56.8, 2941–2962. ISSN: 0020-7543.
- Yangfan, S., Hongyao, S. ja Jianzhong, F. (2017). Generating efficient toolpath by cutter posture optimization in five-axis machining based on inverse feedback mechanism. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 92.5, 1551–1566. ISSN: 0268-3768.
- Zhang, H., Liu, Q., Chen, X., Zhang, D. ja Leng, J. (2017). A Digital Twin-Based Approach for Designing and Multi-Objective Optimization of Hollow Glass Production Line. *IEEE Access* 5, 26901–26911. ISSN: 2169-3536.
- Zheng, Y., Yang, S. ja Cheng, H. (2019). An application framework of digital twin and its case study. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing* 10.3, 1141–1153. ISSN: 1868-5137.