Tampereen yliopisto



Saku Pöysäri

DIGITAALISET KAKSOSET VALMISTAVASSA TEOLLISUUDESSA

Optimaalista lisäarvoa teknologiasta -hanke

Syksy 2024

PIRKANMAA
COUNCIL OF TAMPERE REGION

ETELÄ-POHJANMAAN LIITTO
Regional Council of South Ostrobothnia

Euroopan unionin
osarahoittama

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO 1
2. DIGITAALISEN KAKSOSEN MÄÄRITTELY 2
3. DIGITAALISEN KAKSOSEN TOIMINTA, KEHITYS JA TEKNOLOGIAT 6
    3.1 Digitaalisen kaksosen kehitys 7
        3.1.1 Mallintaminen 8
        3.1.2 Integrointi 11
        3.1.3 Datanhallinta 11
        3.1.4 Palvelut 13
    3.2 Mahdollistavat teknologiat 17
4. DIGITAALISEN KAKSOSEN SOVELLUKSET 20
    4.1 Suunnittelussa 22
    4.2 Tuotannossa 24
    4.3 Käytössä 30
5. DIGITAALISEN KAKSOSEN MAHDOLLISUUDET 33
6. DIGITAALISEN KAKSOSEN TULEVAISUUDEN KEHITYSKOHTEET 36
7. YHTEENVETO 41
LÄHTEET 42

1. JOHDANTO

Digitaalisten teknologioiden kehittyessä ja digitaalisen siirtymän ollessa vauhdissaan digitaalisten kaksosten käsite nousee esille eri asiayhteyksissä. Digitaalinen kaksonen on yksinkertaisimmillaan todellisen järjestelmän ja tästä mallinnetun virtuaalisen vastineen muodostama kokonaisuus, joka mahdollistaa todellisen järjestelmän reaaliaikaisen seurannan, analysoinnin, optimoinnin ja ohjauksen virtuaalisella vastineella. Tästä avautuu uusia mahdollisuuksia tuotteiden ja tuotannon tehokkuuden ja käytettävyyden parantamiseen. Digitaaliset kaksoset mullistavat tapamme ymmärtää ja hallita järjestelmiä ja prosesseja.

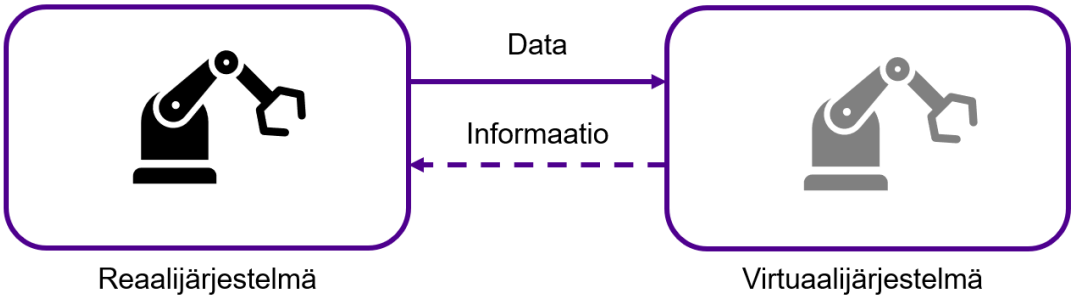
Digitaaliset kaksoset perustuvat reaaliaikaiseen kaksisuuntaiseen tiedonsiirtoon todellisen järjestelmän ja tästä mallinnetun virtuaalisen järjestelmän välillä. Tämä mahdollistaa simuloinnit ja optimoinnit reaaliajassa, mikä erottaa digitaaliset kaksoset perinteisistä simuloinneista. Digitaalisten kaksosten rakentaminen on monivaiheinen prosessi, joka sisältää muun muassa todellisen järjestelmän virtuaalisen vastineen mallintamisen ja tämän integroimisen reaalijärjestelmään. Digitaalisten kaksosten toteuttaminen ei ole mahdollista ilman erilaisia teknologioita ja työkaluja, laitteita ja ohjelmistoja aina datan keräämisestä järjestelmän ohjaamiseen. Digitaaliset kaksoset hyödyntävätkin älykkäitä antureita tiedon keräämiseen, tekoälyä kerätyn datan analysoimiseen, simulointiohjelmistoja optimointitestien suorittamiseen sekä erilaisia sovelluksia tiedon visualisoimiseksi.

Valmistavassa teollisuudessa digitaalisia kaksosia käytetään tuotteen kaikissa elinkaaren aikaisissa vaiheissa suunnittelusta käytöstä poistamiseen sekä myös tuotannossa. Digitaaliset kaksoset mahdollistavatkin asiakastiedon hyödyntämisen tuotteiden suunnittelussa, älykkään tuotannon reitityksen sekä tuotantoprosessien parametrien optimoimisen. Digitaalisten kaksosten avulla voidaan parhaimmillaan lisätä ymmärrystä suunniteltavista ja ohjattavista järjestelmistä sekä tehdä toiminnasta kustannustehokkaampaa. Varjopuolena on kuitenkin digitaalisten kaksosten rakentamisen ja integroimisen haasteet, joiden kehittämiseen panostetaan jatkuvasti yhä enemmän.

Tässä kirjallisuusselvityksessä tarkastellaan digitaalisten kaksosten erilaisia määritelmiä, toimintaperiaatteita, kehittämistä, käytettäviä teknologioita, sovelluskohteita, yleisiä etuja sekä tulevaisuuden kehitystarpeita. Tavoitteena on tarjota kattava katsaus digitaalisten kaksosten maailmaan ja niiden potentiaaliin valmistavassa teollisuudessa.

2. DIGITAALISEN KAKSOSEN MÄÄRITTELY

Digitaalisen kaksosen määrittely on osoittautunut haastavaksi. Digitaalinen kaksonen -termiä käytetään erilaisissa yhteyksissä ja määrittelyt vaihtelevat tapauskohtaisesti: milloin digitaalisilla kaksosilla tarkoitetaan ainoastaan digitaalisia malleja ja simulaatioita ja milloin puolestaan digitaalisten mallien reaaliaikaista synkronoitua tiedonsiirtoa digitaalisen mallin ja reaalimaailman vastineen välillä. Yksinkertaistettuna digitaaliset kaksoset rakentuvat reaalijärjestelmästä, tämän virtuaalisesta vastineesta sekä näitä yhdistävistä teknologioista datan ja tiedon välittämiseksi toistensa välillä (Grieves 2014). Tätä havainnollistetaan kuvassa 1.



Kuva 1. *Digitaalisen kaksosen konsepti (mukaillen lähdettä Grieves 2014).*

Valmistavassa teollisuudessa digitaalisia kaksosia hyödynnetään laajalti erilaisten tuotteiden ja suunnittelupalveluiden markkinoimisessa, mutta hyvin vaihtelevalla menestyksellä. Osassa yrityksistä digitaalisten kaksosten perusteet ja käyttökohteet on sisäistetty oikeaoppisesti ja näitä hyödynnetään onnistuneesti omissa tuotteissa ja palveluissa sekä näiden markkinoimisessa. Toisaalta on yrityksiä, joilla ei ole selkeää käsitystä digitaalisten kaksosten perusajatuksesta, jolloin termiä on käytetty kilpailukyvyn ylläpitämiseksi kuvaamaan yksinkertaisia digitaalisia tuotteita ja ratkaisuja, jotka eivät ole itsessään digitaalisia kaksosia. Tyypillisesti yrityksillä on kokoelma digitaalisia ja reaalimaailman järjestelmiä, joita ei ole kytketty toisiinsa.

Digitaalisten kaksosten määrittely ei ole haastavaa ainoastaan kaupallisella sektorilla, vaan myös tutkimuksessa, jossa esitetään lukuisia erilaisia määritelmiä. Yksinkertaisimmillaan digitaalinen kaksonen määritellään tuotteen tai järjestelmän moniulotteiseksi digitaaliseksi kopioksi (Brenner & Hummel 2018; Pires et al. 2019). Yksityiskohtaisemmassa määritelmässä digitaalinen kaksonen määritellään virtuaaliseksi esitykseksi fyysisestä järjestelmästä tai prosessista, mikä mahdollistaa fyysisen järjestelmän reaaliai-

kaisen seurannan, analyysin ja optimoinnin (Soori et al. 2023). Huomattavasti yksityiskohtaisempi määritelmä esitettiin NASA:n ja Yhdysvaltojen ilmavoimien toimesta 2010-luvun alkupuolella, jolloin tutkimus digitaalisten kaksosten ympärillä lisääntyi. Määritelmässä digitaalinen kaksonen on *integroitu monifysikaalinen, monitasoinen ja todennäköisyyspohjainen simulaatio rakennetusta olemassa olevasta järjestelmästä, joka käyttää parhaita saatavilla olevia fysiikan malleja, anturitietoja, järjestelmän historiatietoja jne., heijastaakseen vastaavan reaalijärjestelmän elinkaaren virtuaaliseen järjestelmään* (Glaessgen & Stargel 2012). Huomataan, että digitaalinen kaksonen ei ole pelkästään digitaalinen malli tai simulaatio olemassa olevasta järjestelmästä, vaan sen toteuttamiseen tarvitaan lukuisia erilaisia teknologioita. Nykyisin valmistavassa teollisuudessa käytetään laajalti Tao et al. (2018) määritelmää:

> *”Digitaalinen kaksonen on integroitu monifysikaalinen, monitasoinen ja todennäköisyyspohjainen simulaatio monimutkaisesta tuotteesta tai järjestelmästä, joka käyttää parhaita saatavilla olevia fysiikan malleja, joita syötetään reaaliaikaisella fyysisellä anturidatalla heijastaakseen vastaavan kaksosensa elinkaarta.”*

Usein tavanomaisten 3D-mallien ja simulointien ajatellaan olevan digitaalisia kaksosia. Tuotteiden ja järjestelmien mallinnus ja simuloinnit ovat oleellinen osa digitaalisia kaksosia, mutta digitaaliset kaksoset ovat enemmän. Perinteisillä tuotannon kolmiulotteisilla simuloinneilla pyritään kuvantamaan suunniteltavan tai olemassa olevan järjestelmän käyttäytymistä, mutta tätä ei ole millään tavalla yhdistetty reaalimaailman järjestelmään. Digitaalisten kaksosten virtuaaliset vastineet ovat yhteydessä ja vuorovaikutuksessa todellisen maailman vastineisiinsa. Digitaaliset kaksoset ovatkin ympäristöjä, jotka joko toimivat simulointeina itsessään tai ainakin tukevat erilaisia simulointitehtäviä (Cimino et al. 2019). Onaji et al. (2022) määrittelivät kolme digitaalisten kaksosten ominaisuutta, jotka erottavat sen simuloinneista:

1. Reaaliaikainen tiedonsiirto
2. Vuorovaikutus ja konvergenssi
3. Itsenäinen kehittyminen

Reaaliaikaisessa tiedonsiirrossa digitaalinen kaksonen on synkronoitu reaalijärjestelmän kanssa ja heijastaa sen tilaa reaaliajassa tarkasti. Digitaalisten kaksosten kontekstissa konvergenssi tarkoittaa todellisen ja virtuaalisen maailman tietojen ja toimintojen yhdistymistä. Se mahdollistaa reaaliaikaisen tiedonsiirron ja vuorovaikutuksen fyysisen kohteen ja sen digitaalisen mallin välillä, jolloin ne voivat täydentää toisiaan ja toimia yhtenä kokonaisuutena. Vuorovaikutus ja konvergenssi jaetaan edelleen kolmeen osa-alueeseen:

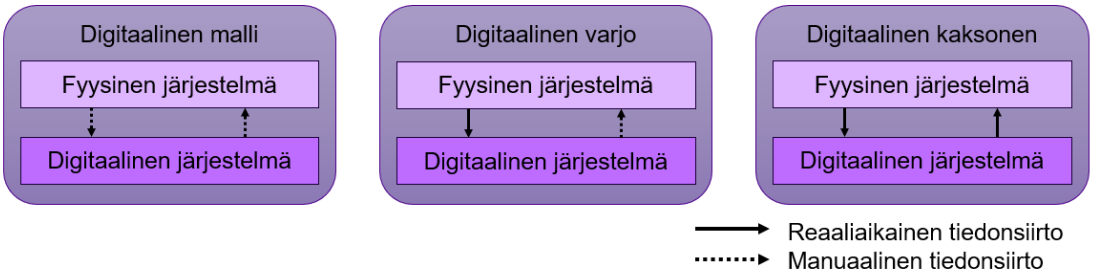
a) **Fyysisen järjestelmän vuorovaikutuksessa** kaikki reaalijärjestelmän vaiheet, laitteet ja palvelut on yhdistetty, ja fyysisessä tilassa tuotettu data on saatavilla ja yhdistettävissä.

b) **Historiallinen ja reaaliaikainen data** yhdistyvät digitaalisissa kaksosissa mahdollistaen sekä tiedon analyysin että ajantasaisen operatiivisen tiedon käytön.

c) **Fyysisen ja virtuaalisen järjestelmän vuorovaikutus** tarjoaa saumattoman kaksisuuntaisen yhteyden fyysisen ja virtuaalisen järjestelmän välillä.

Itsekehittymisessä digitaalinen kaksonen päivittää tietonsa automaattisesti reaaliajassa ja vertaa jatkuvasti fyysisen ja virtuaalisen järjestelmän eroja, mikä mahdollistaa virtuaalimallien jatkuvan parantamisen ja kehittämisen ja tätä kautta paremman fyysisen järjestelmän optimoimisen. (Onaji et al. 2022)

Keskeinen kysymys digitaalisten kaksosten määrittelyssä on, mahdollistavatko ne reaaliaikaisen kaksisuuntaisen ohjauksen reaalimaailman ja virtuaalimaailman välillä. Edellä esitellyn perusteella reaaliaikainen tiedonsiirto on digitaalisten kaksosten elinehto, mutta Kitzinger et al. (2018) esittivät kolmitasoisen digitaalisten kaksosten jaottelun digitaalisiin malleihin, digitaalisiin varjoihin ja digitaalisiin kaksosiin. Jaottelu on esitetty kuvassa 2.



Kuva 2. *Digitaalisten kaksosten jaottelu (mukaillen Kitzinger et al. 2018).*

Digitaalinen malli (engl. Digital Model) on digitaalinen esitys olemassa olevasta tai suunniteltavasta fyysisestä kohteesta, mutta siinä ei ole automatisoitua tiedonsiirtoa fyysisen ja digitaalisen kohteen välillä. Tällaiset digitaaliset esitykset voivat olla esimerkiksi tehtaiden simulointimalleja tai muita fyysisiä kohteita kuvaavia malleja, jotka eivät hyödynnä automaattista tai reaaliaikaista tietojen integrointia reaalimaailmaan. Vaikka digitaaliset mallit voivat hyödyntää fyysisten järjestelmien dataa mallien kehittämisessä, kaikki tiedonvaihto tapahtuu manuaalisesti. (Kitzinger et al. 2018) Digitaalinen malli on siis enemmän tai vähemmän staattinen esitys nykyisestä tai tulevasta fyysisestä kohteestaan ja on olemassa erillään fyysisestä kohteesta, vaikka perustuukin siihen. Fyysisen kohteen tilan muutokset eivät siis suoraan vaikuta digitaaliseen kohteeseen, eikä digitaalisen mallin muutoksilla ole vaikutusta fyysiseen kohteeseen.

Digitaalisesta mallista kehittyneempi versio on digitaalinen varjo (engl. Digital Shadow). Digitaalisessa varjossa fyysisen tuotteen, laitteen tai järjestelmän ja sen digitaalisen vastineen välillä on automatisoitu tiedonsiirto, mutta se toimii vain yhteen suuntaan: reaalijärjestelmästä digitaaliseen järjestelmään. Tämä tarkoittaa, että fyysisen järjestelmän tilan muutos päivittää digitaalisen järjestelmän tilaa, mutta digitaalisen järjestelmän muutokset eivät vaikuta fyysiseen järjestelmään automaattisesti. (Kitzinger et al. 2018)

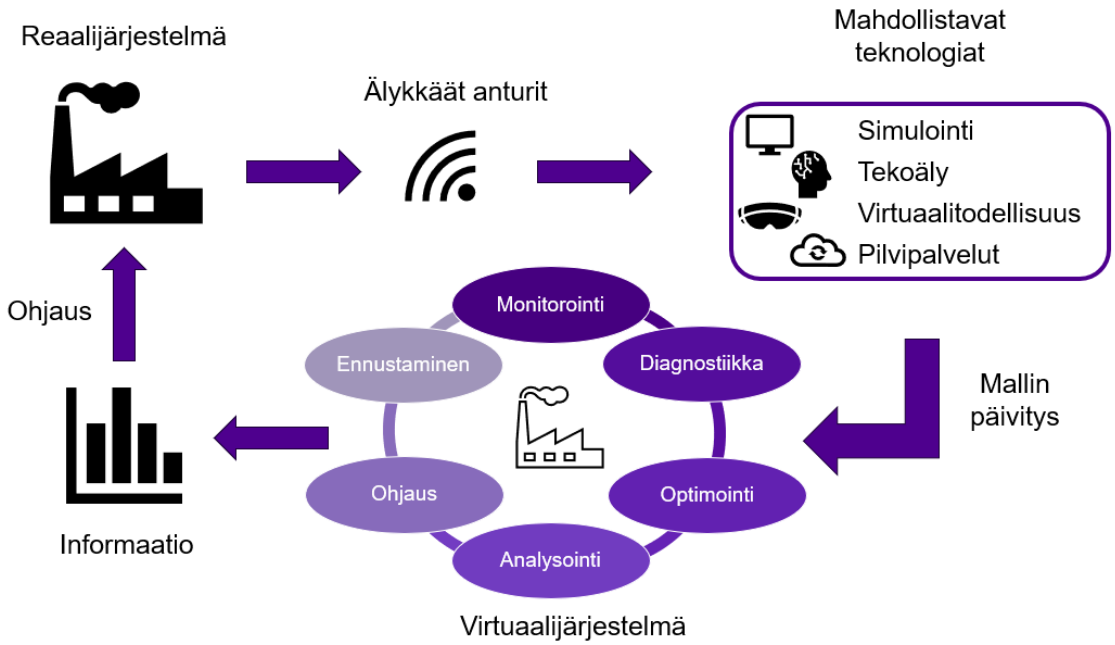
Digitaalinen varjo ei aina muodosta jatkuvaa tilannekuvaa reaalijärjestelmästä, vaan päivityksiä voidaan tehdä tietyin ehdoin, esimerkiksi ennalta määritettyinä aikoina, tiettyjen aikavälien mukaan tai tapahtumapohjaisesti, kun jokin arvo ylittää tai alittaa kynnysarvon. Näissä tapauksissa tilannekuva voi olla joko jatkuvaa seurantaa fyysisestä järjestelmästä tai kertaluontoinen tilannekuva kyseiseltä hetkeltä. Tilannekuvia voidaan myös muodostaa takautuvasti käyttämällä arkistoitua dataa, esimerkiksi laite- tai järjestelmävikojen juurisyiden selvittämiseksi. (Brecher et al. 2021)

Digitaaliset kaksoset (engl. Digital Twin) ovat kyseessä silloin, kun fyysisen kohteen ja tämän digitaalisen vastineen välinen reaaliaikainen tiedonsiirto on täysin integroitu ja automatisoitu molempiin suuntiin. Tämä tarkoittaa, että fyysisen kohteen tilan muutos päivittää suoraan digitaalisen vastineen tilaa ja toisinpäin, jolloin digitaalinen vastine voi vaikuttaa fyysisen järjestelmän toimintaan. (Kritzinger et al. 2018) Näin ollen digitaalinen kaksonen pystyy ohjaamaan reaalijärjestelmää tarvittaessa (Autiosalo et al. 2020). Tässä selvityksessä digitaalisella kaksosella tarkoitetaan Kitzingerin et al. (2018) kuvaamia todellisia digitaalisia kaksosia, joissa reaalijärjestelmän ja digitaalisen järjestelmän välillä on reaaliaikainen ja automatisoitu kaksisuuntainen tiedonsiirto. Mikäli kyse on digitaalisesta varjosta tai digitaalisesta mallista, se mainitaan erikseen.

Digitaalisten kaksosten moninaiset määritelmät johtuvat useista eri syistä. Koska digitaaliset kaksoset ovat yhä kehitysvaiheessa, yhtenäisiä käytäntöjä niiden rakentamiseen ja hyödyntämiseen ei ole vielä vakiintunut. Vaikka määritelmät ovat alkaneet yhtenäistyä sekä tutkimuksessa että teollisuudessa, eri toimialat ja sovellukset tuovat niihin omat erityispiirteensä. Eräs selkeä yksimielisyys määritelmän osalta on se, että digitaalisella kaksosella on aina yhteys fyysiseen, reaalimaailman tuotteeseen, koneeseen tai järjestelmään, jonka toimintaa se peilaa ja pyrkii kehittämään ja optimoimaan eri teknologioiden avulla. Fyysinen kohde on digitaalisen kaksosen ytimessä, mikä erottaa sen perinteisestä simuloinnista. Toisaalta digitaalinen kaksonen voidaan myös nähdä filosofiana, jonka keskiössä on reaalimaailman kohteen kehittäminen, ja tätä voidaan toteuttaa monenlaisilla teknologioilla (Autiosalo et al. 2020).

3. DIGITAALISEN KAKSOSEN TOIMINTA, KEHITYS JA TEKNOLOGIAT

Digitaalisten kaksosten toiminta perustuu fyysisestä maailmasta reaaliaikaisesti kerätyn datan hyödyntämiseen. Tietoja kerätään erilaisilla antureilla ja ohjelmistoilla reaalijärjestelmästä. Kerätty data siirretään digitaaliseen vastineeseen, jossa digitaalinen malli käyttää saamaansa dataa suorittaakseen laskelmia ja simulointeja, jotka päivitetään automatisoidusti lähes reaaliajassa. Näiden laskelmien avulla ennustetaan fyysisen järjestelmän tilaa tulevaisuudessa tai tehdään päätöksiä sen toiminnan ohjaamiseksi ja optimoinniksi. (Atalay et al. 2021) Aidoissa digitaalisissa kaksosissa ohjaus ja päivitykset tapahtuvat reaaliajassa, kun taas yksinkertaisemmissa digitaalisissa varjoissa ja malleissa päivitykset tehdään manuaalisesti, jolloin reaaliaikaisuus puuttuu (Onaji et al. 2022). Digitaalisten kaksosten toimintaperiaatteen määrittely vaihtelee eri lähteiden välillä. Kuvassa 3 on esitetty Soori et al. (2023) näkemys digitaalisen kaksosen toimintaperiaatteesta, jossa korostetaan edellä olevaan toimintaperiaatteeseen verrattuna digitaalisen kaksosen mahdollistavien teknologioiden merkitystä, joiden avulla digitaaliset kaksoset pystyvät esimerkiksi seuraamaan reaalijärjestelmän tilaa tai optimoimaan sen toimintaa. Kuvassa nuolet osoittavat tiedonkulkusuunnan.



Kuva 3. *Digitaalisten kaksosten toimintaperiaate (mukaillen lähdettä Soori et al. 2023).*

3.1 Digitaalisen kaksosen kehitys

Digitaalisten kaksosten kehittämiseen ja rakentamiseen ei ole standardoitua yleisesti hyväksyttyä ja laajasti käytössä olevaa menetelmää, vaan toteutustavat vaihtelevat tapauskohtaisesti esimerkiksi digitaalisissa kaksosissa käytettävien ohjelmistojen tai reaalijärjestelmän ominaisuuksien mukaisesti. Myös eri yrityksissä on omat prosessinsa digitaalisten kaksosten, varjojen ja mallien kehittämiseen. Tätä selvitystä varten tehdyn synteesin perusteella digitaalisten kaksosten kehittäminen voidaan jakaa karkealla tasolla neljään vaiheeseen, joita käsitellään syvällisemmin omissa alaluvuissaan 3.1.1–3.1.4:

1. Mallintaminen
2. Integrointi
3. Datanhallinta
4. Palvelut

Toimivan digitaalisen kaksosen kehittäminen edellyttää fyysisen tuotteen, laitteen, järjestelmän tai prosessin virtuaalisen mallin luomista, joka integroidaan reaalijärjestelmään. Digitaaliset kaksoset käsittelevät reaaliaikaisesti huomattavan määrän monimuotoista dataa, josta on löydettävä ja suodatettava digitaaliselle kaksoselle oleellinen data. Tämän vuoksi datanhallinnan määrittely on oleellinen osa digitaalisten kaksosten rakentamista. Palveluiden kehittämisellä tarkoitetaan digitaalisten kaksosten mahdollistamien monitoroinnin, ennustamisen, diagnosoimisen, simuloimisen, optimoimisen ja ohjaamisen kehittämistä. Jokaiselle kehittämisen osa-alueella käytetään erilaisia työkaluja, joita on havainnollistettu kuvassa 4.



Kuva 4. *Digitaalisten kaksosten rakentamiseen käytettävät työkalut (mukaillen lähdettä Qi et al. 2021).*

Digitaalisten kaksosten kehittämisen haasteena on fyysisen maailman monimutkaisuus. Siihen sisältyy monenlaisia ominaisuuksia ja yhteyksiä (sekä näkyviä että piileviä) eri kohteiden välillä, joiden vuoksi virtuaalisen vastineen luominen ja integroiminen reaalijärjestelmään on erittäin vaativaa. Digitaalisten kaksosten kehittäminen ja parantaminen onkin pitkä prosessi, sillä fyysisten kohteiden virtuaaliset vastineet eivät aluksi ole täydellisiä, vaan niiden on kehityttävä ajan myötä, jotta ne vastaisivat yhä tarkemmin fyysisiä kohteitaan. (Tao & Zhang 2017) Tämä edellyttää perusteellista fyysisen maailman ymmärtämistä ja havainnointia.

3.1.1 Mallintaminen

Digitaalisen kaksosen kehittäminen aloitetaan joko täysin uuden järjestelmän suunnittelemisesta ja ominaisuuksien määrittämisestä tai olemassa olevan järjestelmän mittaamisesta ja tarkastelusta. Molemmissa tapauksissa on oleellista ymmärtää fyysisen maailman lainalaisuudet ja eri järjestelmän osien ominaisuudet ja yhteydet toisiinsa, joista osa voi olla näkyvillä ja osa näkymättömissä (Tao & Zhang 2017). Yksinkertaisimmillaan uuden järjestelmän osalta määritetään ja olemassa olevan järjestelmän osalta mitataan fyysisen järjestelmän koko, muodot ja rakenteet huomioiden yksittäisten järjestelmän osien ja komponenttien toleranssit, pinnan karheudet, tiheydet ja kovuudet. Nykyiset mittausteknologiat sisältävät laser- ja kuvantunnistusmittaukset sekä mikro- ja nanotasoiset tarkkuusmittaukset. (Qi et al. 2021)

Reaalijärjestelmän fyysisten komponenttien mittaamisten ohella tarvitaan mittauksia järjestelmän prosesseista (Qi et al. 2021). Tällaisia prosessiparametreja ovat esimerkiksi työstössä esiintyvät vääntömomentit ja värähtelyt, robotisoidussa järjestelmässä robotin liikenopeudet ja kiihtyvyydet, prosessiteollisuuden prosesseissa virtaavien materiaalien lämpötilat ja virtausnopeudet sekä tuotantojärjestelmätasolla tuotantovolyymit, resurssien käyttöasteet ja läpimenoajat. Mittauksia voidaankin suorittaa eri tasoilla: yksittäisistä prosesseista, koneisiin, tuotantosoluihin ja kokonaisiin tuotantojärjestelmiin. Reaalijärjestelmän mittaukset eivät pääsääntöisesti ole kertaluontoisia (pois lukien esimerkiksi asennetun järjestelmän fyysiset dimensiot), vaan kehittyneet digitaaliset kaksoset keräävät jatkuvasti reaaliaikaisia anturi- ja järjestelmätietoja (Angrish et al. 2017).

Malleja hyödynnetään reaalijärjestelmän esittämiseen virtuaalisessa maailmassa sekä haluttujen optimointien tekemiseen ja simuloimiseen. Mallinnuksen haasteena on määrittää, kuinka tarkasti reaalijärjestelmä mallinnetaan (Thelen et al. 2022). Jos käytetään liian yksinkertaista virtuaalista mallia, riskinä on reaalijärjestelmien monimutkaisten prosessien puutteellinen kuvaus. Vastaavasti liian yksityiskohtainen virtuaalinen malli lisää

mallinnuksen ja laskentatehon tarvetta. (Liu et al. 2021; Onaji et al. 2022) Yhtenä ratkaisuna on toteuttaa mallinnus joustavasti modulaarisella tavalla, jossa yksinkertaistettuun pääsimulointimalliin lisätään monimutkaisempia käyttäytymismalleja moduulien mukana standardoitujen rajapintojen kautta (Singh et al. 2018). Toisena vaihtoehtona on arvioida, mitkä järjestelmän komponentit ovat kriittisiä järjestelmän toiminnalle ja määrittää tätä kautta riittävä mallinuksen taso. Näin voidaan rakentaa digitaalisen kaksosen tarkka malli eri mallinnustasojen mukaisesti. (Aivaliotis et al. 2019) Mallinnuksessa voidaan hyödyntää myös datapohjaista mallinnusta, jossa voidaan hyödyntää tekoälyä mallien luomisessa (Thelen et al. 2022). Mallien rakentaminen vaatii mallinnusosaamisen lisäksi usein teollisuuden alakohtaista asiantuntijaosaamista, jotta mallinnettavat prosessit pystytään mallintamaan oikein.

Mallintaminen voidaan jakaa kuuteen vaiheeseen (Tao et al. 2022), mallin

1. Rakentamiseen
2. Kokoamiseen
3. Yhdistämiseen
4. Validoimiseen
5. Muokkaamiseen ja
6. Hallitsemiseen.

Mallin rakentamisessa luodaan digitaalinen kaksonen, joka kuvaa kohteen eri ulottuvuuksia – geometriaa, fysikaalisia ominaisuuksia, käyttäytymistä sekä sääntöperusteisuutta. Geometrinen malli kuvaa kohteen muodon ja rakenteen ja näiden mallintamiseen käytetään muun muassa erilaisia 3D-mallinnusohjelmistoja (esim. Solidworks ja NX) ja pistepilviteknologioita (laserskannaus). Fysikaalinen malli kuvaa materiaaliominaisuudet ja fysikaaliset rajoitteet. Mallintamiseen käytetään esimerkiksi elementtimenetelmiin perustuvia ohjelmistoja, kuten AnSys. Monifysikaaliset mallit mahdollistavat useiden fysikaalisten ilmiöiden, kuten lämmön, sähkön ja mekaniikan, yhdistämisen yhteen malliin, mikä tehostaa mallinnuksen tarkkuutta monimutkaisissa sovelluksissa. Käyttäytymismalli käsittelee kohteen dynaamista käyttäytymistä ja tämän rakentamiseen käytettävät ohjelmistot, kuten Unity3D ja Simulink, mahdollistavat dynaamisten mallien luomisen ja kohteen reaaliaikaisen toiminnan simuloimisen virtuaalisessa ympäristössä. Sääntömalli käyttää sääntöpohjaisia malleja ja kaavoja, jotka ennustavat tai arvioivat kohteen toimintaa pitkällä aikavälillä. Sääntömallinnuksessa hyödynnetään koneoppimisen ja syväoppimisen menetelmiä sekä logiikkapohjaisia mallinnustyökaluja, kuten TensorFlow ja Protegé. Sääntömallinnus yhdistää historiallista dataa ja asiantuntijatietoa, minkä ansiosta

se tukee erityisesti ennakoivan huollon ja päätöksenteon tarpeita. (Qi et al. 2021; Liu et al. 2021; Tao et al. 2022; Thelen et al. 2022)

Mallin kokoaminen yhdistää yksittäiset digitaalisen kaksosen osamallit suuremmaksi malliksi. Mallin kokoaminen tapahtuu usein hierarkkisesti, jolloin mallin eri osat, kuten yksikkö-, laite- ja järjestelmäjärjestelmätasot, yhdistetään suuremmaksi kokonaisuudeksi. Kokoamisessa on tärkeää varmistaa mallien yhteensopivuus. Kokoamisprosessissa huomioidaan osamallien geometriset ja topologiset suhteet, ja mallien tulee toimia yhtenäisesti myös reaaliaikaisessa ympäristössä. Mallien yhdistäminen liittää yhteen malleja eri ulottuvuuksissa (kuten fysikaalisen mallin ja käyttäytymismallin) tai eri tieteenalojen malleja (esim. mekaaniset, sähköiset ja hydrauliset järjestelmät). Yhdistämisen tavoitteena on luoda realistinen ja kokonaisvaltainen digitaalinen malli, joka kuvastaa kohteen kaikkia olennaisia ominaisuuksia. Tätä varten käytetään muun muassa semanttista mallinnusta ja verkostopohjaisia tekniikoita, kuten Petri-verkkoja (engl. Petri Net). (Qi et al. 2021; Tao et al. 2022)

Mallin validointi varmistaa, että digitaalinen malli vastaa todellisuutta. Tämä vaihe sisältää mallin tulosten vertailun todellisiin mittauksiin ja poikkeamien analysoinnin. Validointiprosessissa arvioidaan mallin rakenne, parametrit ja vuorovaikutussuhteet ympäröiviin järjestelmiin, ja tavoitteena on parantaa mallin luotettavuutta esimerkiksi historiatietoja hyödyntäen. Tämä vaihe on iteratiivinen, ja se toistuu, kunnes malli vastaa riittävän tarkasti todellista järjestelmää. Jos validoinnissa havaitaan suuria poikkeamia, mallia on muokattava. Muokkausprosessissa tunnistetaan tarvittavat parametrit ja menetelmät, joiden avulla mallin tarkkuutta voidaan parantaa. Mallin muokkaus saattaa sisältää esimerkiksi mallin parametrien säätämistä ja numeerisia laskelmia. Tässä vaiheessa käytetään optimointimenetelmiä, jotka iteratiivisesti parantavat mallin tarkkuutta todellisiin arvoihin nähden. (Qi et al. 2021; Tao et al. 2022)

Kun malli on valmis, sitä täytyy ylläpitää. Mallin hallinta tarkoittaa mallien ja niiden tuottaman datan järjestelmällistä ylläpitoa, tallentamista ja päivittämistä. Mallin hallinnassa otetaan huomioon eri käyttäjät ja käyttötarkoitukset, ja siinä varmistetaan, että mallit ovat käyttökelpoisia ja helposti muokattavissa tulevia tarpeita varten. Hallintaan liittyy myös teknologioiden ja työkalujen valinta sekä yhteensopivuuden varmistaminen eri järjestelmissä. Mallin hallinta on tärkeä, sillä sen avulla varmistetaan digitaalisen kaksosen jatkuva päivitettävyys ja pitkäaikainen hyödyntäminen. (Tao et al. 2022)

3.1.2 Integrointi

Digitaalisten kaksosten virtuaaliset vastineet ovat jatkuvassa vuorovaikutuksessa reaalimaailman todellisiin vastineisiinsa, mikä mahdollistaa digitaalisten kaksosten toiminnan. Tämä yhteys edellyttää todellisten vastineiden ja virtuaalisten vastineiden välisen tiedon ja datan vaihtoa. Tämän toteuttamiseen käytetään erilaisia järjestelmäarkkitehtuureja. Yksinkertaisimmillaan kyse on virtuaalisen ja todellisen vastineen yhdistämisestä (Grieves & Vickers 2016). Tällöin fyysinen järjestelmä on varustettu antureilla, jotka välittävät dataa virtuaaliselle järjestelmälle reaaliaikaisesti. Virtuaalinen järjestelmä hyödyntää saatua dataa reaalijärjestelmästä ja tämän perusteella pystyy esimerkiksi optimoimaan ja ohjaamaan reaalijärjestelmän toimintaa. (Liu et al. 2022) Kehittyneemmissä kuvauksissa järjestelmätasoja voi olla viisi, jolloin virtuaalisen ja todellisen vastineen ja näiden yhdistämisen lisäksi on omat osat datanhallinnalle ja digitaalisten kaksosten palvelutoiminnalle eli käytännössä monitoroinnille, ennustamiselle, diagnosoimiselle, simuloinnille, optimoimiselle ja ohjaukselle (Tao et al. 2018). Viiden tason järjestelmät mahdollistavat sekä reaalisen että virtuaalisesti generoidun datan yhdistämisen sekä analyyttisten ja älykkäiden toimintojen lisäämisen digitaaliseen kaksoseen (Onaji et al. 2022). Kehittyneimmissä jaotteluissa määritelläänkin omat rajapinnat (Qi et al. 2021):

- fyysisten kohteiden ja virtuaalimallien välille
- fyysisten kohteiden ja datanhallinnan välille
- fyysisten kohteiden ja palveluiden (esim. simulointi, monitorointi) välille
- virtuaalimallien ja datanhallinnan välille
- virtuaalimallien ja palveluiden välille sekä
- palveluiden ja datanhallinnan välille.

Virtuaalisten ja todellisten järjestelmien integroimiseen käytetään samoja laitteita ja teknologioita, joita käytetään myös datanhallinnassa. Näitä käsitellään tarkemmin seuraavassa luvussa 3.1.3. Lisäksi luvun 3.1.5 kuvassa 6 esitellään erilaisia digitaalisten kaksosten mahdollistavia teknologioita, joissa on mainittu integroimisessa käytettäviä teknologioita.

3.1.3 Datanhallinta

Digitaaliset kaksoset edellyttävät tehokasta datanhallintaan (Liu et al. 2021), jotta digitaalinen kaksonen pystyisi reagoimaan ja sopeutumaan muuttuviin ympäristö- ja toimin-

taehtoihin. Oleellisena osana datanhallintaa on datan kerääminen, tallentaminen ja käsittely reaaliaikaisesti (Liang et al. 2022). Dataa kerätään jatkuvasti huomattavia määriä, erilaisissa muodoissa ja nopealla tahdilla, jolloin on kiinnitettävä erityistä huomiota tiedonsiirron teknologioihin ja datan esikäsittelyyn (Liu et al. 2021). Tiedonsiirrossa on huomioitava tiedonsiirron kaksisuuntaisuus: fyysiseltä järjestelmältä digitaaliselle järjestelmälle ja takaisin sekä myös tiedonsiirto fyysisen järjestelmän että digitaalisen järjestelmän sisällä. Digitaalisen kaksosen datan käsittelyprosessin vaiheet koostuvat datan keräämisestä, siirtämisestä, tallentamisesta, käsittelystä, yhdistelystä ja visualisoinnista (Qi et al. 2021).

1. **Datan kerääminen**: Dataa kerätään eri lähteistä, kuten fyysisitä laitteistoista erilaisilla antureilla ja kamerajärjestelmillä, ohjelmistorajapintojen (engl. Application Programming Interfaces, API) ja tietokantarajapintojen kautta sekä verkkolähteistä esimerkiksi hakuroboteilla ja -koneilla. IoT-teknologiat (engl. Internet of Things), kuten QR-koodit ja radiotaajuustunnistuslaitteet (engl. RFID, Radio-Frequency Identification), mahdollistavat reaaliaikaisen tiedon tunnistamisen ja keräämisen. Kerätty data sisältää sekä staattisia että dynaamisia ominaisuustietoja, jotka kuvaavat järjestelmän eri tiloja ja ominaisuuksia. (Qi et al. 2021)
2. **Datan siirtäminen**: Kerätty data siirretään langallisin (esim. kierretty parikaapeli, koaksiaalikaapeli, valokuitu) ja langattomin yhteyksin (esim. Wi-Fi, Bluetooth, NFC (engl. Nier-Field Communication), satelliittiyhteydet, 4G/5G). Langattomissa yhteyksissä käytetään sekä lyhyen kantaman että pitkän kantaman teknologioita. Tietojen siirrossa käytetään erilaisia tiedonsiirtoprotokollia (esim. HTTP, MTTQ ja OPC UA), joilla varmistetaan turvallinen ja luotettava tiedonsiirto. (Qi et al. 2021)
3. **Datan tallennus**: Siirrettyä dataa tallennetaan enenevissä määrin suuria tietomääriä kestäviin ja skaalautuviin tietokantoihin, koska perinteiset tietokannat eivät tue monimuotoisen datan hallintaa ja suurten datamäärien tallentamista. Perinteisten tietokantojen sijaan käytetään hajautettuja tiedontallennusmenetelmiä sekä pilvitallennusratkaisu, jotka soveltuvat paremmin suuren ja monilähteisen datan hallintaan. Esimerkiksi DFS-teknologiat (engl. Distributed File Storage) mahdollistavat datan jakamisen useammalla käyttäjälle samanaikaisesti verkon kautta ja NewSQL-teknologia (engl. Structured Query Language, SQL) tarjoaa perinteisten tietokantojen ACID-ominaisuudet (engl. Atomicity, Consistency, Isolation, Durability), skaalautuvuuden ja korkean suorituskyvyn suurten datamäärien käsittelyyn. (Qi et al. 2021)

4. **Datan käsittely**: Datan käsittelyvaiheessa raakadataa esikäsitellään ja analysoidaan. Esikäsittelyssä poistetaan tarpeettomia tai virheellisiä tietoja, ja dataa muokataan ja tiivistetään analyysia varten. Varsinaiseen analysointiin käytetään sekä tilastollisia menetelmiä (esim. kuvailevat tilastot, hypoteesitestaukset, korrelaatio- ja regressioanalyysit ja klusterointi) että neuroverkkomenetelmiä (esim. itsejärjestäytyvät neuroverkot), jotka auttavat havaitsemaan datasta trendejä ja malleja. Lisäksi syväoppimisen menetelmät tarjoavat mahdollisuuden analysoida suuria ja monimutkaisia datamääriä. (Qi et al. 2021)
5. **Datan yhdistely**: Yhdistelyvaiheessa monilähteistä dataa integroidaan esimerkiksi raakadata-, piirre- ja päätöstasolla. Yhdistelymenetelmiin kuuluvat satunnaismenetelmät, kuten klassinen päättely, painotetun keskiarvon menetelmä, Kalman-suodatus, Bayesian estimointi ja Dempster-Shaferin todisteluteoria, sekä sumea joukkoteoria (engl. Fuzzy Set Theory) ja tekoälymenetelmät, kuten neuroverkkoihin pohjautuvat menetelmät. Näiden menetelmien avulla voidaan käsitellä, yhdistää ja analysoida tietoa monista eri lähteistä tehokkaasti. (Qi et al. 2021)
6. **Datan visualisointi**: Analyysin tulokset esitetään visualisoinnin avulla käyttäen erilaisia graafisia keinoja, kuten histogrammeja, viiva- ja piirakkakaavioita, jotka puolestaan voidaan esittää erilaisten kojetaulujen (engl. dashboard) kautta käyttäjille. Visualisoinnilla pyritään tekemään analyysin tulokset helposti ymmärrettäviksi ja intuitiivisiksi, jotta käyttäjät voivat hahmottaa datasta ilmenevät trendit, säännönmukaisuudet ja muutokset. (Qi et al. 2021)

3.1.4 Palvelut

Digitaalisten kaksosten mahdollistama reaaliaikainen monitorointi, ennusteiden laatiminen, järjestelmän tilan diagnosoiminen, simulointien toteuttaminen sekä järjestelmien optimoiminen ja ohjaaminen parantavat poikkeavuuksien havaitsemista, suorituskyvyn arviointia, päätöksentekoa, operatiivista tehokkuutta sekä tulevien kehityssuuntien ennustamista (Qi & Tao 2018). Qi et al. 2021 käyttävät näistä yhteistä nimitystä digitaalisten kaksosten mahdollistamat palvelut, joita käytetään todellisen järjestelmän toiminnan kehittämisessä. Kun näiden kanssa hyödynnetään kehittyneitä simulointi- ja optimointiteknologioita, tekoälyä ja pilviteknologioita muodostuu älykäsohjauskerros, joka edelleen edes auttaa kehittämään järjestelmän operatiivista tehokkuutta (Soori et al. 2023).

Monitoroinnissa seurataan fyysisen järjestelmän tilaa, esimerkiksi erilaisten IoT-laitteiden, antureiden, QR-koodien ja konenäön avulla, joka sitten heijastetaan virtuaaliseen

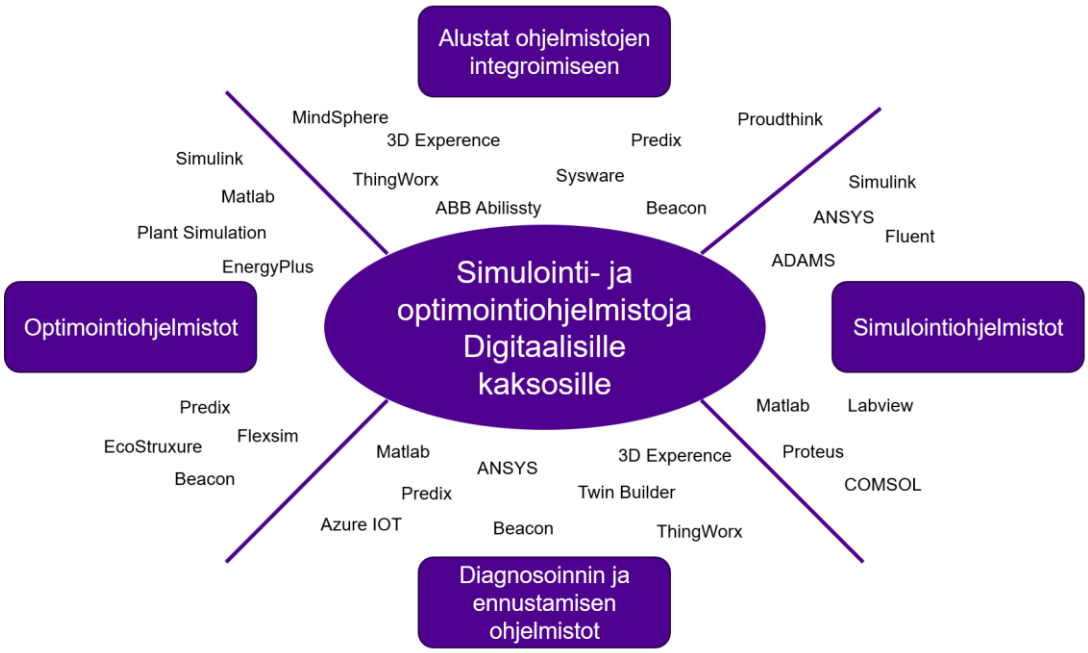
vastineeseen reaaliaikaisesti. Virtuaalinen malli pysyy jatkuvasti synkronoituna fyysisen kohteen kanssa, mikä puolestaan mahdollistaa järjestelmän tilan analysoimisen reaaliaikaisesti. (Qi et al. 2021) Esimerkiksi teollisessa tuotannossa voidaan monitoroida koneiden tilaa, lämpötiloja, paineita ja muita kriittisiä parametreja ja saada näin ajankohtaista tietoa laitteiden kunnosta ja tuotannon tilasta. Oleellisessa osassa on esittää data helposti ymmärrettävissä olevassa muodossa, jolloin voidaan hyödyntää esimerkiksi Power BI -ohjelmiston kaltaisia ohjelmia tai 3D-simulointimalleja.

Ennustamisessa analysoidaan kerättyä tietoa ja tehdään arvioita siitä, mitä tapahtuu tulevaisuudessa (Qi et al. 2021). Tämä voi sisältää esimerkiksi tuotantokoneen vikojen ennustamisen, tuotteen jäljellä olevan käyttöiän arvioimisen tai tuotannon läpäisyaikojen kehittymisen. Ennustusalgoritmit voivat käyttää historiallista ja reaaliaikaista dataa yhdessä ennustamaan mahdollisia ongelmia ennen niiden ilmenemistä, mikä mahdollistaa vikojen ennaltaehkäisyn ja huollon optimoinnin. Ennustamisessa voidaan hyödyntää esimerkiksi tekoälyyn pohjautuvia ennustyökaluja, kuten koneoppimista ja neuroverkkoja. Lisäksi Big Data -analytiikasta on hyötyä, kun käsitellään ja analysoidaan suuria tietomääriä, jotka voivat sisältää historiallisia ja reaaliaikaisia tietoja ennustemallien pohjana. (Qi et al. 2021) Erilaisilla simulointiohjelmistoilla voidaan puolestaan testata ennusteita ja niiden vaikutuksia järjestelmien käyttäytymiseen.

Simuloinnilla voidaan testata erilaisia skenaarioita virtuaalisesti ennen kuin niitä toteutetaan fyysisessä ympäristössä (Qi et al. 2021). Tämä mahdollistaa prosessien ja järjestelmien testaamisen turvallisesti ja kustannustehokkaasti ilman, että tarvitsisi keskeyttää tuotantoa tai altistaa laitteita turhille riskeille. Simulointi voi käsittää esimerkiksi tuotantolinjan muutosten vaikutusten tarkastelua. Valmistavassa teollisuudessa hyödynnetään erityisesti 3D-simulointiohjelmistoja virtuaalisten mallien luomisen ja testaamisen, kuten Visual Componentsia tai Siemensin Tecnomatix ohjelmistoja. Jos on tarpeen korostaa simuloinnin 3D-visualisointia, silloin voidaan hyödyntää virtuaalitodellisuuden ja lisätyn todellisuuden ohjelmistoja. Simuloinneissa voidaan käyttää myös muita simulointiohjelmistoja, jotka eivät perustu 3D-visualisointiin ja joilla voidaan simuloida erityisesti monimutkaisia järjestelmiä ja prosesseja. Tällaisia ohjelmistoja ovat esimerkiksi Simulink ja SIMIT.

Lukuisista simulointimenetelmistä diskreettipohjainen eli tapahtumapohjainen simulointi (engl. Discrete Event Simulation, DES) on osoittautunut toimivimmaksi menetelmäksi digitaalisten kaksosten toteuttamiseksi erityisesti tuotantojärjestelmien osalta (Leng et al. 2021a). DES pohjaiset digitaaliset kaksoset mahdollistavat syvällisten oivallusten tekemisen järjestelmistä niin mikro-, meso- kuin makrotasoilla (Reinhardt et al. 2019). Muita kirjallisuudessa esiin tulleita digitaalisten kaksosten simulointimenetelmiä ovat

muun muassa agenttipohjainen simulointi (dos Santos et al. 2022), fysiikkapohjainen simulointi (Leng et al. 2021a), reaaliaikainen simulointi (Gao et al. 2019) ja simulointipohjainen optimointi (Frantzen et al. 2022). Kuvassa 5 esitellään useampia digitaalisissa kaksosissa hyödynnettäviä simulointi- ja optimointiohjelmistoja sekä alustoja näiden yhdistämiseksi muihin digitaalisiin kaksosiin ja näihin mahdollistaviin teknologioihin.



Kuva 5. *Esimerkkejä digitaalisilla kaksosilla käytettävistä simulointi- ja optimointiohjelmistoista ja alustoista näiden integroimiseksi (mukaillen lähdettä Qi et al. 2021).*

Optimoinnilla pyritään parantamaan reaalijärjestelmän suorituskykyä, tai esimerkiksi vähentämään käyttökustannuksia, erityisesti järjestelmän suoritusparametreja muuttamalla (Qi et al. 2021). Käyttämällä digitaalisen kaksosen dataa, kuten anturitietoja prosessiparametreista, optimointipalvelutyökalut suorittavat satoja tai tuhansia "Entä jos" -simulaatioita (engl. What if?) arvioidakseen valmiutta tai tarvetta muutoksiin nykyisiin järjestelmän asetuksiin. Tämän avulla järjestelmän toimintaa voidaan optimoida riskien vähentämiseksi, kustannusten ja energiankulutuksen alentamiseksi sekä tehokkuuden parantamiseksi. Käytännössä optimointi voi tarkoittaa esimerkiksi tuotannonaikataulutuksen optimoimista. Optimoimisessa voidaan hyödyntää tekoälyä, optimointialgoritmeja ja päätöksenteonmalleja sekä erilaisia simulointeja, kuten Monte Carlo -simulaatioita (Qi et al. 2021). Esimerkiksi Delfoi Planner -ohjelmiston optimointityökalulla voidaan pyrkiä etsimään optimaalista tuotantoaikataulua. Kirjallisuudessa esiin nousseita digitaalisten kaksosten optimointimenetelmiä ovat muun muassa geneettiset algoritmit (Frantzén et al., 2022), Particle Swarm -optimointi (Zhang al. 2021), monitavoiteoptimointi (engl. Multi-objective Optimization) (Zhang et al. 2017; Magnanini et al. 2021) sekä tekoälyyn

ja koneoppimiseen perustuvat optimointimenetelmät (Fuller et al. 2020; Leng et al. 2021). Taulukkoon 1 on koostettuna erilaisin simulointi- ja optimointimenetelmin toteutettuja digitaalisia kaksosia ja niiden sovelluksia tutkimuksessa:

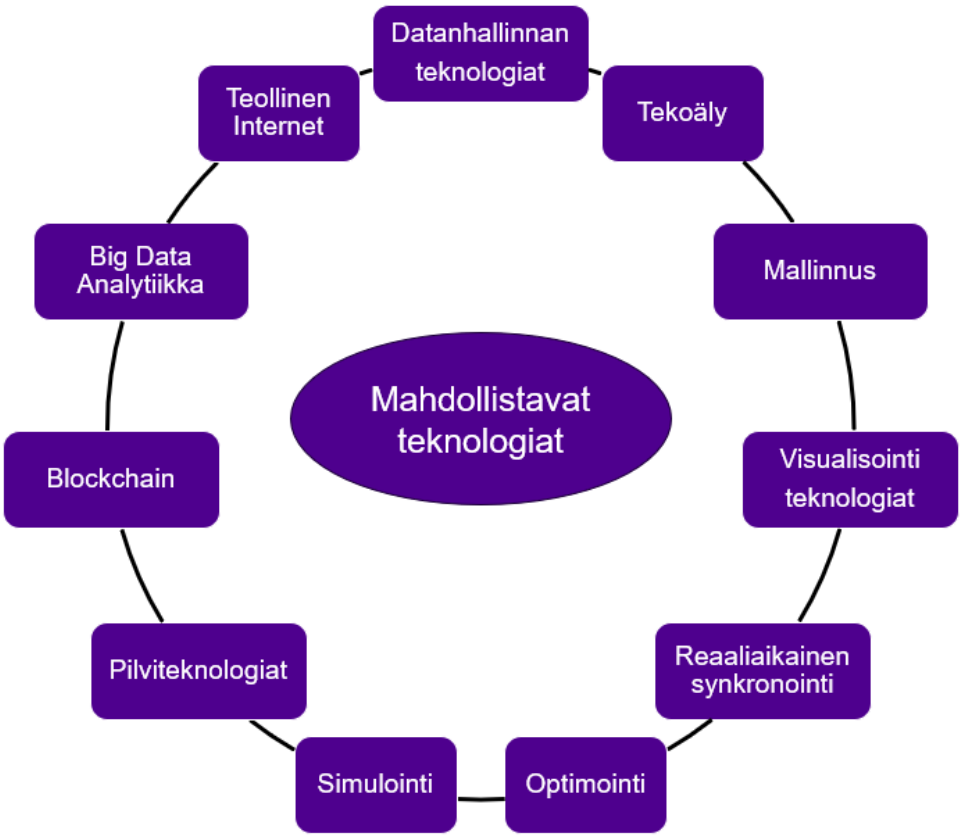
Taulukko 1. *Simulointi- ja optimointimenetelmien sovelluksia.*

Tekijä	Tutkimuksenaihe ja käytetty menetelmä
Glatt et al. 2021	Modeling and implementation of a digital twin of material flows based on physics simulation
Zhang et al. 2022	Improved multi-fidelity simulation-based optimization: application in a digital twin shop floor
Latsou et al. 2023	Digital twin-enabled automated anomaly detection and bottleneck identification in complex manufacturing systems using a multi-agent approach
Wang et al. 2024	Multi-agent cooperative swarm learning for dynamic layout optimization of reconfigurable robotic assembly cells based on digital twin
Chen et al. 2023	Digital twin oriented multi-objective flexible job shop scheduling model and its hybrid particle swarm optimization
Balderas et al. 2021	Empowering Digital Twin for Industry 4.0 using metaheuristic optimization algorithms: case study PCB drilling optimization
Chen et al. 2022	A Metaheuristic Optimization Algorithm for energy efficiency in Digital Twins
Liu et al. 2022	Genetic Algorithm-Based Trajectory Optimization for Digital Twin Robots
Hürkamp et al. 2020	Combining simulation and machine learning as digital twin for the manufacturing of overmolded thermoplastic composites
Pérez et al. 2020	Digital twin and virtual reality based methodology for multi-robot manufacturing cell commissioning
Franciosa et al. 2020	Deep learning enhanced digital twin for Closed-Loop In-Process quality improvement
Xia et al. 2021	Intelligent fault diagnosis of machinery using digital twin-assisted deep transfer learning
Hu et al. 2020	Petri-net-based dynamic scheduling of flexible manufacturing system via deep reinforcement learning with graph convolutional network
Liu et al. 2022	A digital twin-based sim-to-real transfer for deep reinforcement learning-enabled industrial robot grasping
Matulis et al. 2021	A robot arm digital twin utilizing reinforcement learning
Overbeck et al. 2021	Reinforcement Learning Based Production Control of Semi-automated Manufacturing Systems

Edellä esitetyillä digitaalisen kaksosen palvelutyökaluilla muodostetut kehitystoimet voidaan muokata ohjausparametreiksi, joilla voidaan ohjata lähes reaaliaikaisesti todellista järjestelmää (Qi & Tao 2018). Reaaliaikaisesti fyysisestä järjestelmästä kerätyn datan, tämän analysoimisen pohjalta tehtyjen simulointien ja optimointien kautta saatu optimaalinen ohjausparametri siirretään ohjaamaan reaalijärjestelmää. Reaaliaikainen ohjaus mahdollistaa dynaamisen reagoinnin ja automaattisen säädön tarpeen mukaan (Qi et al. 2021). Esimerkiksi jos tuotantolinjalle on muodostunut pullonkaula, digitaalisella kaksosella voidaan automatisoidusti uudelleen reitittää tuotantoa.

3.2 Mahdollistavat teknologiat

Digitaalisten kaksosten mahdollistavia teknologioita on useampia, joista osaa käsiteltiin jo edellisissä luvussa joko kattavammin, kuten moniulotteista mallinnusta, datanhallintaa ja simulointia, tai ohimennen, kuten IoT teknologioita ja tekoälyä. Kuvassa 6 esitellään kirjallisuudesta esiin nousseita teknologioita ja työkaluja, joista oleellisimpiin paneudutaan seuraavaksi.



Kuva 6. *Digitaaliset kaksoset mahdollistavat teknologiat ja työkalut.*

Tekoäly: Perinteiset tapaus- ja sääntöpohjaiset päättelyjärjestelmät, eivät ole tehokkaimpia tapoja oppia datasta (Leng et al. 2021a). Tehokkaampi tapa oppia datasta on löytää piilossa olevaa tietoa ja malleja suurista tapausaineistoista, esimerkiksi suurten tietoaineistojen analytiikan ja syväoppimisen avulla (Fuller et al. 2020). Syväoppiminen, kuten vahvistusoppiminen, on yksi lupaavimmista tekoälytekniikoista digitaalisten kaksosten oppimisen edistämisessä (Leng et al. 2021b). Oppimiskykyinen digitaalinen kaksonen tekee suunnittelusta älykkäämpää (Leng et al. 2021a), koska historiatieto esimerkiksi suunnittelutapauksista ja operatiivisista toiminnoista mahdollistavat data-analytiikan käytön lisäarvon luomiseen. Tällä hetkellä digitaalisen kaksosen mallit rajoittuvat pääosin suunnittelupäätösten ymmärtämiseen ja yksinkertaiseen päättelyyn (Leng et al. 2021a). Esimerkiksi valmistusprosessien satunnaiset vaihtelut tekevät kuitenkin digitaalisten kaksosten suunnittelusta haastavaa. Tulevaisuudessa kehittyneempien teollisen tekoälyn algoritmien integrointi digitaalisiin kaksosiin voisi mahdollistaa uusien suunnitteluratkaisujen automaattisen luomisen ja kehittämisen (Leng et al. 2021a). Tämä mahdollistaa suunnittelun yhtäläisyyksien löytämisen, hyödyntämisen ja tarkkojen ennusteiden tekemisen prosessin dynamiikasta jokaisen suunnittelupäätöksen ja parametrin osalta.

Virtuaalitodellisuus: Laajennetun todellisuuden (engl. Extended Reality, XR) teknologioiden, kuten virtuaalitodellisuus (engl. Virtual Reality, VR), lisätty todellisuus (engl. Augmented Reality, AR) ja tehostettu todellisuus (engl. Mixed Reality, MR), integroiminen digitaalisiin kaksosiin tehostaa digitaalisten kaksosten mahdollistamia hyötyjä. (Leng et al. 2021a) Digitaalisiin kaksosiin yhdistettynä XR-teknologiat tehostavat tuotantojärjestelmien suunnittelua tarjoamalla työkaluja erilaisten tuotantoprosessien ja ohjausjärjestelmien optimoimiseen (Fera et al. 2020) erityisesti ihmisen ja robotin yhteistyön suunnittelussa (Perez et al. 2020). Laajennetun todellisuuden immersiivisten teknologioiden käyttäminen luo turvallisen ympäristön, jossa voidaan testata ja validoida järjestelmiä (Leng et al. 2021a) sekä järjestää käyttö- ja turvakoulutuksia operaattoreille.

Big Data -analytiikka ja pilvipalvelut: Digitaaliset kaksoset käsittelevät suuria määriä dataa, mikä edellyttää Big Data -analytiikkaa ja pilvilaskentaa. Big data -analytiikka auttaa hallitsemaan, jäsentämään ja osin analysoimaan massadataa ja tätä kautta auttaa digitaalista kaksosta ymmärtämään suurten tietomäärien kautta havaittavia trendejä ja riippuvuuksia (Yabooq et al. 2020), jolloin se voi parantaa fyysisen järjestelmän toimintaa ennakoiden esimerkiksi tuotantojärjestelmien kuormitushuippuja. Pilvipalveluteknologioiden kautta digitaalisten kaksosten edellyttämää suurta laskentatehoa voidaan hajauttaa, joustavasti laajentaa sekä dynaamisesti allokoida eri resursseille (Cohen et al. 2019). Pilvilaskenta tarjoaa digitaalisille kaksosille paitsi skaalautuvan laskentatehon,

jonka avulla järjestelmä voi käsitellä tietoa reaaliaikaisesti, mutta myös tiedon varastoinnin sen myöhempää analysointia varten (Yabooq et al. 2020). Pilvi- ja verkkopalvelut yleisesti tukevat analysointi-, suunnittelu- ja simulointityötä hajautettujen digitaalisten kaksosten ympäristössä. Verkkopalveluiden integroiminen pilvipalveluihin mahdollistaa suunnittelemisen etänä ja hajautetusti. (Leng et al. 2021a)

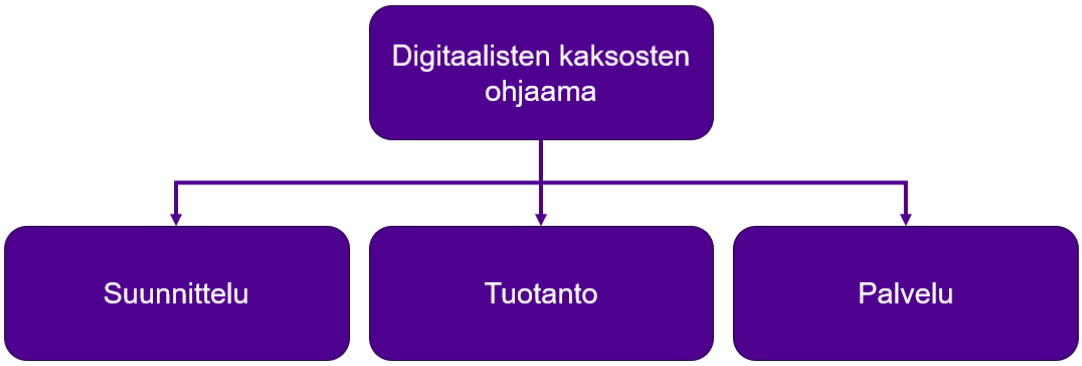
Blockchain ja tietoturva: Nykyaikainen monialainen tuote- ja tuotannonsuunnittelu vaatii suunnittelutiedon ja asiantuntemuksen yhdistämistä, mikä puolestaan edellyttää luotettavia, saavutettavia ja reaaliaikaisia suunnitteluympäristöjä, jotka mahdollistavat suunnittelijoiden yhteistyön yhden yhtenäisen mallin ympärillä analyysin, suunnittelun ja simuloinnin suorittamiseksi. Yhtenä toteutusvaihtoehtona ovat Blockchain teknologioihin pohjautuvat digitaaliset kaksoset, jotka tarjoavat tietoturvallisen ympäristön edellä kuvailtujen suunnitteluympäristöjen toteuttamiselle. (Leng et al. 2021a) Lohkoketjut käyttävät salaustekniikkaa ja hajautettuja protokollia varmistaakseen verkkoliikenteen ja sisäänkirjautumisen turvallisuuden, ja näin parantavat osallistujien välistä kyberturvallisuutta (Leng et al. 2021b). Nykyiset digitaalisen kaksosen järjestelmät eivät kuitenkaan vielä pääsääntöisesti hyödynnä blockchain teknologiaa, koska nämä ovat pääasiassa keskitettyjä ja kärsivät heikosta datan auditoitavuudesta ja jäljitettävyydestä (Leng et al. 2021a). Lisäksi järjestelmien skaalautuvuus ja joustavuus ovat asettaneet haasteita blockhain teknologian käyttöönottamisessa digitaalisissa kaksosissa (Leng et al. 2021).

4. DIGITAALISEN KAKSOSEN SOVELLUKSET

Digitaalisten kaksosten sovelluskohteiden määrittelyssä korostuu elinkaariajattelu, jota voidaan käsitellä useammalla eri tavalla. Barricelli et al. (2019) määrittelevät digitaalisten kaksosten elinkaaren kahdella toisistaan poikkeavalla tavalla. Ensimmäisessä skenaariossa digitaalinen kaksonen luodaan jo fyysisen tuotteen, laitteen tai järjestelmän suunnitteluvaiheessa, ja sen valmistuttua digitaalinen ja fyysinen järjestelmä pysyvät jatkuvassa vuorovaikutuksessa koko järjestelmän elinkaaren ajan. Toisessa skenaariossa digitaalinen kaksonen rakennetaan jo olemassa olevalle fyysiselle järjestelmälle, jonka jälkeen nämä kaksi ovat vuorovaikutuksessa järjestelmän loppuelinkaaren ajan. (Barricelli et al. 2019) Ensimmäisessä skenaariossa on huomioin arvoista digitaalisen kaksosen laajempi hyödyntäminen järjestelmän suunnittelusta lähtien, jolloin digitaalinen kaksonen sisältää tiedon järjestelmän suunnittelusta sen valmistukseen ja käyttöön asti. Toisessa skenaariossa digitaalisella kaksosella ei ole tietoa järjestelmän suunnittelusta ja valmistuksesta, koska se rakennetaan olemassa olevalle järjestelmälle. Molemmissa skenaarioissa elinkaaren eri vaiheet rikastavat digitaalista kaksosta datalla, jota käytetään elinkaaren optimointiin ja seurantaan.

Grieves & Vickers (2016) puolestaan jaottelevat digitaaliset kaksoset kolmitasoisesti, jossa korostuu digitaalisen kaksosen olomuoto tuotteen tai järjestelmän elinkaaren eri vaiheet huomioiden. Digitaalisen kaksosen prototyyppi (engl. Digital Twin Prototype) luodaan ennen fyysisen tuotteen valmistamista, jotta tuotteen suunnittelu, testaus ja validointi voidaan tehdä virtuaalisesti ja mahdolliset virheet korjata kustannustehokkaasti ennen valmistusta. Kun siirrytään fyysiseen tuotantoon, digitaalinen kaksonen muuttuu digitaalisen kaksosen ilmentymäksi (engl. Digital Twin Instance), joka edustaa yksittäisiä valmistettuja tuotteita ja niiden osia ja sisältää tarkat tiedot esimerkiksi kaikista niiden osista ja mitoista. Lopuksi digitaalisen kaksosen kokonaisuus (engl. Digital Twin Aggregate) yhdistää kaikki valmistetut tuotteet ja niiden digitaaliset ilmentymät, mahdollistaen koko tuotteen tarkastelun, ennusteiden laatimisen ja kehittämisen kerätyn tiedon pohjalta. (Grieves & Vickers 2016; Grieves 2023)

Tao et al. (2018) jaottelevat digitaaliset kaksoset tuotteen, laitteen tai järjestelmän elinkaaren rakennetta mukaillen kolmeen eri luokkaan: a) digitaalisiin kaksosiin perustuvaan tuotesuunnitteluun, b) digitaalisiin kaksosiin perustuvaan tuotantoon sekä c) digitaalisiin kaksosiin perustuvaan palvelutoimintaan. Tämä jaottelu on esitetty kuvassa 7.



Kuva 7. *Digitaalisten kaksosten toiminnot elinkaariajattelun mukaisesti (mukaillen lähdettä Tao et al. 2018).*

Digitaaliset kaksoset mahdollistavat tuotteen, laitteen tai järjestelmän suunnittelun, jossa virtuaalinen kohde toimii fyysisen kohteen täsmällisenä kopiona. Tämä yhdistää fyysisen ja virtuaalisen tuotteen reaaliaikaiset tiedot, mahdollistaen nopeamman ja tarkemman suunnittelun sekä asiakaspalautteen hyödyntämisen suunnittelussa. Suunnitteluprosessi voidaan jakaa kolmeen vaiheeseen: konseptisuunnitteluun, yksityiskohtainen suunnitteluun ja virtuaaliseen validointiin. Digitaalisen kaksosen avulla voidaan ennakoida suunnittelun virheitä ja optimoida tuotteen suorituskykyä ilman fyysisiä prototyyppejä, mikä lyhentää tuotannon läpimenoaikaa ja vähentää kustannuksia. (Tao et al. 2018) Vaikka Tao et al. (2018) käyttävätkin tässä kohdin nimitystä digitaalinen kaksonen, niin kyseessä ei ole Kitzinger et al. (2018) mukainen todellinen digitaalinen kaksonen, vaan pikemminkin digitaalinen malli, jota ollaan rakentamassa.

Digitaalisiin kaksosiin perustuvaa tuotantoa käytetään myös valmistusprosessien optimointiin. Digitaalinen kaksonen yhdistää fyysisen tuotantoympäristön ja sen virtuaalisen vastineen, mahdollistamalla reaaliaikaisen simuloinnin, valvonnan ja prosessien optimoinnin. Tämä lähestymistapa parantaa resurssien hallintaa, tuotannon suunnittelua ja prosessien hallintaa, sekä auttaa tunnistamaan tuotantoon liittyviä ongelmia ja kehittämään nopeita korjaustoimenpiteitä. (Tao et al. 2018)

Digitaalisiin kaksosiin perustuva palvelutoiminta kattaa tuotteen käyttö- ja ylläpitovaiheet, joissa keskitytään tuotteiden, laitteiden ja järjestelmien toimintakunnon ja suorituskyvyn seurantaan. Tämä mahdollistaa reaaliaikaisen tilanvalvonnan, energiankulutuksen analysoinnin, käyttäjien toiminnan optimoinnin ja vikaennusteiden laatimisen. Digitaaliset kaksoset luovat tarkkoja simulaatioita, joiden avulla voidaan kehittää esimerkiksi ennakoivia huoltostrategioita ja virtuaalisia korjaustoimenpiteitä. (Tao et al. 2018)

Seuraavissa luvuissa käsitellään digitaalisten kaksosten käyttökohteita valmistavassa teollisuudessa tuotteiden, laitteiden ja järjestelmien eri elinkaaren vaiheissa suunnittelussa, tuotannossa ja käytössä. Jokainen käyttökohde esitellään ensin yleisesti, jonka jälkeen on listattuna muutamia sovelluksia kustakin käyttökohteesta.

4.1 Suunnittelussa

Digitaalisia kaksosia käytetään sekä uusien järjestelmien suunnittelemisessa että olemassa olevien järjestelmien kehittämisessä. Riippumatta siitä onko kyseessä uusi vaiko olemassa oleva järjestelmä digitaalisilla kaksosilla suunnittelussa siirrytään staattisesta suunnittelusta dynaamiseen suunnitteluun (Liu et al. 2019a). Digitaalisilla kaksosilla järjestelmien suunnittelua voidaan toteuttaa eri suunnittelun vaiheissa: konseptisuunnittelusta yksityiskohtaiseen suunnitteluun ja aina virtuaaliseen testaamiseen ja virtuaaliseen käyttöönottamiseen (Tao et al. 2018).

Konseptisuunnittelu on tuotteen suunnitteluprosessin ensimmäinen ja tärkein vaihe, jossa suunnittelijat linjaavat tuotteen, laitteen tai järjestelmän tulevan kehityksen, konseptin ja keskeiset toiminnot. Tässä vaiheessa tehdyt suunnitteluratkaisut sitovat huomattavan määrän tulevista kustannuksista. Suunnittelussa tarvittavan tiedon, kuten tiedot asiakasvaatimuksista ja teknisten ratkaisujen ominaisuuksista, hajanaisuus ja suuri määrä voivat kuitenkin vaikeuttaa suunnitteluprosessin hallintaa. Digitaalinen kaksonen pystyy kokoamaan kaiken tarvittavan tiedon yhteen paikkaan, mikä antaa suunnittelijoille selkeän kokonaiskuvan ja auttaa kehityskohteiden tunnistamisessa. Digitaalinen kaksonen tarjoaa reaaliaikaisen näkymän tuotteen tilasta ja helpottaa näin tiedonkulkua asiakkaiden ja suunnittelijoiden välillä, mikä tukee suunnittelua aiempien käyttäjäkokemusten ja palautteen pohjalta. (Tao et al. 2018)

Konseptisuunnittelun jälkeen siirrytään yksityiskohtaiseen suunnitteluun, jossa suunnittelijat konseptisuunnitelman pohjalta viimeistelevät tuotteen, laitteen tai järjestelmän. Tuloksena on joko prototyyppi tai täysin valmis järjestelmä riippuen iterointikerroista. Samalla suunnitellaan näiden valmistamiseen tarvittavat tuotantoratkaisut valmistukseen käytettävistä tuotannon valmistusprosesseista aina kokonaisiin tuotantojärjestelmiin. Vaihe vaatii monialaista teknistä osaamista tuotekehityksestä mekaniikka- ja automaatiosuunnitteluun sekä simulointiosaamista, koska simuloinneilla varmistetaan suunnitellun järjestelmän vaadittu suorituskyky. Simulointien haasteena on reaaliaikaisen tiedon puute, joka heikentää simulointien tarkkuutta. Digitaalinen kaksonen ratkaisee tämän ongelman, sillä se seuraa tuotteen koko elinkaarta ja päivittyy jatkuvasti reaalimaailman muutosten mukaan, mikä mahdollistaa yksityiskohtaisen simuloinnin (Tao et al. 2018).

Lopuksi yksityiskohtainen suunnitelma evaluoidaan ennen tuotteen, laitteen tai järjestelmän käyttöönottamista. Perinteisesti tuotteiden toiminta testataan fyysisillä prototyypeillä ennen massatuotantoa ja tuotantolaitteiden osalta suoritetaan käyttöönoton kannalta oleelliset testit ennen varsinaisen tuotannon aloittamista. Digitaalisten kaksosten avulla tuotteiden, laitteiden ja järjestelmien toimintaa voidaan kuitenkin testata etukäteen ennen tuotteen valmistamista tai tuotantolaitteen asentamista, mikä lyhentää fyysisillä tuotteilla ja laitteilla toteutettavien testien kestoa. Virtuaalinen validointi hyödyntää dataa laitteista, ympäristöstä, materiaaleista ja edellisistä tuotantoversioista, mikä mahdollistaa suunnitteluvirheiden tunnistamisen ja nopean korjaamisen. Digitaalinen kaksonen ei ainoastaan simuloi käyttäytymistä, vaan ehdottaa myös ratkaisuja todelliseen järjestelmään liittyen, optimoiden järjestelmiä ja antaen ennusteita fyysisen tuotteen, laitteen tai järjestelmän toiminnasta. Näin suunnittelijat voivat luoda realistisia simulointiympäristöjä ja arvioida tarkasti tuotteen suorituskykyä ennen varsinaista valmistusta. (Tao et al. 2018)

Kuten huomataan digitaaliset kaksoset tukevat suunnittelua kattavasti suunnittelun eri vaiheissa riippumatta siitä, onko kyseessä mekaniikka-, automaatio- vaiko ohjelmistosuunnittelu. Digitaaliset kaksoset soveltuvat näiden kaikkien osa-alueiden suunnittelun tehostamiseen ja optimoimiseen. Seuraavaksi esitellään tarkemmin muutamia digitaalisten kaksosten sovelluskohteita ja digitaalisten kaksosten tarjoamia mahdollisuuksia suunnitteluvaiheessa.

Iteratiivinen optimointi: Digitaalisella kaksosella voidaan seurata tuotteen tai tuotannon suunnittelun aikaisempia vaiheita ja kehitystä, mikä mahdollistaa suunnitelmien iteratiivisen optimoinnin. Digitaalinen kaksonen pystyy ennustamaan tuotteen tai järjestelmän suorituskykyä ja tunnistamaan mahdollisia ongelmia, joiden avulla voidaan määrittää optimoinnin suunta, mikä saattaa jäädä huomiotta perinteisissä simuloinneissa (Liu et al. 2021). Iteratiivista optimointi on hyödynnetty esimerkiksi optimaalisen materiaalin valinnassa tuotteelle (Xiang et al. 2019) sekä suunnitteluparametrien kehityksen seuraamisessa (Zhang et al. 2019).

Reaaliaikainen data: Tuotteiden suunnittelu perustuu suunnittelijoiden (hiljaiseen) tietämykseen ja kokemukseen. Tyypillisesti tämä tietämys on kuitenkin staattista. Digitaalinen kaksonen kerää jatkuvasti tietoa tuotteen tai laitteen fyysisestä tilasta, jota voidaan verrata, analysoida ja käyttää seuraavan sukupolven tuotteiden ja laitteiden suunnittelussa tai uudelleensuunnittelussa (Singh et al. 2022).

Virtuaalinen verifiointi ja validointi: Digitaalisilla kaksosilla verifiointi ja validointi mahdollistaa ennakoitujen ja toivottujen vaatimusten vahvistamisen (ennakoitu/toivottu) sekä ennakoitujen ja toivomattomien vikojen poistamisen (ennakoitu/ei-toivottu). Ne myös

mahdollistavat ennakoimattomien ja ei-toivottujen ongelmien korjaamisen (ennakoimaton/ei-toivottu). (Grieves & Vickers 2016) Digitaalinen kaksonen tarjoaa erittäin tarkan mallin tuotteesta tai laitteesta ja sen toimintaympäristöstä, mikä tukee virtuaalisten prototyyppien luomista ja eri tuoteversioiden testaamista erilaisissa käyttöskenaarioissa. (Liu et al. 2021) Digitaalisia kaksosia voidaan käyttää virtuaalisessa käyttöönottamisessa, mikä osaltaan nopeuttaa tuotteen pääsemistä markkinoille ja laitteiden käyttöönottoa (Soori et al. 2023).

Tiedon eheyden mahdollistaminen: Nykyaikainen suunnittelu pohjautuu yhteistyöhön eri toimijoiden kanssa, mutta tämän haasteena on tuote- ja prosessitiedon sirpaloituminen. Tämän seurauksena suuri määrä hyödyllistä tietoa, joka voisi auttaa päätöksenteossa ja ongelmanratkaisussa, on hajallaan eri sidosryhmillä. Digitaaliset kaksoset mahdollistavat tiedon jakamisen eri sidosryhmille sen tukemilla digitaalisilla ratkaisuilla (Lutters 2018).

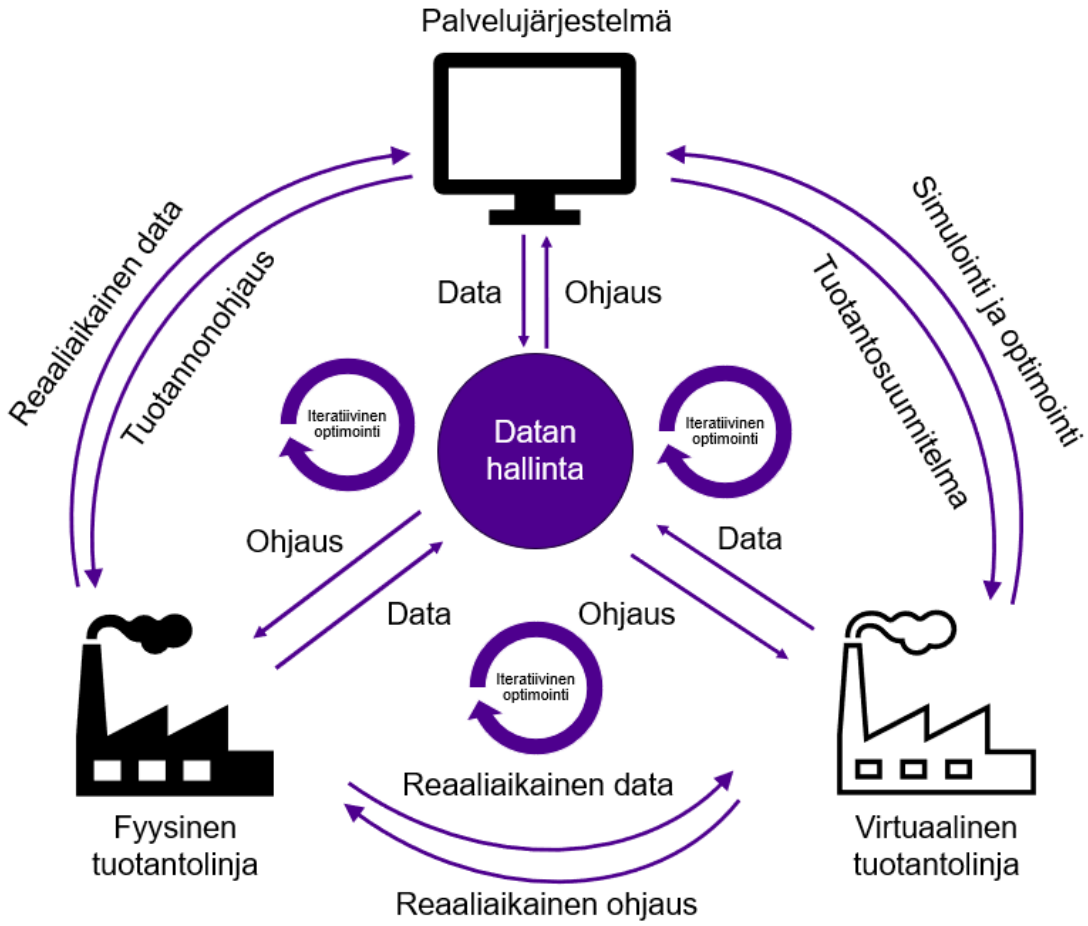
Asiakaspalautteen huomioiminen: Tuotteista ja laitteista mitatun datan, asiakaspalautteen ja käyttötapojen avulla suunnittelijat voivat ymmärtää asiakasvaatimuksia ja muuntaa ne tuotteen tai laitteen parannetuiksi ominaisuuksiksi. Digitaalisen kaksosen kautta kerätty asiakaspalaute tarjoaa tietoa markkinatrendeistä, joita voidaan yhdistää käyttödataan tuotteen suorituskyvyn tarkastelemiseksi (Singh et al. 2022). Tämä auttaa yrityksiä tekemään harkittuja suunnittelupäätöksiä, integroiden asiakaspalautteen tuotteeseen ja helpottaen räätälöityjen tuotteiden toimittamista (Tao et al. 2019). Lisäksi reaaliaikainen data aiemmista tuotesukupolvista paljastaa toimivimmat ominaisuudet ja kehitystä kaipaavat kohdat (Lo et al. 2021).

Materiaalin valinta: Digitaaliset kaksoset tukevat suunnittelijoita tuotteiden materiaalivalinnassa. Digitaalisiin kaksosiin pohjautuvissa menetelmissä voidaan määrittää esimerkiksi vihreän siirtymän kannalta oleellisia materiaalin valintakriteereitä, joiden pohjalta digitaalinen kaksonen simuloi materiaalin elinkaareen suunnittelusta käytöstä poistamiseen huomioiden materiaalin fyysiset ominaisuudet, kustannukset ja ympäristövaikutukset. Tämä johtaa materiaalien optimaaliseen valintaan kestävän kehityksen kannalta. (Xiang et al. 2019)

4.2 Tuotannossa

Digitaalisia kaksosia hyödynnetään lukuisissa erilaisissa tuotannon sovelluksissa aina järjestelmien käyttöönotosta, valmistusparametrien optimoimiseen, tuotannon reitittämiseen sekä laitteiden kunnossapitoon. Ennen kuin käsitellään tarkemmin erilaisia tuotan-

non sovelluskohteita, on määritettävä, miten digitaaliset kaksoset toteutetaan tuotannossa. Tao et al. (2017) esittivät tuotannon valmistusparadigman *Digital Twin Shop Floor*. Kuten kuvassa 8 esitetään, tuotannon digitaalinen kaksonen koostuu neljästä osasta: fyysisestä tuotantolinjasta, virtuaalisesta tuotantolinjasta, tuotantolinjan palvelujärjestelmästä ja tuotantolinjan digitaalisen kaksosen datanhallinnasta.



Kuva 8. *Tuotannon digitaalinen kaksonen (mukaillen lähdettä Tao et al. 2017).*

Fyysinen tuotantolinja vastaanottaa annetut tuotannon tehtävät ja ennalta määritetyt tilaukset sekä toteuttaa ne täsmällisesti lopputuotteiden valmistamiseksi. Virtuaalinen tuotantolinja on fyysisen tuotantolinjan digitalisoitu vastine, joka mahdollistaa tuotantosuunnitelmien ja -prosessien simuloinnin ja ennakoinnin, optimointistrategioiden antamisen tuotantolinjan palvelujärjestelmälle sekä tuotantoprosessin reaaliaikaisen valvonnan ja säädön. Tuotantolinjan palvelujärjestelmä tarjoaa tukipalveluita tuotannon toteuttamiseksi, ja tuotantolinjan datan hallinta sisältää kaiken kokonaisuuteen liittyvän datan ja hallinnoi tätä. Kaikki osat vuorovaikuttavat toistensa kanssa ja mahdollistavat resurssien hallinnan, tuotantosuunnitelmien ja prosessinhallinnan iteratiivisen optimoinnin. (Tao et al. 2018)

Tuotannon digitaaliselle kaksoselle on määritetty kolme tehtävää (Tao et al. 2018):

1. **Resurssien allokointi ja suunnittelu**: Tuotannon digitaalinen kaksonen luo tehokkaita suunnitelmia laitteiden, materiaalien ja henkilöstön käyttöön huomioiden näiden rajoitukset. Suunnitelmia optimoidaan jatkuvasti reaaliaikaisten muutosten mukaan.
2. **Tuotantosuunnitelman laatiminen ja optimointi**: Virtuaalinen tuotantolinja simuloi tuotantosuunnitelmat, tunnistaa mahdolliset ongelmat ja optimoi prosessit yhteistyössä tuotantolinjan palvelujärjestelmän kanssa ennen valmistusta.
3. **Reaaliaikainen valmistus ja ohjaus**: Fyysinen tuotantolinja toteuttaa ja ohjaa tuotantoa suunnitelman mukaisesti, kun taas virtuaalinen tuotantolinja ja palvelujärjestelmä valvovat ja säätävät prosessia reaaliaikaisesti varmistaen tuotannon täsmällisyyden ja tehokkuuden.

Edellä kuvattu kuvastaa tuotannon digitaalisen toimintaa yleisellä tasolla. Seuraavaksi esitellään tarkemmin muutamia digitaalisten kaksosten käyttökohteita tuotannossa.

Tuotannonsuunnittelu: Tuotannon erilaiset häiriötilanteet, kuten rikkoutuneet laitteet, puuttuvat materiaalit sekä henkilöstön äkilliset poissaolot, vaativat älykästä ja joustavaa reagointia tuotannonsuunnittelulta. Digitaalinen kaksonen mahdollistaa tuotantosuunnitelmien optimoinnin reaaliaikaisesti muuttuvien olosuhteiden perusteella, tukien automaattista tilausten suunnittelua ja täytäntöönpanoa sekä päätöksenteon parantamista yksityiskohtaisten analyysien avulla (Liu et al. 2021, Singh et al. 2022). Eräs lähestymistapa tämän toteuttamiseksi on käyttää tuotantojärjestelmän tilannekuvaa pohjana tuotantosuunnitelmalle, jonka digitaalinen kaksonen testaa virtuaalisessa ympäristössä. Jos suunnitelma ei ole optimaalinen tai tuotantoresurssien tilanne muuttuu, digitaalinen kaksonen tarjoaa ehdotuksia parannuksista. (Tao & Zhang 2017)

Tuotannonohjaus: Tuotannonohjauksessa toimitaan tuotantosuunnitelman mukaisesti, mutta todellisuudessa prosessit eivät ole koskaan täysin ennustettavissa, vaan häiriötilanteita esiintyy jatkuvasti ja niihin on reagoitava nopeasti, jolloin ei pystytä seuraamaan alkuperäistä tuotantosuunnitelmaa. Dynaamisissa tuotantoympäristöissä digitaaliset kaksoset mahdollistavat reaaliaikaisen ja älykkään ohjauksen. Niiden kyky hyödyntää ajantasaisia tietoja ja tarkkoja malleja mahdollistaa älykkäiden ohjausstrategioiden soveltamisen monimutkaisissa ja vaativissa tuotantoympäristöissä. (Liu et al. 2021) Käytännössä tämä voi tarkoittaa koneen äkillisesti rikkoutuessa vaihtoehtoisen valmistusreitin löytämistä.

Toimitusketjut: Toimitusketjuissa digitaalisia kaksosia käytetään tehostamaan resurssien käyttöä ja optimoimaan materiaalivirtausta (Kamble et al. 2022). Digitaalisten kak-

sosten avulla yritykset voivat edistää toimitusketjujen ympäristöystävällisyyttä ja läpinäkyvyyttä seuraamalla tuotteiden elinkaarta ja parantamalla toimitusverkoston vastuullisuutta ja resilienssiä (Singh et al. 2023).

Reaaliaikainen monitorointi: Reaaliaikaisen monitoroinnin avulla digitaalinen kaksonen mahdollistaa tuotannon, tuotantolaitteiden ja jopa valmistettavien tuotteiden tilan ja kunnon jatkuvan seurannan. Se ei ainoastaan kuvaa kohteen tämänhetkistä tilaa, vaan myös tukee tilanteen ymmärtämistä ja optimointipäätösten tekemistä. Digitaalinen kaksonen hyödyntää aiemmin kerättyä tietoa, reaaliaikaista dataa sekä ennusteita analysoidakseen mennyttä, tarkkaillakseen nykyhetkeä ja ennustaakseen tulevaa. (Liu et al. 2021) Reaaliaikaisessa monitoroinnissa voidaan hyödyntää digitaalisten kaksosten mahdollistamaa visuaalista 3D-mallia tuotantojärjestelmän tilan kuvantamiseen perinteisten numeeristen esitystapojen sijasta (Zhao et al. 2019).

Tuotantoresurssien jäljitettävyys ja näkyvyys: Tuotannon resurssien jäljitettävyys ja näkyvyys ovat keskeisiä tekijöitä tuotannon suorituskyvyn parantamisessa, sillä ne edistävät tehokkaampia ohjaus-, suunnittelu- ja aikataulutuspäätöksiä. Digitaalisen kaksosen avulla voidaan saavuttaa tuotannon dynaaminen, reaaliaikainen ja tarkka jäljitettävyys sekä näkyvyys (Zhuang et al. 2018, Vijayakumar et al. 2019), mikä puolestaan johtaa parempaan tuotantoresurssien ja muun käyttöpääoman hallintaan ja hyödyntämiseen (Liu et al. 2021).

Valmistusprosessien ja -menetelmien optimointi: Soveltuvien ja kustannustehokkaiden valmistusprosessien ja -menetelmien valinta ja optimointi on nykyaikaisessa tuotannossa haastavaa niiden monimutkaisuuden ja toisaalta asiakaskohtaisen piensarjatuotannon ja räätälöityjen tuotteiden vuoksi. Esimerkiksi koneistuksen dynaamiset muutokset, kuten työstön aikaiset värähtelyt, ja epävarmuustekijät, kuten teräpalojen epäsäännöllinen kuluminen, heikentävät työstöprosessin ja täten valmistettavan tuotteen laatua. Suunnittelijat eivät pysty huomioimaan työstöprosessin todellista tilaa valmistusprosesseja valitessaan ja sille parametreja määrittäessään, vaan perustavat työnsä staattisiin ideaalimalleihin. (Liu et al. 2019b) Reaaliaikainen tiedonkeruu mahdollistaa digitaalisen kaksosen, joka huomioi valmistusprosessin dynaamisuuden ja laitteiden todellisen kunnon. Digitaalinen kaksonen yhdistää kerätyn datan prosessin virtuaaliseen malliin, mikä mahdollistaa prosessien reaaliaikaisen arvioinnin ja optimoinnin sekä vuorovaikutuksen todellisen ympäristön kanssa. (Liu et al. 2021) Digitaalisten kaksosten avulla voidaan myös arvioida valitun valmistusprosessin soveltuvuutta tuotteen valmistamiseksi.

Työkappaleen suorituskyvyn ennustaminen: Valmistusprosessien aikana esiintyy monenlaisia ilmiöitä, jotka voivat vaikuttaa työkappaleen ominaisuuksiin. Esimerkiksi koneistuksessa ilmenee useita monitieteisiä ilmiöitä, jotka voivat vaikuttaa tuotteen pinnan karheuteen. Erilaiset valmistusprosessin aikana tapahtuvat ilmiöt, niiden vaihtelut ja häiriöt muodostavat yhdessä tekijöitä, jotka tekevät työkappaleen suorituskyvyn ennustamisesta haastavaa. Työkappaleen suorituskyvyn ennustamiseksi ennen varsinaista valmistusta tarvitaan virtuaalisia malleja, jotka yksinkertaistavat monimutkaisia valmistusilmiöitä. Digitaaliset kaksoset hyödyntävät abstraktioita ja tekoälyalgoritmeja, jotka parantavat jatkuvasti päivittyvien mallien ennustustarkkuutta, mahdollistamalla siten työkappaleen suorituskyvyn ennakoimisen etukäteen. (Liu et al. 2021)

Tuotannon esivalmistelujen ja reitityksen kehittäminen: Tuotannon esivalmisteluihin ja asetuksiin käytetyt ajat ovat pois tehokkaasta tuotantoajasta, minkä takia näiden minimoiminen on oleellista. Näihin käytettyjä aikoja voidaan minimoida esimerkiksi työkalusuunnittelulla suunnittelemalla yleiskäyttöisiä ja helposti vaihdettavissa olevia työkaluja sekä käytännöllisellä tuotannon reitityksellä ja hallituilla puskurivarastoilla, joilla minimoidaan turhia odotusaikoja, pienennetään varastotasoja sekä lyhennetään läpimenoaikoja. Tuotannossa valmistettavien tuotteiden vaihteleva luonne, erilaiset häiriöt ja moninaiset reititysmallit tekevät tästä suunnitteluprosessista monimutkaisen, mutta digitaaliset kaksoset tukevat tuotannon esivalmisteluiden kehittämistä ja asetusaikojen minimoimista reaaliaikaisella tiedolla tuotannosta. (Leng et al. 2021a)

Layoutsuunnittelu: Tuotantojärjestelmien layoutsuunnittelu määräytyy muun muassa tilojen geometristen rajoitteiden, valmistusprosessien vaiheiden ja logistiikan perusteella. Valmistusprosessien välisten prioriteettien mukaan voidaan määrittää järjestelmän topologia ja logistiikan intensiteetti on keskeinen tekijä, kun arvioidaan layoutin toimivuutta. Digitaaliset kaksoset tukevat layoutsuunnittelua mahdollistamalla reaaliaikaisen tiedon tuotannosta ja tämän tiedon hyödyntämisen uuden layoutin suunnittelussa ja simuloimisessa. Digitaalisten kaksosten avulla tuotantoresurssit sijoitetaan oikein ja käytetään tarkoituksenmukaisiin toimintoihin reaalijärjestelmästä saadun näkyvyyden avulla. (Leng et al. 2021a)

Uudelleenkonfigurointi: Perinteisesti tuotantojärjestelmät on suunniteltu yhden tuotetyypin tai tuoteperheen valmistamiseen, mikä aiheuttaa merkittäviä kustannuksia, kun tuotanto siirtyy uusiin tuotteisiin. Nykyiset tuotantoympäristöt, joissa korostuvat asiakaskohtainen räätälöinti, lyhyet tuotteen elinkaaret ja piensarjatuotanto, edellyttävät huomattavaa tuotantojärjestelmän uudelleensuunnittelua valmistettavan tuotteen vaihtuessa. Optimaalinen tuotantojärjestelmänsuunnittelu yhdelle tuotteelle voi menettää käyttökel-

poisuutensa, kun tuotesukupolvien muutokset tekevät suunnittelun mukauttamisen ennakoimattomaksi ja monimutkaiseksi. (Leng et al. 2021a) Digitaaliset kaksoset tukevat uudelleenkonfiguroitavien tuotantojärjestelmien suunnittelua. Niiden optimointitekniikat huomioivat tuotannon muunneltavuuden tuotantojärjestelmän suunnittelun aikana (Kurniadi et al. 2018).

Virtuaalinen käyttöönottaminen: Digitaalista kaksosta, tai tarkemmin digitaalista mallia, voidaan käyttää virtuaalisessa käyttöönottamisessa, jolloin simuloinnilla voidaan testata ohjaus- ja automaatiojärjestelmän toimintaa virtuaalisesti järjestelmän digitaalisella vastineella ennen sen asentamista käytännössä. Tämä mahdollistaa järjestelmän varhaisen validoinnin, mikä auttaa ennakoimaan ja ratkaisemaan laitteiden ja prosessien integraatiovaiheessa ilmeneviä ongelmia sekä vähentämään fyysiseen käyttöönottoon kuluvaa aikaa, kustannuksia ja siihen sisältyviä riskejä (Ugarte Querejeta et al. 2022; Soori et al. 2023).

Ainetta lisäävä valmistus: Digitaalinen kaksonen on hyödyllinen ainetta lisäävässä valmistuksessa (engl. Additive Manufacturing, AM) (Cai et al. 2020). 3D-tulostuskoneen digitaalinen kaksonen mahdollistaa haluttujen tuoteominaisuuksien saavuttamisen ilman toistuvia kokeilu- ja virhekierroksia. Tämä lyhentää suunnittelu- ja tuotantoaikaa, tehden AM-prosessista sekä ajan että kustannusten kannalta tehokkaamman (Mukherjee & DebRoy 2019). Gaikwad et al. (2020) hyödynsivät simulointia ja koneoppimista luodakseen AM-prosessin digitaalisen kaksosen, joka pystyi havaitsemaan vikoja valmistettavissa osissa jo valmistuksen aikana

Ihmisen ja robotin yhteistyö: Yhteistyörobotit ja kehittyneet turvajärjestelmät mahdollistavat ihmisen ja robotin yhteistyön (engl. Human-Robot Collaboration, HRC), joka asettaa haasteita järjestelmien suunnittelemiselle. Tyypillisesti ihmisen työtehtävien-suunnittelu ja robotin ohjelmointi on tehty erillään toisistaan. Siksi muutokset tai häiriöt yhteistyökäyttöisessä ympäristössä voivat edellyttää sekä ihmisen että robotin tehtävien ja liikkeiden uudelleenmäärittelyä. Digitaalinen kaksonen mahdollistaa ihmisen ja robotin yhteistyön suunnittelemisen samanaikaisesti samassa järjestelmässä (Liu et al. 2021). Digitaalinen kaksonen helpottaa työtehtävien allokoimista robotin ja ihmisen kesken, työaseman layoutin optimointia, ihmisen ergonomian analysointia ja robotin ohjelman testausta (Li et al. 2019).

4.3 Käytössä

Tuotteen, laitteen tai tuotantojärjestelmän suunnittelemisen, valmistamisen ja käyttöönottamisen jälkeen tuotetta, laitetta tai järjestelmää käytetään. Tällöin erityisen huomion kohteena on tuotteen tai järjestelmän tilan seuranta, jotta tuotetta tai järjestelmää käytettäisiin oikein ja optimaalisesti. Tavoitteena on myös huolehtia laitteen tai järjestelmän kunnosta, jotta se palvelisi mahdollisimman pitkään parhaimmalla mahdollisella tasolla. Haasteena on kuitenkin rakenteeltaan monimutkaisten tuotteiden ja järjestelmien tilan, käytön ja kunnon seuraaminen ja optimoinen reaaliaikaisesti. Digitaaliset kaksoset tarjoavat mahdollisuuden näiden haasteiden ratkaisemiseen erilaisilla käytönaikaisilla työkaluilla, jotka esitellään seuraavaksi.

Reaaliaikainen tilan seuranta: Digitaalisen kaksosen avulla fyysisen tuotteen, laitteen tai järjestelmän tila ja muut parametrit, kuten energiankulutus ja ohjausparametrit, voidaan päivittää reaaliajassa virtuaaliseen malliin (Tao et al. 2018). Päivittyvä ja tarkka digitaalinen malli kattaa tuotteen tai järjestelmän koko elinkaaren ja tarjoaa virtuaalisen kuvan fyysisestä kohteesta tehokkaammin ja pienemmällä datamäärällä kuin perinteiset tilanseurantamenetelmät (Liu et al. 2021). Reaaliaikaisen tilannetiedon ja tähän yhdistetyn historiatiedon pohjalta digitaalinen kaksonen pystyy antamaan ohjeistuksia tuotteen tai järjestelmän käytön tehostamiseen sekä ennakoimaan järjestelmän toimintaa tulevaisuudessa. Digitaalinen kaksonen mahdollistaa kerätyn datan tarkastelun eri näkökulmista ja havaitsee poikkeamat toteutuneiden ja ennakoitujen arvojen välillä. Reaaliaikaisesta tilan seurannasta hyötyvät sekä käyttäjät että valmistajat.

Älykäs optimointi ja päivitys: Digitaalisten kaksosten avulla toteutettava älykäs optimointi mahdollistaa tuotteen suorituskyvyn jatkuvan parantamisen käytön aikana. Kaksonen kerää reaaliaikaista dataa tuotteen toiminnasta ja ympäristöolosuhteista, analysoi sitä tekoälyalgoritmein ja tunnistaa mahdollisia kehityskohteita. Tämän pohjalta voidaan ehdottaa ohjelmistopäivityksiä ja mukauttaa tuotteen asetuksia vastaamaan käyttöympäristöä ja käyttäjän tarpeita, mikä parantaa energiatehokkuutta ja pidentää käyttöikää. Käytönaikainen optimointi vähentää käyttökatkoja ja huollon tarvetta, jolloin tuote säilyttää suorituskykynsä elinkaarensa ajan. Näin digitaalinen kaksonen varmistaa, että tuote vastaa optimaalisesti käyttäjän muuttuviin tarpeisiin ja olosuhteisiin.

Ennakoiva kunnossapito: Ennakoivan huollon toteuttaminen tuotantolaitteille ja valmistetuille tuotteille on vaativaa. Puutteellisesti suunniteltu kunnossapito voi johtaa heikentyneeseen tuotannon laatuun, rikkoutuviin laitteisiin tai turhiin huoltotoimiin, mikä kasvattaa ylläpitokustannuksia ja heikentää laitteiden suorituskykyä. Digitaalisen kaksosen

hyödyntäminen ennakoivassa kunnossapidossa mahdollistaa tuotantolaitteiden ja tuotteiden reaaliaikaisen kunnon seurannan, ja huoltotoimenpiteet voidaan ajoittaa hetkeen, jolloin niiden vaikutus on suurin (Liu et al. 2021).

Vianetsintä ja diagnostiikka: Vianetsintä ja diagnostiikka ilman digitaalista kaksosta on usein haastavaa, sillä laitteista saatava data on yleensä normaaliolojen mukaista. Tämän takia tietoa ei aina ole tarpeeksi ennakoimattomien poikkeamien havaitsemiseksi. Digitaalinen kaksonen mahdollistaa kuitenkin reaalimaailman datan analysoimisen virtuaalisessa ympäristössä yhdessä historiatiedon kanssa, mikä puolestaan mahdollistaa järjestelmän toiminnan mallintamisen poikkeamien havaitsemiseksi ja analysoimiseksi (Liu et al. 2021) tarjoten näin arvokasta tietoa käyttäjille ja valmistajille (Tao et al. 2018). Vian sattuessa voidaan tunnistaa vioittunut osa ja antaa ohjeet, esimerkiksi vioittuneen osan vaihtamiseksi, mikä tukee tehokasta huoltotoimintaa. Virtuaalimallit mahdollistavat virtuaaliset huoltopalvelut, jolloin osa huolloista voidaan toteuttaa etänä tai reaalijärjestelmän huolloissa voidaan hyödyntää lisätyn todellisuuden teknologioita tukemassa käytännön huoltotoimia. (Tao et al. 2018)

Suorituskyvyn ennustaminen: Digitaalisen kaksosen avulla voidaan optimoida ja ennustaa laitteen tai tuotteen suorituskykyä, sillä se sisältää kattavan tiedon kyseisen tuotteen tai laitteen suunnittelusta, valmistuksesta ja käytöstä. Digitaalinen kaksonen tuntee tuotteen jokaisen osa-alueen, toisin kuin suunnitteluvaiheen ratkaisut, jotka eivät aina ota huomioon käyttöolosuhteiden mahdollisia muutoksia (Okita et al. 2019).

Virtuaalinen testaus: Digitaalinen kaksonen toimii fyysisen laitteen digitaalisena mallina, jonka avulla voidaan testata erilaisia toimintoja turvallisessa ympäristössä, koska virheet fyysisessä järjestelmässä voisivat aiheuttaa merkittäviä vahinkoja. Tässä mielessä digitaalinen kaksonen muistuttaa simulaatiota, mutta tarjoaa tarkemman ja realistisemman lähestymistavan. Se luo yksityiskohtaisen simulaatioympäristön, jota voi tutkia ja testata ilman, että fyysisiin järjestelmiin kohdistuu riskejä (Eckhart & Ekelhart 2018).

Energiankulutuksen analysointi ja ennustaminen: Digitaalisen kaksosen avulla tuotteen energiankulutusta voidaan valvoa reaaliaikaisesti. Reaaliaikaisen ja historiallisen energiankulutustiedon perusteella voidaan tarkastella esimerkiksi järjestelmän osien energiankulutuksen osuutta kokonaiskulutuksesta sekä eri ajanjaksojen energiankulutusta. Energiankulutusta voidaan ennustaa tulevaisuuteen, mikä mahdollistaa esimerkiksi tuotteelle ympäristöystävällisten materiaalien ja energiankulutukseltaan pienien komponenttien valinnan sekä toisaalta laajempien prosessien, esimerkiksi kokonaisten tehtaiden, suunnittelun energiatehokkaiksi. (Tao et al. 2018)

Virtuaaliset koulutukset: Vaaralliset tuotantoprosessit ja monimutkaiset tuotteet vaativat usein pitkät ja huolellisesti toteutetut turvallisuus- ja käyttökoulutukset. Virtuaalimallin ja todellisesta järjestelmästä saatavan datan pohjalta voidaan tarjota alusta turvallisuus- ja käyttökoulutuksiin, mikä lyhentää koulutusaikoja todellisella järjestelmällä, kun osa koulutuksesta tehdään etukäteen digitaalisella kaksosella. Virtuaaliset digitaalisiin kaksosiin perustuvat koulutukset ovat erityisen tarkkoja ja tehokkaita, koska ne perustuvat reaalijärjestelmään pelkän simuloinnin sijasta (Tao et al. 2018).

Käyttäjän tukipalvelut: Digitaalinen kaksonen mahdollistaa tuotteen tai järjestelmän käyttäjien toimintojen analysoinnin reaaliaikaisesti, paljastaen käyttäjien tottumukset ja toimintatavat, jotka voivat vaikuttaa tuotteen tai järjestelmän suorituskykyyn ja käyttöikään. Tämä tieto tukee valmistajia järjestelmäpäivityksissä ja tuotteen suorituskyvyn parantamisessa ja optimoimisessa. Lisäksi digitaalinen kaksonen voi tarjota reaaliaikaisia suosituksia käyttäjän toiminnan ohjaamiseksi ja tehostamiseksi ja täten auttaa ehkäisemään haitallisia käyttötapoja. (Tao et al. 2018)

Tuotteiden ja järjestelmien käyttämistä seuraa tuotteiden ja järjestelmien käytöstä poistaminen, joka jää usein huomioimatta mahdollisena digitaalisten kaksosten sovelluskohteena (Liu et al. 2021). Käytöstä poistamisen aikana on erityisen hyödyllistä huomioida tuotteen tai järjestelmän elinkaaren aikana kertyneen datan hyödyntäminen. Digitaalisista kaksosista onkin hyötyä, jos niitä käytettäisiin keräämään ja säilömään tietoa järjestelmän tai tuotteen käyttäytymisestä, jota puolestaan voisi hyödyntää tulevien tuotteiden ja järjestelmien kehittämisessä. Tällöin olemassa oleva tieto ei pääse katoamaan ja sen avulla voidaan välttää toistamatta samoja virheitä uudestaan. (Grieves & Vickers 2017) Eläköitymisvaiheessa digitaalinen kaksonen sisältää fyysisen kaksosen koko elinkaaritiedot, ja se voidaan säilyttää virtuaalisessa tilassa pienin kustannuksin (Liu et al. 2021).

Digitaalisia kaksosia hyödynnetään enenevissä määrin myös kiertotaloudessa, jossa digitaaliset kaksoset nähdään kiertotalouden mahdollistajana esimerkiksi suljetuille toimitusketjuille (Gebhardt et al. 2022). Se luo tarvittavan läpinäkyvyyden tuotteen elinkaaren kaikissa vaiheissa ja varmistaa suljetun kierron (engl. closed-loop) tuotteiden, komponenttien, materiaalien, prosessien ja informaation tasolla (Mügge et al. 2024). Digitaaliset kaksoset tukevat jatkuvaa tiedonkeruuta, analysointia ja arviointia, tarjoten tätä tietoa eri sidosryhmille tuotteen koko elinkaaren ajan, jonka seurauksena syntyy uusia liiketoimintamalleja ja palveluita (Preut et al. 2021). Digitaaliset kaksoset tukevat kiertotalouden R-strategioita esimerkiksi edistämällä uudelleenkäytön, uudelleenvalmistamisen ja kierrättämisen suunnittelua (Kalaboukas et al. 2023) sekä tehostamalla käytöstä poistuvien tuotteiden purkamista (Ke et al. 2023).

5. DIGITAALISEN KAKSOSEN MAHDOLLISUUDET

Digitaalisten kaksosten sovelluksissa tunnistettiin lukemattomia digitaalisten kaksosten tarjoamia mahdollisuuksia ja tätä kautta syntyviä hyötyjä. Kuinka edut konkretisoituvatta käytännössä onkin eri asia, koska todellisia digitaalisia kaksosia ei ole vielä juurikaan teollisuudessa (Cimino et al. 2019). Suurin osa havaituista eduista perustuu konseptuaalisiin tutkimuksiin ja laboratoriokokeisiin, eikä niitä ole testattu teollisissa ympäristöissä. Tässä kohdin on kuitenkin huomattava, että digitaalisia kaksosia määritellään vaihtelevasti ja varsinkin digitaalisia malleja sekä digitaalisia varjoja hyödynnetään teollisissa sovelluksissa. Näistä saadut hyödyt eivät kuitenkaan vastaa kaikkia todellisilla digitaalisilla kaksosilla saavutettavia hyötyjä. On hyvä myös muistaa yritysten erilaiset lähtökohdat: osalla yrityksistä on resurssit ja tietotaito todellisten digitaalisten kaksosten toteuttamiseen, mutta näin ei ole läheskään kaikilla. Tässä luvussa digitaalisten kaksosten mahdollisuuksia ja etuja käsitellään yleisemmällä tasolla eikä luvun 5 sovelluskohteiden näkökulmista.

Elinkaaren aikainen päätöksenteko, iterointi, optimointi ja validointi: Digitaaliset kaksoset mahdollistavat älykkään optimoinnin ja dataperusteisen päätöksenteon, mikä parantaa resurssien käyttöä, tehostaa toimintaprosesseja ja tuo merkittäviä kustannussäästöjä. Iteroinnin, validoinnin ja verifioinnin avulla voidaan testata ja kehittää prototyyppejä nopeasti, tunnistaa virheet jo ennen tuotantoa ja lyhentää tuotteiden markkinoille pääsyä. Lisäksi digitaalisten kaksosten elinkaariajattelu tukee järjestelmien pitkäaikaista seurantaa, huoltotarpeiden ennakointia ja käyttöiän pidentämistä, edistäen kestävää kehitystä ja tuotteiden sekä palveluiden suorituskykyä koko niiden elinkaaren ajan.

Resurssitehokkuus ja -hallinta, suorituskyvyn ja toimintakunnon ylläpito: Tuotannossa digitaaliset kaksoset mahdollistavat resurssien optimaalisen allokoinnin, mikä vähentää arvoa tuottamatonta toimintaa (Wang et al. 2021) ja erilaisia tuotannon hukkia (esim. virheitä, odotusta, tarpeetonta kuljetusta ja varastointia). Kaksosten avulla voidaan tunnistaa tuotannon pullonkauloja ja täten parantaa järjestelmän kokonaistehokkuutta (Kumbhar et al. 2023). Ne myös auttavat ylläpidon ennakoinnissa ja priorisoinnissa, mikä vähentää odottamattomia seisokkeja ja minimoi huoltokustannuksia (Frantzén et al., 2022)

Kustannustehokkuus: Digitaaliset kaksoset tehostavat tuotantojärjestelmien toimintaa, esimerkiksi mahdollistamalla edellisessä luvussa mainitun optimoidun tuotannonsuunnittelun ja -ohjauksen, mikä tekee toiminnasta kustannustehokkaampaa. Lisäksi digitaaliset kaksoset voivat tuoda merkittäviä kustannussäästöjä ennakoivassa huollossa ajoittamalla huoltotoiminnot juuri oikeaan ajanhetkeen, vianetsinnässä helpottamalla vikojen löytämistä ja juurisyiden tunnistamista sekä tuotantojärjestelmien energiankulutuksen optimoimisessa. Vaikka digitaalisilla kaksosilla voidaan saavuttaa operatiivisessa toiminnassa kustannussäästöjä, on huomioitava digitaalisten kaksosten investointi- ja ylläpitokustannukset (Atalay et al. 2021).

Ymmärryksen lisääminen: Digitaaliset kaksoset mahdollistavat paremman ymmärryksen järjestelmistä, esimerkiksi auttamalla ymmärtämään tehtaiden eri prosessien välisiä yhteyksiä sekä valittujen tuotantoparametrien vaikutuksia tuotannonprosesseissa. Tämä on mahdollista jo siinä kohdin, kun olemassa olevasta järjestelmästä ollaan mallintamassa virtuaalista vastinetta (Modoni et al. 2019), mutta myös silloin, kun digitaalisella vastineella suoritetaan simulointeja ja optimointia. Digitaaliset kaksoset mahdollistavatkin testien suorittamisen ilman reaalijärjestelmien häiritsemistä ja vahingoittamista. Digitaaliset kaksoset voivat myös esittää järjestelmän tiedot graafisessa muodossa, mikä osaltaan helpottaa järjestelmän toiminnan ymmärtämistä.

Joustavuus: Digitaalisten kaksosten tarjoama joustavuus mahdollistaa ketterämmän ja kilpailukykyisemmän tuotannon (Rasheed et al., 2020), esimerkiksi tarjoamalla mahdollisuuden tuotannon dynaamiseen uudelleenjärjestämiseen sekä vaihtelevamman tuotevalikoiman valmistamiseen (Neto et al., 2020). Massa- ja asiakaskohtaisen räätälöinnin, yksilöllistämisen sekä piensarjatuotannon paradigmoissa tuotantojärjestelmän muutokset ovat erittäin tiheitä, mikä vaatii nopeita järjestelmäsuunnittelu- ja uudelleenkonfigurointiteknologioita sekä korkeaa joustavuutta. Tässä kontekstissa erityisesti tekoälyä hyödyntävät digitaaliset kaksoset johtavat joustavampiin ja tehokkaampiin tuotantoprosesseihin ja -järjestelmiin (Novak et al. 2020).

Luotettavuus, ennustettavuus ja läpinäkyvyys: Lähtökohtaisesti digitaalisilla kaksosilla toteutetut järjestelmät ovat luotettavampia kuin perinteiset järjestelmät (Negri et al., 2020), sillä niiden avulla laitteiden välinen kommunikointi paranee ja kasvaa, mikä lisää tiedonsiirtoa ja palautteen määrää, mikä puolestaan kohottaa järjestelmän luotettavuutta ja suorituskykyä. Toki tässä kohdin on huomioitava, että eri järjestelmien integroinnin on oltavat onnistuneesti toteutettu, sillä virheherkällä järjestelmällä luotettavuus on heikompi kuin perinteisellä järjestelmällä. Digitaaliset kaksoset mahdollistavat tarkempien ennusteiden laatimisen, mikä puolestaan tukee parempien ja perustellumpien päätösten tekemistä (Tao et al. 2019). Lisäksi digitaaliset kaksoset lisäävät järjestelmien

läpinäkyvyyttä, kun niiden eri osat integroituvat, mahdollistaen jatkuvan datavirran järjestelmän osien välillä. Digitaalista kaksosta voidaan jakaa eri tiimien ja sidosryhmien kesken, mikä parantaa läpinäkyvyyttä, yhteistyötä ja nopeuttaa päätöksentekoa (Ma et al. 2022).

Laatu, ergonomia ja turvallisuus: Digitaaliset kaksoset tukevat monipuolisesti tuotteiden ja tuotannon laatua, esimerkiksi optimoimalla valmistusprosessien parametreja laadukkaampien tuotteiden valmistamiseksi (Liu et al. 2019b). Tuotannossa tarvitaan edelleen operaattoreita joustavien, dynaamisten ja satunnaisten työtehtävien suorittamiseen, jolloin työergonomian suunnittelu korostuu (Leng et al. 2021a). Esimerkiksi ihmisen ja robotin yhteistyössä digitaalinen ihminen operaattorista mittaa ja välittää työntekijän liikkeet HRC:n digitaaliseen kaksoseen ja simuloi työn edistymistä ja fyysistä kuormitusta mahdollistaen operaattorin ergonomian parantamisen (Maruyama et al. 2021). Digitaaliset kaksoset parantavat tuotantoprosessien turvallisuutta tunnistamalla vaaroja, arvioimalla riskejä, optimoimalla turvallisuustoimenpiteitä sekä tarjoamalla koulutusta ja opastusta (Melesse et al. 2021; Soori et al. 2023).

6. DIGITAALISEN KAKSOSEN TULEVAISUUDEN KEHITYSKOHTEET

Digitaalisten kaksosten toteutukseen liittyy erinäköisiä haasteita riippumatta sovelluskohteesta: samoja ongelmia on havaittavissa niin valmistavassa teollisuudessa kuin muillakin sovellusalueilla. Suurimpana ongelmana on riittämätön teknologinen maturiteetti. Digitaalisiin kaksosiin käytettävät teknologiat ovat osittain vielä kehitysvaiheessa ja niiden laajamittainen käyttöönotto teollisuudessa on tällä hetkellä osittain epärealistista, minkä takia digitaalisten kaksosten tarjoamaa täyttä potentiaalia ei pystytä hyödyntämään (Lattanzi et al. 2021).

Digitaaliset kaksoset ovat monimutkaisia järjestelmiä, joiden rakentamiseen tarvitaan monialaista osaamista lähtien tarvittavien mallien mallintamisesta aina reaaliaikaisen synkronoidun tiedonsiirron toteuttamiseen virtuaalisen ja todellisen järjestelmän välillä puhumattakaan erilaisista simulointi- ja optimointimenetelmistä (Modoni et al. 2019). Oman haasteensa tuovat yksilölliset järjestelmät, jolloin digitaalisten kaksosten rakentaminen ja käyttäminen eivät noudata yhtenäisiä sääntöjä (Fuller et al. 2020). Vaikka digitaalisten kaksosten tarvitsemat teknologiat olisivatkin olemassa, näiden integroiminen toimivaksi kokonaisuudeksi on haastavaa (Modoni et al. 2019).

Digitaalisiin kaksosiin liittyvät haasteet ovat osin riippuvaisia digitaalisen kaksosen toteuttamistavasta: onko kyseessä digitaalinen malli, digitaalinen varjo vai todellinen digitaalinen kaksonen. Todellisia digitaalisia kaksosia ei juurikaan vielä ole, minkä takia sovellukset jäävät digitaalisen varjon tasolle, mikä estää todellisen digitaalisen kaksosen potentiaalin hyödyntämisen, kuten automaattisen prosessin optimoinnin ja tämän hyödyntämisen reaaliaikaisesti järjestelmän ohjauksessa (Cimino et al. 2019). Perno et al. (2022) toteavatkin digitaalisten kaksosten olevan hypetetty teknologia, jonka implementoimisessa yritykset kohtaavat merkittäviä haasteita.

Keskeiset tunnistetut haasteet digitaalisten kaksosten hyödyntämiselle valmistavassa teollisuudessa liittyvät standardisointiin, teknologian kypsymättömyyteen, mallinnukseen, datanhallintaan, IT infrastruktuurin vaatimuksiin, kustannuksiin ja osaamiseen sekä osittain myös manuaalisiin työtehtäviin ja niiden esittämiseen digitaalisissa kaksosissa.

Standardisointi: Digitaalisten kaksosten hyödyntämisen haasteena on standardisoinnin puuttuminen, mikä näkyy erityisesti digitaalisen kaksosen määrittelemisessä, sillä eri tahot tulkitsevat sen eri tavoin (Neto et al. 2020), esimerkiksi digitaalisen mallin tai varjon

käsitteinä. Vaikka Kitzignerin et al. (2018) luoma luokittelu malleihin, varjoihin ja todellisiin digitaalisiin kaksosiin on osittain vähentänyt määritelmiin liittyviä väärinkäsityksiä, se ei ole vielä täysin vakiintunut yrityksiin, mikä johtaa sekaannuksiin digitaalisten mallien ja todellisten digitaalisten kaksosten välillä. Määrittelyn ohella digitaalisten kaksosten rakentamiseen ja käyttämiseen ei ole yleisesti käytössä olevaa hyväksyttyä menetelmää (Autiosalo et al. 2021), mikä vaikeuttaa niiden ymmärtämistä ja hyödyntämistä, sillä toteutustavat vaihtelevat toimialoittain ja jopa yritysten sisällä. Eri toteutusmenetelmillä muodostetut digitaaliset kaksoset asettavat omanlaiset haasteensa näiden yhteen toimivuudelle (Ala-Laurinaho et al. 2020), pahimmillaan digitaaliset kaksoset eivät pysty toimimaan samoilla alustoilla eivätkä välttämättä edes kommunikoimaan keskenään mikä hankaloittaen teknologian käyttöä. Tämä koskee erityisesti reaaliaikaiseen ja synkronoituun tiedonsiirtoon käytettävien tiedonsiirtotapojen ja -protokollien standardoimista, koska muutoin yhteydet eri laitteiden välillä muodostetaan vaihtelevilla teknologioilla (Fuller et al. 2020; Lattanzi et al. 2021). Standardisoinnin avulla voitaisiin luoda yleisesti hyväksyttäviä toteutustapoja, mikä helpottaisi digitaalisten kaksosten hyödyntämistä ja mahdollistaisi teknologioiden saumattoman integraation, sekä edistäisi skaalautuvia ja modulaarisia ratkaisuja, joissa eri lähteistä peräisin olevat digitaaliset kaksoset yhdistetään yhdeksi suuremmaksi järjestelmäkokonaisuudeksi (Liu et al. 2022). Skaalautuvuus ja modulaarisuus mahdollistavat DT-järjestelmien sovittamisen erilaisiin koko- ja monimutkaisuusvaatimuksiin (Singh et al. 2018), ja kun digitaalinen kaksonen rakennetaan ohjelmistolohkoista tai järjestelmistä, se tarjoaa joustavuutta, koska rakennetta voidaan muokata tarpeiden mukaan (Ala-Laurinaho et al. 2020).

Teknologian kypsymättömyys: Digitaaliset kaksoset ovat olleet viimeiset kymmenen vuotta aktiivisen jatkuvasti kiihtyvän tutkimuksen kohteena, mutta käytännön toteutukset puuttuvat osittain käytettyjen teknologioiden kypsymättömyyden vuoksi. Osa käytettävistä teknologioista ovat käyttövalmiita, kuten mallintamiseen ja tiedonsiirtoon käytettävät teknologiat, mutta näiden integroiminen keskenään voi olla haastavaa. Analysointiin sekä optimointiin käytettävät teknologiat ovat puolestaan uusia ja osin kehitysasteella (Neto et al. 2020). Esimerkiksi tekoälyn mahdollistama optimointi ja sen sovelluskohteet digitaalisissa kaksosissa vaativat edelleen lisätutkimusta (Fuller et al. 2020). Uusien teknologioiden kypsymättömyys ja olemassa olevien integroitavuus aiheuttavat teknologisia riskejä, mitkä osaltaan laskevat yritysten halukkuutta digitaalisten kaksosten hyödyntämiseen (Gulewicz 2022).

Mallintaminen: Digitaalisten kaksosten mallintaminen monimutkaisista tuotantojärjestelmistä on haastavaa etenkin virtuaalimallien yksityiskohtaisuuden ja realistisuuden näkökulmasta (Tao & Zhang 2017). Täydellisen mallin luominen vaatii runsaasti antureita

ja dataa, mikä voi tehdä digitaalisesta kaksosesta raskaan hallittavaksi ja kalliiksi ylläpitää (Modoni et al. 2019). Mallintamiseen tarvittavien resurssien, ajan ja osaamisen tarve johtaa usein mallinnuksen kompromisseihin, joissa yksinkertaistetut mallit voivat estää digitaalisen kaksosen täyden potentiaalin hyödyntämisen (Perno et al., 2022). Fyysisen ja virtuaalisen järjestelmän väliset erot voivat johtua sekä epätarkkuuksista virtuaalimallissa että fyysisen järjestelmän luonnollisista vaihteluista tai häiriötilanteista, mitkä rajoittavat digitaalisten kaksosten soveltuvuutta etenkin dynaamisissa ympäristöissä (Singh et al., 2018; Onaji et al., 2022). Nykyinen mallinnusteknologia painottuu geometriseen ja fyysiseen mallinnukseen, jolloin monitila- ja aikaskaalamallit, jotka edustavat eri tilatasojen käyttäytymistä, ominaisuuksia ja sääntöjä eri aika- ja tila-asteikoilla, puuttuvat (Qi et al. 2021). Digitaalisten kaksosten mallintamisessa onkin muistettava, että virtuaaliset mallit ovat aina yksinkertaistuksia todellisista järjestelmistä (Prarthana et al. 2021), koska monimutkaisten järjestelmien kaikkia toiminallisuuksia ei pystytä mallintamaan riittävällä yksityiskohtaisuudella.

Datanhallinta: Digitaalisten kaksosten suorituskyky riippuu osaltaan suurten datamäärien siirtämisestä, keräämisestä, käsittelystä ja tallentamisesta niin fyysisestä kuin digitaalisesta järjestelmästä lähes reaaliaikaisesti, mutta kompromissit datan käsittelyssä voivat johtaa tiedon katoamiseen tai virheisiin, jotka heikentävät järjestelmän toimintaa (Prarthana et al. 2021). Tehokas tiedonkulku ja eri tietolähteiden saumaton yhdistäminen ovat ratkaisevan tärkeitä reaaliaikaisen datan hyödyntämisessä, mutta viiveet ja laite- tai ohjelmistohäiriöt voivat vaikuttaa negatiivisesti digitaalisten kaksosten kykyyn toimia optimaalisesti (Bambura et al. 2019). Datan on oltava laadukasta, jäsenneltyä ja jatkuvasti saatavilla (Fuller et al. 2020), ja sen monimuotoisuus (Singh et al. 2018) edellyttää soveltuvien työkalujen, esikäsittelymenetelmien ja algoritmien käyttämistä. Lisäksi eri lähteistä kerättyjen tietojen tallentaminen ja hallinta tuotteen tai järjestelmän elinkaaren ajalta tuo haasteita datan koon ja siirrettävyyden suhteen, sillä tietojen oikeaoppinen reititys ja tallennus ovat kriittisiä digitaalisten kaksosten toiminnan kannalta (Modoni et al. 2019; Onaji et al., 2022). Suuresta datamäärästä onkin löydettävä oleellinen data, mikä on haasteellista (Fuller et al. 2020). Datan hallinnassa tuleekin varata riittävät resurssit suurien datamäärien siirtämiseen, keräämiseen, käsittelyyn ja tallentamiseen reaaliajassa.

IT-infrastruktuurin vaatimukset: Digitaalisten kaksosten tehokas hyödyntäminen edellyttää reaaliaikaista ja synkronoitua tiedonsiirtoa fyysisen ja virtuaalisen järjestelmän välillä, mikä asettaa korkeat vaatimukset laitteistolle, ohjelmistoille ja tiedonsiirtorajapinnoille (Tao & Zhang, 2017). Tietojen reaaliaikainen käsittely, simulointi ja optimointi vaativat suurta laskentatehoa ja täten laitteistojen sekä ohjelmistojen suorituskykyä, mutta

niiden integrointi kustannustehokkaasti on haasteellista riittävän suorituskyvyn takaamiseksi (Fuller et al., 2020). Viestintä- ja yhteensopivuushaasteet ovat huomattavia, koska digitaalisissa kaksosissa yhdistyvät reaaliset ja virtuaaliset järjestelmät eikä näiden yhdistämiseksi ole olemassa yleisesti hyväksyttyjä ja laajasti käytettyjä standardeja (Tao et al. 2019). Haasteeksi on muodostunut erityisesti vanhojen tuotantolaitteiden yhdistäminen uusiin digitaalisten kaksosten edellyttämiin järjestelmiin, mikä vaatii vanhojen ja uusien teknologioiden integrointia keskenään (Rolle et al. 2021). Lisäksi digitaalisten kaksosten kyberfyysisyys altistaa ne fyysisille ja kyberuhille, jolloin kyberturvallisuuden ja lainsäädännön vaatimusten täyttäminen on kriittistä, erityisesti kun siirrettävä data sisältää arkaluonteista tuotanto- ja henkilötietoa (Fuller et al. 2020; Tao et al. 2019).

Kustannukset: Digitaalisen kaksosen investointikustannukset voivat olla huomattavat (Atalay et al. 2021). Digitaalisten kaksosten kehittäminen ja ylläpito vaativat erilaisia resursseja, mitkä puolestaan aiheuttavat kustannuksia. Kuten digitaalisessa mallinnuksessa aina mallien rakentaminen vaatii aikaa, koulutettuja ja osaavia työntekijöitä sekä ohjelmistoja näiden mallintamiseen. Digitaalisten kaksosten edellyttämien mallien automaattiseen luomiseen kehitetään parhaillaan ratkaisuja (Martinez et al. 2018). Digitaalisten kaksosten tapauksessa kustannuksia aiheutuu myös laitteistoista ja ohjelmistoista, joilla toteutetaan reaaliaikainen molemmin suuntainen tiedonsiirto fyysisen ja virtuaalisen järjestelmän välillä. Digitaalisen kaksosen laajamittainen käyttö onnistuu ainoastaan, jos digitaalisesta kaksosesta saatavat hyödyt ylittävät näiden kehittämiseen ja ylläpitämiseen vaadittavat kustannukset. Ennen digitaalisten kaksosten rakentamista on varmistettava rakentamisen taloudelliset edellytykset (Lattanzi et al., 2021). Haasteena on kuitenkin, miten potentiaaliset hyödyt mitataan (Neto et al. 2020) erityisesti, kun kyseessä on vielä melko tuore teknologia, jota ei juurikaan hyödynnetä yrityksissä. Yritysten haastatteluissa korkeat toteutuskustannukset tunnistettiin tärkeimmäksi esteeksi digitaalisen kaksosen toteuttamiselle (Gulewicz 2022).

Osaaminen: Digitaalisten kaksosten onnistunut hyödyntäminen edellyttää organisaation strategista tukea ja kulttuuria, joka kannustaa teknologian omaksumiseen ja vähentää muutosvastarintaa, jota voi aiheuttaa henkilöstön puutteellinen osaaminen (Gulewicz 2022). Nopeat teknologiset muutokset haastavat niin yrityksiä kuin työntekijöitä pysymään kehityksessä mukana. Epäily digitaalisten kaksosten toimivuudesta voi estää sen täysipainoisen hyödyntämisen, kun taas ylenpalttinen luottamus voi johtaa epärealistisiin odotuksiin ja virheellisiin johtopäätöksiin digitaalisten kaksosten hyödyistä ja mahdollisuuksista. Luottamusta digitaalisiin kaksosiin voidaan lisätä demonstraatioiden avulla, jotka näyttävät teknologian hyödyt ja rajoitteet käytännössä (Fuller et al., 2020).

Manuaaliset työtehtävät: Oman haasteensa asettavat tuotantoympäristöt, joissa tuotannon työntekijät ovat vuorovaikutuksessa digitaalisen kaksosen kanssa. Työntekijöiden suorittamaa manuaalista työtä ei voida valvoa tai ennustaa yksityiskohtaisesti, mikä asettaa haasteita digitaalisten järjestelmien mallintamiselle ja suorituskyvyn optimoimiselle, kun tämä osaltaan riippuu työntekijän työpanoksesta (Singh et al. 2018). Esimerkiksi työntekijän tehokkuus voi vaihdella työpäivien välillä, työntekijä voi tehdä ennustamattoman virheen tai unohtaa kirjata oleellisen parametrin tuotannon tietojärjestelmään. Kaikki nämä vaikuttavat digitaalisen vastineen realistisuuteen. Digitaalisten kaksosten toteuttaminen ihmisen ja koneiden, kuten robottien, yhteistyötehtävissä on kuitenkin edelleen haasteellista, koska riittävän yksityiskohtaisia simulaatiomalleja ihmisen toimista ei ole eikä näitä toisaalta voida integroida riittävällä tarkkuudella muuhun tuotantojärjestelmään kokonaisen tuotantojärjestelmän simuloimiseksi (Leng et al. 2021a).

7. YHTEENVETO

Yksinkertaistettuna digitaalinen kaksonen on kopio reaalijärjestelmästä ilman minkäänlaista reaaliaikaista vuorovaikutusta näiden kahden välillä. Tällöin kyseessä on digitaalinen malli, joka on pelkistetty digitaalinen kaksonen. Tästä kehittyneemmässä versiossa eli digitaalisessa varjossa virtuaalinen vastine heijastaa reaalijärjestelmän toiminnan. Monimutkaisimmillaan digitaalinen kaksonen on todellisen järjestelmän ja tämän virtuaalisen vastineen muodostama reaaliaikaiseen kaksisuuntaiseen tiedonsiirtoon perustuva kokonaisuus, joka mahdollistaa todellisen järjestelmän seurannan, analysoinnin ja optimoinnin reaaliaikaisesti virtuaalisessa vastineessa. Nykyisellään tällaiset todelliset digitaaliset kaksoset ovat harvassa, mutta yleistymässä teknologian kehittyessä.

Digitaaliset kaksoset rakentuvat fyysisestä kohteesta, sen toimintaa heijastavasta virtuaalisesta vastineesta ja reaaliaikaisesta tiedonkeruusta. Näiden rakentamiseen hyödynnetään erilaisia teknologioita ja työkaluja: tiedonkeruun IoT-laitteistoista mallien rakentamiseen käytettäviin simulointiohjelmistoihin ja aina digitaalisen kaksosen analysoimiseen ja sen toiminnan tehostamisessa käytettäviin optimointiratkaisuihin, jotka voivat hyödyntää tekoälyä päätöksenteon tukena.

Digitaalisten kaksosten käyttökohteet ovat laajat ja monipuoliset. Valmistavassa teollisuudessa niitä käytetään muun muassa tuotteiden suunnittelusta, tuotantolinjojen optimointiin ja laitteiden kunnossapidon suunnittelemiseen. Digitaalisten kaksosten tärkeimpiä hyötyjä ovatkin operatiivisen toiminnan resurssitehokkuuden optimoiminen ja suorituskyvyn ylläpitäminen kustannustehokkaasti. Kaksoset mahdollistavat prosessien iteratiivisen ja reaaliaikaisen optimoinnin, auttavat havaitsemaan ja ratkaisemaan mahdollisia ongelmia ennen niiden ilmenemistä, tukevat päätöksentekoa ja voivat parantaa toiminnan laatua. Digitaalisten kaksosten riskeinä ovat muun muassa suurten tietomäärien hallitsemisen haasteet, tietoturvariskit ja korkeat alkuinvestointikustannukset. Eri järjestelmien integroiminen voi olla monimutkaisia ja vaativat asiantuntevaa osaamista.

Digitaalisten kaksosten kehittämisen keskiössä ovat muun muassa digitaalisten mallien rakentamisen ja rajapintojen standardoiminen, tekoälyn ja koneoppimisen laajempi hyödyntäminen järjestelmien suorituskyvyn optimoimisessa sekä virtuaalisten mallien automatisoidussa tuottamisessa. Teknologian kehittyessä ja investointikustannusten laskiessa digitaalisten kaksosten käyttö voi laajentua entisestään laajemmin myös valmistavan teollisuuden PK-sektorille, tuoden uusia mahdollisuuksia.

LÄHTEET

Aivaliotis, P., Georgoulias, K., Arkouli, Z., & Makris, S. (2019). Methodology for enabling Digital Twin using advanced physics-based modelling in predictive maintenance. *Procedia CIRP*, *81*, 417–422. https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.072

Ala-Laurinaho, R., Autiosalo, J., Nikander, A., Mattila, J., & Tammi, K. (2020). Data Link for the Creation of Digital Twins. *IEEE Access*, *8*, 228675–228684. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3045856

Angrish, A., Starly, B., Lee, Y.-S., & Cohen, P. H. (2017). A flexible data schema and system architecture for the virtualization of manufacturing machines (VMM). *Journal of Manufacturing Systems*, *45*, 236–247. https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2017.10.003

Atalay, M., Murat, U., Oksuz, B., Parlaktuna, A. M., Pisirir, E., & Testik, M. C. (2022). Digital twins in manufacturing: systematic literature review for physical-digital layer categorization and future research directions. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, *35*(7), 679–705. https://doi.org/10.1080/0951192X.2021.2022762

Autiosalo, J., Siegel, J. & Tammi, K. (2021). Twinbase: Open-Source Server Software for the Digital Twin Web, IEEE access, Vol. 9, pp. 140779–140798, https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3119487

Autiosalo, J., Vepsalainen, J., Viitala, R., & Tammi, K. (2020). A Feature-Based Framework for Structuring Industrial Digital Twins. *IEEE Access*, *8*, 1193–1208. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2950507

Bambura, R., Šolc, M., Dado, M. & Kotek. (2020). Implementation of Digital Twin for Engine Block Manufacturing Processes, Applied Sciences, Vol. 10, pp. 6578, https://doi.org/10.3390/app10186578

Barricelli, B. R., Casiraghi, E., & Fogli, D. (2019). A Survey on Digital Twin: Definitions, Characteristics, Applications, and Design Implications. *IEEE Access*, *7*, 167653–167671. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2953499

Brecher, C., Dalibor, M., Rumpe, B., Schilling, K., & Wortmann, A. (2021). An Ecosystem for Digital Shadows in Manufacturing. *Procedia CIRP*, *104*, 833–838. https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.11.140

Brenner, B., & Hummel, V. (2017). Digital Twin as Enabler for an Innovative Digital Shopfloor Management System in the ESB Logistics Learning Factory at Reutlingen - University. *Procedia Manufacturing*, *9*, 198–205. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.04.039

Cai, Y., Wang, Y., & Burnett, M. (2020). Using augmented reality to build digital twin for reconfigurable additive manufacturing system. *Journal of Manufacturing Systems*, *56*, 598–604. https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.04.005

Cimino, C., Negri, E. & Fumagalli, L. (2019). Review of digital twin applications in manufacturing, Computers in Industry, Vol. 113, pp. 103–130, https://doi.org/10.1016/j.com-pind.2019.103130

Cimino, C., Negri, E., & Fumagalli, L. (2019). Review of digital twin applications in manufacturing. *Computers in Industry*, *113*, 103130-. https://doi.org/10.1016/j.compind.2019.103130

Cohen, Y., Faccio, M., Pilati, F., & Yao, X. (2019). Design and management of digital manufacturing and assembly systems in the Industry 4.0 era. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *105*(9), 3565–3577. https://doi.org/10.1007/s00170-019-04595-0

dos Santos, C. H., Montevechi, J. A. B., de Queiroz, J. A., de Carvalho Miranda, R., & Leal, F. (2022). Decision support in productive processes through DES and ABS in the Digital Twin era: a systematic literature review. *International Journal of Production Research*, *60*(8), 2662–2681. https://doi.org/10.1080/00207543.2021.1898691

Eckhart M. & Ekelhart A. (2018). Towards security-aware virtual environments for digital twins. CPSS - Proc 4th ACM Work Cyber-Physical Syst Secur Co-Located With ASIA CCS 2018 2018:61–72. https://doi.org/10.1145/3198458.3198464.

Fera, M., Greco, A., Caterino, M., Gerbino, S., Caputo, F., Macchiaroli, R., & D'Amato, E. (2019). Towards Digital Twin Implementation for Assessing Production Line Performance and Balancing. *Sensors (Basel, Switzerland)*, *20*(1), 97-. https://doi.org/10.3390/s20010097

Frantzén, M., Bandaru, S., & Ng, A. H. C. (2022). Digital-twin-based decision support of dynamic maintenance task prioritization using simulation-based optimization and genetic programming. Decision Analytics Journal, 3, 100039-. https://doi.org/10.1016/j.dajour.2022.100039

Fuller, A., Fan, Z., Day, C. & Barlow, C. (2020). Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research, IEEE Access, Vol. 8, pp. 108952–108971, https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2998358

Gaikwad, A., Yavari, R., Montazeri, M., Cole, K., Bian, L., & Rao, P. (2020). Toward the digital twin of additive manufacturing: Integrating thermal simulations, sensing, and analytics to detect process faults. *IIE Transactions*, *52*(11), 1204–1217. https://doi.org/10.1080/24725854.2019.1701753

Gao, Y., Lv, H., Hou, Y., Liu, J., & Xu, W. (2019). Real-time Modeling and Simulation Method of Digital Twin Production Line. *2019 IEEE 8th Joint International Information Technology and Artificial Intelligence Conference (ITAIC)*, 1639–1642. https://doi.org/10.1109/ITAIC.2019.8785703

Gebhardt, M., Kopyto, M., Birkel, H., & Hartmann, E. (2022). Industry 4.0 technologies as enablers of collaboration in circular supply chains: a systematic literature review. *International Journal of Production Research*, *60*(23), 6967–6995. https://doi.org/10.1080/00207543.2021.1999521

Glaessgen, E. H., & Stargel, D. S. (2012). The digital twin paradigm for future NASA and U.S. air force vehicles. 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference 2012.

Grieves M. (2014). Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication. White paper. Melbourne, FL: Florida Institute of Technology.

Grieves, M. (2023). Digital Twins: Past, Present, and Future. In *The Digital Twin* (Vol. 1, pp. 97–121). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-21343-4_4

Grieves, M., Vickers, J. (2016). Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. In *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems* (pp. 85–113). Springer International Publishing AG. https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4

Gulewicz, M. (2022). Digital twin technology — awareness, implementation problems and benefits, Engineering Management in Production and Services, Vol. 14, pp. 63–77, https://doi.org/10.2478/emj-2022-0006

Kalaboukas, K., Kiritsis, D., & Arampatzis, G. (2023). Governance framework for autonomous and cognitive digital twins in agile supply chains. *Computers in Industry*, *146*, 103857-. https://doi.org/10.1016/j.compind.2023.103857

Kamble, S. S., Gunasekaran, A., Parekh, H., Mani, V., Belhadi, A., & Sharma, R. (2022). Digital twin for sustainable manufacturing supply chains: Current trends, future perspectives, and an implementation framework. Technological Forecasting & Social Change, 176, 121448-. https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.121448

Ke, C., Pan, X., Wan, P., Huang, Z., & Jiang, Z. (2023). An Intelligent Redesign Method for Used Products Based on Digital Twin. *Sustainability*, *15*(12), 9702-. https://doi.org/10.3390/su15129702

Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J., & Sihn, W. (2018). Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *IFAC-PapersOnLine*, *51*(11), 1016–1022. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474

Kumbhar, M., Ng, A. H. C., & Bandaru, S. (2023). A digital twin based framework for detection, diagnosis, and improvement of throughput bottlenecks. Journal of Manufacturing Systems, 66, 92–106. https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.11.016

Kurniadi, K. A., Lee, S. & Ryu, K. (2018). Digital Twin Approach for Solving Reconfiguration Planning Problems in RMS. In *Advances in Production Management Systems. Smart Manufacturing for Industry 4. 0* (Vol. 536, pp. 327–334). Springer International Publishing AG. https://doi.org/10.1007/978-3-319-99707-0_41

Lattanzi, L., Raffaeli, R., Peruzzini, M. & Pellicciari, M. (2021). Digital twin for smart manufacturing: a review of concepts towards a practical industrial implementation, International journal of computer integrated manufacturing, Vol. 34, pp. 567–597, https://doi.org/10.1080/0951192X.2021.1911003

Leng, J., Ruan, G., Song, Y., Liu, Q., Fu, Y., Ding, K., & Chen, X. (2021b). A loosely-coupled deep reinforcement learning approach for order acceptance decision of mass-individualized printed circuit board manufacturing in industry 4.0. *Journal of Cleaner Production*, *280*, 124405-. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124405

Leng, J., Wang, D., Shen, W., Li, X., Liu, Q., & Chen, X. (2021a). Digital twins-based smart manufacturing system design in Industry 4.0: A review. *Journal of Manufacturing Systems*, *60*, 119–137. https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.05.011

Li, L., Li, H., Gu, F., Ding, N., Gu, X. & Luo G. (2019). Multidisciplinary collaborative design modeling technologies for complex mechnical products based on digital twin. Comput Integr Manuf Syst, 25(6), 1307–19. https://doi.org/10.13196/j.cims.2019.06.001

Liang, X., Xiao, R., & Zhang, J. (2022). A Review on Digital Twin for Robotics in Smart Manufacturing. *2022 IEEE 17th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, 1510–1515. https://doi.org/10.1109/ICIEA54703.2022.10006119

Liu, J., Zhou, H., Liu, X., Tian, G., Wu, M., Cao, L., & Wang, W. (2019b). Dynamic Evaluation Method of Machining Process Planning Based on Digital Twin. *IEEE Access*, *7*, 19312–19323. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2893309

Liu, M., Fang, S., Dong, H., & Xu, C. (2021). Review of digital twin about concepts, technologies, and industrial applications. *Journal of Manufacturing Systems*, *58*, 346–361. https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.06.017

Liu, Q., Zhang, H., Leng, J., & Chen, X. (2019a). Digital twin-driven rapid individualised designing of automated flow-shop manufacturing system. *International Journal of Production Research*, *57*(12), 3903–3919. https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1471243

Liu, Y.K., Ong, S.K. & Nee, A.Y.C. (2022). State-of-the-art survey on digital twin implementations, Advances in manufacturing, Vol. 10, pp. 1–23, https://doi.org/10.1007/s40436-021-00375-w

Lo, C. K., Chen, C. H., & Zhong, R. Y. (2021). A review of digital twin in product design and development. *Advanced Engineering Informatics*, *48*, 101297-. https://doi.org/10.1016/j.aei.2021.101297

Lutters, E. (2018). Pilot production environments driven by digital twins. South African J Ind Eng 2018;29:40–53. https://doi.org/10.7166/29-3-2047

Magnanini, M. C., Melnychuk, O., Yemane, A., Strandberg, H., Ricondo, I., Borzi, G., & Colledani, M. (2021). A Digital Twin-based approach for multi-objective optimization of short-term production planning. *IFAC-PapersOnLine*, *54*(1), 140–145. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.08.077

Malik, A. A., & Brem, A. (2021). Digital twins for collaborative robots: A case study in human-robot interaction. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, *68*, 102092-. https://doi.org/10.1016/j.rcim.2020.102092

Martinez, G. S., Sierla, S., Karhela, T., & Vyatkin, V. (2018). Automatic Generation of a Simulation-Based Digital Twin of an Industrial Process Plant. *IECON 2018 - 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 3084–3089. https://doi.org/10.1109/IECON.2018.8591464

Maruyama, T., Ueshiba, T., Tada, M., Toda, H., Endo, Y., Domae, Y., Nakabo, Y., Mori, T., & Suita, K. (2021). Digital Twin-Driven Human Robot Collaboration Using a Digital Human. *Sensors*, *21*(24), 8266. https://doi.org/10.3390/s21248266

Modoni, G.E., Caldarola, E.G., Sacco, M. & Terkaj, W. (2019). Synchronizing physical and digital factory: benefits and technical challenges, Procedia CIRP, Vol. 79, pp. 472–477, https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.02.125

Mukherjee, T., & DebRoy, T. (2019). A digital twin for rapid qualification of 3D printed metallic components. *Applied Materials Today*, *14*, 59–65. https://doi.org/10.1016/j.apmt.2018.11.003

Mügge, J., Seegrün, A., Hoyer, T. K., Riedelsheimer, T., & Lindow, K. (2024). Digital Twins within the Circular Economy: Literature Review and Concept Presentation. *Sustainability*, *16*(7), 2748-. https://doi.org/10.3390/su16072748

Neto, A.A., Deschamps, F., da Silva, E.R. & de Lima, E.P. (2020). Digital twins in manufacturing: an assessment of drivers, enablers and barriers to implementation, Procedia CIRP, pp. 210–215, https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.04.131

Novák, P., Vyskočil, J. & Wally, B. (2020). The Digital Twin as a Core component for Industry 4.0 Smart Production Planning, IFAC-PapersOnLine, 21st IFAC World Congress, Vol. 53, pp. 10803–10809, https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.2865

Okita T., Kawabata T., Murayama H., Nishino N. & Aichi M. (2019). A new concept of digital twin of artifact systems: synthesizing monitoring/inspections, physical/numerical models, and social system models. Procedia Cirp 79:667–72. https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.02.048.

Onaji, I., Tiwari, D., Soulatiantork, P., Song, B., & Tiwari, A. (2022). Digital twin in manufacturing: conceptual framework and case studies. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, *35*(8), 831–858. https://doi.org/10.1080/0951192X.2022.2027014

Pérez, L., Rodríguez-Jiménez, S., Rodríguez, N., Usamentiaga, R., & García, D. F. (2020). Digital Twin and Virtual Reality Based Methodology for Multi-Robot Manufacturing Cell Commissioning. *Applied Sciences*, *10*(10), 3633-. https://doi.org/10.3390/app10103633

Perno, M., Hvam, L. & Haug, A. (2022). Implementation of digital twins in the process industry: A systematic literature review of enablers and barriers, Computers in Industry, Vol. 134, pp. 103558, https://doi.org/10.1016/j.compind.2021.103558

Pires, F., Cachada, A., Barbosa, J., Moreira, A. P., & Leitao, P. (2019). Digital Twin in Industry 4.0: Technologies, Applications and Challenges. *2019 IEEE 17th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, *1*, 721–726. https://doi.org/10.1109/INDIN41052.2019.8972134

Prarthana, V., Lavanya, P., Namana, J., Nagaditya, L.P., Nagavishnu, H. & Bhargavi, K. (2021). Digital Twin Technology: A Bird Eye View, in: 2021 Third International Conference on Inventive Research in Computing Applications (ICIRCA), Presented at the 2021 Third International Conference on Inventive Research in Computing Applications (ICIRCA), pp. 1069–1075, https://doi.org/10.1109/ICIRCA51532.2021.9545020

Preut, A., Kopka, J. P., & Clausen, U. (2021). Digital twins for the circular economy. *Sustainability*, *13*(18), 10467-. https://doi.org/10.3390/su131810467

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

Qi, Q., Tao, F., Hu, T., Anwer, N., Liu, A., Wei, Y., Wang, L., & Nee, A. Y. C. (2021). Enabling technologies and tools for digital twin. *Journal of Manufacturing Systems*, *58*, 3–21. https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2019.10.001

Rasheed, A., San, O. & Kvamsdal, T. (2020). Digital Twin: Values, Challenges and Enablers From a Modeling Perspective, IEEE Access, Vol. 8, pp. 21980–22012, https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2970143

Reinhardt, H., Weber, M., & Putz, M. (2019). A Survey on Automatic Model Generation for Material Flow Simulation in Discrete Manufacturing. *Procedia CIRP*, *81*, 121–126. https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.022

Rolle, R.P., Martucci, V. de O. & Godoy, E.P. (2021). Modular Framework for Digital Twins: Development and Performance Analysis, Journal of control, automation & electrical systems, Vol. 32, pp. 1485–1497, https://doi.org/10.1007/s40313-021-00830-w

Singh, G., Singh, S., Daultani, Y., & Chouhan, M. (2023). Measuring the influence of digital twins on the sustainability of manufacturing supply chain: A mediating role of supply chain resilience and performance. Computers & Industrial Engineering, 186, 109711-. https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109711

Singh, M., Srivastava, R., Fuenmayor, E., Kuts, V., Qiao, Y., Murray, N. & Devine, D. (2022). Applications of Digital Twin across Industries: A Review. *Applied Sciences*. 2022; 12(11):5727. https://doi.org/10.3390/app12115727

Singh, S., Shehab, E., Higgins, N., Fowler, K., Tomiyama, T., & Fowler, C. (2018). Challenges of Digital Twin in High Value Manufacturing. *SAE Technical Paper Series*, *2018*-. https://doi.org/10.4271/2018-01-1928

Soori, M., Arezoo, B., & Dastres, R. (2023). Digital twin for smart manufacturing, A review. *Sustainable Manufacturing and Service Economics*, *2*, 100017-. https://doi.org/10.1016/j.smse.2023.100017

Tao, F., & Zhang, M. (2017). Digital Twin Shop-Floor: A New Shop-Floor Paradigm Towards Smart Manufacturing. *IEEE Access*, *5*, 20418–20427. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2756069

Tao, F., Cheng, J., Qi, Q., Zhang, M., Zhang, H., & Sui, F. (2018). Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *94*(9–12), 3563–3576. https://doi.org/10.1007/s00170-017-0233-1

Tao, F., Sui, F., Liu, A., Qi, Q., Zhang, M., Song, B., Guo, Z., Lu, S. C.-Y., & Nee, A. Y. C. (2019). Digital twin-driven product design framework. *International Journal of Production Research*, *57*(12), 3935–3953. https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1443229

Tao, F., Xiao, B., Qi, Q., Cheng, J., & Ji, P. (2022). Digital twin modeling. *Journal of Manufacturing Systems*, *64*, 372–389. https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.06.015

Tao, F., Zhang, M., Cheng, J., & Qi, Q. (2017). Digital twin workshop: a new paradigm for future workshop. *Jisuanji Jicheng Zhizao Xitong/Computer Integrated Manufacturing Systems, CIMS*, *23*(1), 1–9. https://doi.org/10.13196/j.cims.2017.01.001

Thelen, A., Zhang, X., Fink, O., Lu, Y., Ghosh, S., Youn, B. D., Todd, M. D., Mahadevan, S., Hu, C., & Hu, Z. (2022). A comprehensive review of digital twin — part 1: modeling and twinning enabling technologies. Structural and Multidisciplinary Optimization, 65(12). https://doi.org/10.1007/s00158-022-03425-4

Ugarte Querejeta, M., Illarramendi Rezabal, M., Unamuno, G., Bellanco, J. L., Ugalde, E., & Valor Valor, A. (2022). Implementation of a holistic digital twin solution for design prototyping and virtual commissioning. *IET Collaborative Intelligent Manufacturing*, *4*(4), 326–335. https://doi.org/10.1049/cim2.12058

Vijayakumar, K., Dhanasekaran, C., Pugazhenthi, R., & Sivaganesan, S. (2019). Digital twin for factory system simulation. *International Journal of Recent Technology and Engineering*, *8*(1), 63–68.

Villalonga, A., Negri, E., Biscardo, G., Castano, F., Haber, R. E., Fumagalli, L., & Macchi, M. (2021). A decision-making framework for dynamic scheduling of cyber-physical production systems based on digital twins. *Annual Reviews in Control*, *51*, 357–373. https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2021.04.008

Wang, G., Zhang, G., Guo, X., & Zhang, Y. (2021). Digital twin-driven service model and optimal allocation of manufacturing resources in shared manufacturing. Journal of Manufacturing Systems, 59, 165–179. https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.02.008

Xiang, F., Zhang, Z., Zuo, Y., & Tao, F. (2019). Digital Twin Driven Green Material Optimal-Selection towards Sustainable Manufacturing. *Procedia CIRP*, *81*, 1290–1294. https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.04.015

Yaqoob, I., Salah, K., Uddin, M., Jayaraman, R., Omar, M., & Imran, M. (2020). Blockchain for Digital Twins: Recent Advances and Future Research Challenges. *IEEE Network*, *34*(5), 290–298. https://doi.org/10.1109/MNET.001.1900661

Zhang, C., Zhou, Q., Li, Y., Hua, L., & Xu, H. (2021). The Digital Twin Modelling of the Electrified Vehicle Based on A Hybrid Terminating Control of Particle Swarm Optimization. *IFAC-PapersOnLine*, *54*(10), 552–557. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.10.220

Zhang, H., Liu, Q., Chen, X., Zhang, D., & Leng, J. (2017). A Digital Twin-Based Approach for Designing and Multi-Objective Optimization of Hollow Glass Production Line. *IEEE Access*, *5*, 26901–26911. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2766453

Zhang, P., Feng, H., Yang, T., Zhao, B., Sun, J. & Tan R. (2019). Innovative design process model of TRIZ and digital twin integration iterative evolution based on parameter deduction. Comput Integr Manuf Syst, 25(6), 1361–70. https://doi.org/10.13196/j.cims.2019.06.005

Zhao, H., Liu, J., Xiong, H., Zhuang, C., Miao, T. & Liu, J. (2019). 3D visualization real-time monitoring method for digital twin workshop. Comput Integr Manuf Syst, 25 (6), 1432–43. https://doi.org/10.13196/j.cims.2019.06.011

Zhuang, C., Liu, J., & Xiong, H. (2018). Digital twin-based smart production management and control framework for the complex product assembly shop-floor. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *96*(1–4), 1149–1163. https://doi.org/10.1007/s00170-018-1617-6