



**Vaasan yliopisto**  
UNIVERSITY OF VAASA

Matias Mäkelä

# **Digitaalinen kaksonen Teollisuus 4.0:ssa**

Mahdollisuudet, haasteet ja sovelluskohteet

Tekniikan ja innovaatiojohtamisen  
akateeminen yksikkö  
Kandidaatintutkielma  
Tuotantotalous

Vaasa 2026

---

**VAASAN YLIOPISTO****Tekniikan ja innovaatiojohtamisen akateeminen yksikkö**

<b>Tekijä:</b>	Matias Mäkelä		
<b>Tutkielman nimi:</b>	Digitaalinen kaksonen Teollisuus 4.0:ssa: Mahdollisuudet, haasteet ja sovelluskohteet		
<b>Tutkinto:</b>	Tekniikan kandidaatti		
<b>Koulutusohjelma:</b>	Energia- ja informaatiotekniikan koulutusohjelma		
<b>Opintosuunta:</b>	Tuotantotalous		
<b>Työn ohjaaja:</b>	Tauno Kekäle		
<b>Valmistumisvuosi:</b>	2026	<b>Sivumäärä:</b>	31

---

**TIIVISTELMÄ:**

Tutkielma tarkastelee digitaalisten kaksosten (Digital Twin) teknologiaa ja sen soveltamista neljännessä teollisessa vallankumouksessa (Teollisuus 4.0). Lähtökohtana on, että perinteinen eristetty automaatio, siiloutunut data ja staattiset kunnossapitomallit kaventavat nykyaikaisen valmistavan teollisuuden tuottavuutta, kestävyyttä ja kykyä ennakoida laitevikoja. Tavoitteena on jäsentää digitaalisia kaksosia tukevat keskeiset mahdollistavat teknologiat, niiden sovelluskohteet tehdasympäristöissä sekä arvioida teknologian teollisen käyttöönoton mahdollisuuksia ja haasteita. Tutkimus toteutetaan kirjallisuuskatsauksena.

---

**AVAINSANAT:** teollisuus 4.0, digitaalinen kaksonen, älykäs valmistus, kyberfysiset järjestelmät

## Sisällys

1	Johdanto	5
2	Teollisuus 4.0	6
2.1	Neljäs teollinen vallankumous	6
2.2	Esineiden internet (IoT)	7
2.3	Pilvipalvelut ja reunapalvelut	9
2.4	Big Data ja data-analytiikka	11
3	Digitaalinen kaksosen	13
3.1	Digitaalisen kaksosen perusteet	13
3.2	Digitaalisen kaksosen sovellukset	13
3.3	Digitaalisen kaksosen käyttöönotto	15
4	Digitaalisen kaksosen soveltaminen Teollisuus 4.0:ssa	17
5	Digitaalisen kaksosen haasteet ja mahdollisuudet Teollisuus 4.0:ssa	20
5.1	Mahdollisuudet	20
5.2	Haasteet	22
6	Yhteenveto ja johtopäätökset	24
6.1	Yhteenveto	24
6.2	Johtopäätökset ja kriittiset pohdinnat	26
6.2.1	Ihmistekijä ja sosiologinen muutos	26
6.2.2	IT- ja OT-riskien lähentyminen	26
6.2.3	Valmistusliiketoimintamallien kehitys	26
	Lähteet	28

## Lyhenteet

AI - tekoäly (Artificial Intelligence)

CAD - tietokoneavusteinen suunnittelu (Computer-Aided Design)

CNC - tarkkuuskoneistus (Computer Numerical Control)

CPS - kyberfyysinen järjestelmä (Cyber-Physical System)

DT - digitaalinen kaksonen (Digital Twin)

ESG - ympäristö-, sosiaali- ja hallintotapataivoitteet (Environmental, Social, and Governance)

IaaS - infrastruktuuri palveluna (Infrastructure as a Service)

IIoT - teollinen esineiden internet (Industrial Internet of Things)

IoT - esineiden internet (Internet of Things)

IT - tietotekniikka (Information Technology)

M2M - koneiden välinen viestintä (Machine-to-Machine)

MaaS - kone palveluna (Machine-as-a-Service)

ML - koneoppiminen (Machine Learning)

MQTT - Message Queuing Telemetry Transport

OEM - laitevalmistajat (Original Equipment Manufacturer)

OPC UA - OPC Unified Architecture

OT - operatiivinen teknologia (Operational Technology)

PaaS - alusta palveluna (Platform as a Service)

Pk-yritykset - pienet ja keskisuuret yritykset

PLC - ohjelmoitava logiikkaohjain (Programmable Logic Controller)

PLM - tuotteen elinkaaren hallinta (Product Lifecycle Management)

ROI - tuottoprosentti (Return on Investment)

RUL - jäljellä oleva käyttöikä (Remaining Useful Life)

# 1 Johdanto

Globaali valmistusmarkkina käy parhaillaan läpi nopeaa muutosta, jota ajaa edistyneiden laskennallisten kykyjen ja fyysisten tuotantoprosessien nopea lähentyminen. Tämä ajatusmallin muutos, joka tunnetaan laajalti neljäntenä teollisena vallankumouksena tai Teollisuus 4.0:na, voidaan katsoa merkitsevän siirtymistä perinteisestä, eristetyistä automaatiosta kohti erittäin yhteenliitettyjä, älykkäitä ja autonomisia kyberfyysisiä järjestelmiä (Xu et al., 2018). Tämän digitaalisen siirtymän eturintamassa on digitaalisen kaksosen käsite. Digitaalinen kaksonen on dynaaminen, tarkka virtuaalinen kopio, joka peilaa fyysisen omaisuuden tai järjestelmän tilaa, käyttäytymistä ja elinkaarta reaaliajassa (Tao et al., 2018). Hyödyntämällä jatkuvia tietovirtoja digitaaliset kaksoset antavat organisaatioille mahdollisuuden ylittää perinteiset toiminnalliset rajoitukset, mahdollistaen ennakoivan ennakkoinnin ja ohjaavan optimoinnin. Tässä tutkielmassa tarkastellaan digitaalisen kaksosen arkkitehtuurin mahdollistavia perustavanlaatuisia teknologisia pilareita, tarkastellaan sen sovelluksia valmistussektorilla ja arvioidaan kriittisesti merkittäviä teknisiä, taloudellisia ja organisatorisia haasteita, jotka on ratkaistava sen täyden potentiaalin saavuttamiseksi.

Tämän tutkielman tavoitteena on selvittää digitaalisen kaksosen roolia osana älykästä valmistusta. Tutkimusongelmaa lähestytään seuraavien tutkimuskysymysten kautta:

Mitkä ovat digitaalisen kaksosen arkkitehtuurin keskeiset teknologiset edellytykset Teollisuus 4.0 -viitekehyksessä?

Miten digitaalista kaksosta sovelletaan valmistavassa teollisuudessa tuotteen elinkaaren eri vaiheissa?

Mitkä ovat merkittävimmät tekniset ja taloudelliset haasteet sekä mahdollisuudet digitaalisen kaksosen laajamittaiselle teolliselle käyttöönotolle?

## 2 Teollisuus 4.0

### 2.1 Neljäs teollinen vallankumous

Tässä luvussa tarkastellaan Teollisuus 4.0:n kehitystä, jotta digitaalisen kaksosen rooli laajemmassa viitekehyksessä selkeytyy. Neljäs teollinen vallankumous, jota kutsutaan laajalti nimellä Industry 4.0 tai Teollisuus 4.0, edustaa syvällistä ajatusmallin muutosta modernissa valmistuksessa ja tuotannossa. Sen perustana on fyysisen ja digitaalisen maailman yhdistyminen kyberfysikaalisten järjestelmien käyttöönoton kautta (Lasi et al., 2014). Teollisuus 4.0 -ympäristössä fyysiset koneet, tuotantolaitokset ja logistiset verkostot ovat syvästi integroitua edistyneisiin laskennallisiin verkkoihin, mikä mahdollistaa niiden kommunikoinnin, datan analysoinnin ja itsenäisten päätösten tekemisen reaaliajassa ilman ihmisen puuttumista asiaan (Xu et al., 2018).

Jotta Teollisuus 4.0:n laajuus voidaan täysin ymmärtää, on tärkeää asettaa se kontekstiin kolmen edellisen teollisen vallankumouksen taustaa vasten. Ensimmäinen teollinen vallankumous (1700-luvun loppu) muutti yhteiskunnan maatalousyhteiskunnasta teolliseksi ottamalla käyttöön vesi- ja höyrykäyttöiset mekaaniset tuotantolaitokset. Toinen teollinen vallankumous (1900-luvun alku) esitteli sähkövoimalla ja liukuhihnamenetelmillä toimivia massatuotantotekniikoita. Kolmas teollinen vallankumous (1900-luvun loppu) toi mukanaan ensimmäisen automaatioaallon varhaisen elektroniikan, ohjelmoitavien logiikkaohjainten (PLC) ja perustietotekniikan (IT) käyttöönoton myötä.

Vaikka kolmas teollinen vallankumous toi tietokoneet tehtaiden lattialle, nämä järjestelmät olivat suurelta osin erillisiä ja vaativat jatkuvaa ihmisen valvontaa. Teollisuus 4.0 eroaa dramaattisesti, koska se siirtyy pelkästä digitalisaatiosta ja erillisistä automatisaatioista yhteenliitetyn autonomian alueelle (Xu et al., 2018). Teollisuus 4.0:n koneet eivät ainoastaan suorita ennalta ohjelmoituja tehtäviä; ne hyödyntävät jatkuvaa tietovirtaa sopeutuakseen uusiin muuttujiin, optimoidakseen tuotantosekvenssejä itse

ja ennakoidakseen mekaanisia vikoja, mikä luo erittäin joustavan ja älykkään valmistusekosysteemin.

## **2.2 Esineiden internet (IoT)**

Esineiden internet (IoT) edustaa perustavanlaatuaista teknologista paradigmat, jossa internet-yhteydet ulottuvat paljon perinteisten laskennallisten laitteiden, kuten kannettavien tietokoneiden ja älypuhelimien, ulkopuolelle kattaen laajan joukon arkipäivän fyysisiä esineitä. Ytimessään IoT on kaikkialla läsnä olevan laskennan käsitteellistäminen, jossa fyysiset esineet on upotettu mikrokontrollereihin, antureihin, toimilaitteisiin ja verkkolähetin-vastaanottimiin (Atzori et al., 2010). Tämä integrointi muuttaa passiiviset esineet "älykkäiksi" yksiköiksi, jotka kykenevät havaitsemaan ympäristönsä, keräämään tietoa ja välittämään tätä tietoa globaalien verkkojen kautta ilman ihmisen välistä tai ihmisen ja tietokoneen välistä vuorovaikutusta. IoT:n perusarkkitehtuuri koostuu yleensä kolmesta kerroksesta: havaintokerroksesta (anturit keräävät tietoa), verkkokerroksesta (tiedon lähettäminen Wi-Fi-, Bluetooth- tai matkapuhelinverkkojen kautta) ja sovelluskerroksesta (jossa tiedot käsitellään ja toimitetaan loppukäyttäjälle) (Gubbi et al., 2013).

Vaikka IoT on uudenlainen teknologia, sen yleisimmät iteraatiot löytyvät kuluttajakohtaisista ja kunnallisista sovelluksista. Kuluttajaympäristöissä IoT on älykotiekosysteemien, puettavien terveysmonitorien ja verkkoon kytkettyjen laitteiden liikkeellepaneva voima. Laajemmalla julkisella sektorilla se tukee "älykaupunkien" infrastruktuuria älykkään liikenteenhallinnan, ympäristön seurannan ja verkkoon kytkettyjen julkisten palvelujen kautta (Atzori et al., 2010). Näissä yhteyksissä IoT:n arkkitehtuuri on erittäin optimoitu massaskaalautuvuutta, alhaisia tuotantokustannuksia ja käyttömukavuutta ajatellen. Koska nämä verkot on kuitenkin ensisijaisesti suunniteltu laajaan tiedonkeruuseen eikä kriittisiin ohjausjärjestelmiin, yleiset IoT-verkot sietävät usein kohtuullista dataviivettä, kuluttajataso standarddeja suojausprotokollia ja satunnaisia yhteyshäiriöitä aiheuttamatta katastrofaalisia vikoja (Gubbi et al., 2013).

Jotta voidaan vastata nykyaikaisen valmistuksen tiukkoihin ja merkittäviin vaatimuksiin, esineiden internetin peruseriaatteita on päivitettävä merkittävästi, mikä johtaa teolliseen esineiden internetiin (IIoT). IIoT on erikoistunut ja erittäin vankka osa laajempaa IoT-ekosysteemiä, joka on suunniteltu erityisesti teollisiin sovelluksiin, kuten tuotantolaitoksiin, energiaverkkoihin ja monimutkaiseen toimitusketjujen logistiikkaan. Toisin kuin kuluttajatasoisen esineiden internet, joka asettaa etusijalle laajan kätevyyden, IIoT:tä säätelevät tiukasti koneiden välisen (M2M) viestinnän, deterministisen verkottumisen, erittäin pienen viiveen ja kriittisen luotettavuuden tarpeet (Sisinni et al., 2018). Fyysiset ympäristöt, joissa IIoT toimii, ovat luonnostaan ankaria. Siksi IIoT-laitteiston on oltava kestävä kestävään äärimmäisiä lämpötilanvaihteluita, voimakkaita mekaanisia värinöitä, syövyttäviä kemikaaleja ja korkeita sähkömagneettisia häiriöitä, jotka tuhoaisivat välittömästi tavalliset IoT-anturit (Boyes et al., 2018).

IIoT:n toiminnalliset vaatimukset myös poikkeavat jyrkästi yleisestä esineiden internetistä tietoturvan ja siirtonopeuden suhteen. Älykkäässä tehtaassa millisekuntien viive toimintahäiriöisen robottikäsivarren sammutussignaalin lähettämisessä voi johtaa vakaviin laitevaurioihin tai henkilövahinkoihin. Tämän seurauksena teollinen esineiden internet (IIoT) hyödyntää erikoistuneita teollisia viestintäprotokollia, kuten OPC Unified Architecture (OPC UA) ja Message Queuing Telemetry Transport (MQTT), jotka takaavat välittömän ja luotettavan tiedonsiirron (Sisinni et al., 2018). Turvallisuus on yhtä tärkeää; koska IIoT -verkot ohjaavat fyysisiä koneita, kyberhyökkäys voi johtaa todelliseen fyysiseen tuhoon. Tämä korostaa tarvetta integroiduille kyberturvallisuusratkaisuille, sillä digitaalisten kaksosten yhdistäessä IT- ja OT-ympäristöt riskien vaikutukset ulottuvat digitaalisen järjestelmän ulkopuolelle fyysisiin prosesseihin (Tao et al., 2019). Siksi IIoT -arkkitehtuurit vaativat yritystason kyberturvallisuustoimenpiteitä, mukaan lukien syvä verkon segmentointi ja edistyneet kryptografiset protokollat.

Neljännän teollisen vallankumouksen yhteydessä teollinen esineiden internet toimii älykkään tehtaan välttämättömänä sensorihermostona. Teollisuus 4.0 perustuu täysin

jatkuvaan, kaksisuuntaiseen korkealaatuisen tiedon virtaukseen fyysisen tehdastilan ja digitaalisten analytiikka-alustojen välillä. Upottamalla nämä kestävä ja erittäin turvalliset anturit suoraan sekä vanhoihin fyysisiin koneisiin että nykyaikaisiin robottijärjestelmiin, teollinen esineiden internet yhdistävät kuilua fyysisen tuotannon ja digitaalisen älykkyyden välillä (Boyes et al., 2018). Se tallentaa pienimmätkin vaihtelut toiminnallisissa mittareissa, kuten moottorin laakerin heikkenemisen akustisen signaalin tai kemiallisen reaktorin lämpödynamiikan, ja lähettää nämä tiedot analyttisille laitteille. Juuri tämä IIoT:n tuottama keskeytymätön ja erittäin luotettava tietovirta mahdollistaa lopulta ennakoivan kunnossapidon, toimitusketjun läpinäkyvyyden ja autonomisen hajautetun päätöksenteon, jotka määrittelevät Teollisuus 4.0 -ajatusmallin.

### **2.3 Pilvipalvelut ja reunapalvelut**

Neljännän teollisen vallankumouksen toteutuminen riippuu kyvystä hallita, tallentaa ja käsitellä teollisen internetin (IIoT) verkkojen tuottamaa jatkuvaa datamäärää. Perinteiset, paikalliset palvelimet eivät lainkaan riitä käsittelemään tätä tietomäärää. Tämän seurauksena moderni älykäs valmistus on vahvasti riippuvainen erittäin kehittyneistä, hajautetuista teknologisista arkkitehtuureista. Tässä kohtaa pilvipalvelujen ja reunapalveluiden toisiaan täydentävät viitekehykset ovat elintärkeitä, ja ne luovat niin sanotun pilvi-reunapalvelu-arkkitehtuurin (Qiu et al., 2020).

Pilvipalvelut tarjoavat keskitetyn, erittäin skaalautuvan ja etäkäyttöisen tietotekniikkainfrastruktuurin (IT). Teollisuusympäristössä pilvipalvelut toimivat makrotason operatiivisena keskuksena. Ne toimivat massiivisena tietojärvenä, joka tarjoaa käytännössä rajattoman tallennuskapasiteetin vuosien historiallisten tuotantotietojen, toimitusketjun mittareiden ja globaalien yritystietojen tallentamiseen. On myös huomioitava, että pilvipalvelut tarjoavat valtavan laskentatehon, jota tarvitaan monimutkaisten ja resursseja vaativien tehtävien suorittamiseen. Näitä ovat pitkän aikavälin toimitusketjusimulaatioiden suorittaminen, datan yhdistäminen useiden maantieteellisesti hajautettujen tuotantolaitosten välillä ja kehittyneiden tekoälymallien (AI) kouluttaminen (Qiu et al., 2020; Xu et al., 2018). Koska pilviresurssit ovat erittäin

joustavia, valmistajat voivat hyödyntää infrastruktuuria palveluna (IaaS) ja alustaa palveluna (PaaS) -malleja skaalatakseen laskentakapasiteettiaan tarpeen mukaan, välttämällä massiivisten paikallisten palvelintilojen ylläpitoon liittyvät kohtuuttomat pääomakulut.

Vaikka pilvilaskenta tarjoaa etuja, se aiheuttaa myös haavoittuvuuksia, kuten viivettä tiedonsiirrossa. Valtavien määrien jatkuvan tehdasdatan siirtäminen fyysisistä antureista etäpilvipalvelimille – ja laskennallisen vastauksen odottaminen – aiheuttaa luonnostaan viiveitä tiedonsiirrossa. Dynaamisessa valmistusympäristössä sekunnin murto-osa voi sanella eron onnistuneen automaattisen säädön ja katastrofaalisen koneen törmäyksen tai turvallisuusriskin välillä. Lisäksi jokaisen yksittäisen datapisteen siirtäminen pilveen kuluttaa valtavasti verkon kaistanleveyttä ja altistaa erittäin arkaluonteiset operatiiviset tiedot laajemmille kyberturvallisuusriskeille (Qiu et al., 2020).

Reunalaskentaa käytetään ratkaisemaan näitä kriittisiä pullonkauloja. Hajauttamalla IT-arkkitehtuurin reunalaskenta siirtää tiedonkäsittelyominaisuudet paikallisesti verkon "reunalle", fyysisesti dataa tuottavien IIoT-antureiden ja automaattisten ohjelmoitavien logiikkaohjainten (PLC) viereen (Qiu et al., 2020). Sen sijaan, että raakadata lähetettäisiin etäpalvelimelle, reunayhdyskäytävät analysoivat tiedot suoraan tehtaan lattialla. Tämä mahdollistaa erittäin pienen viiveen, jota tarvitaan deterministiseen, reaaliaikaiseen autonomiseen päätöksentekoon. Esimerkiksi jos anturi havaitsee äkillisen painepiikin, joka ylittää turvallisuuskynnykset, reunatietokone voi automaattisesti aktivoida hätäpysäytyksen millisekunneissa, reaktioaikaa, jota ei voida saavuttaa pilvipalvelun avulla. Lopulta nämä kaksi teknologiaa toimivat symbioottisesti: reunalaskenta käsittelee taktisia, aikaherkkiä ja paikallisia ohjaussilmukoita, samalla kun se suodattaa ja välittää vain olennaisimman, kootun datan pilveen strategista, pitkän aikavälin ja yritysten välistä analytiikkaa varten.

## 2.4 Big Data ja data-analytiikka

IIoT-antureiden käyttöönotto ja vankkojen pilvipohjaisten arkkitehtuurien luominen luovat vain infrastruktuurin perustan Teollisuus 4.0:lle. Viimeinen ja luultavasti tärkein komponentti älykkään tehtaan aktivoimiseksi on toiminnassa olevan arvon erottaminen kerätystä tiedosta. Tätä monimutkaista prosessia hallitaan integroimalla Big Data -menetelmiä ja edistynyttä data-analytiikkaa.

Termi "Big Data" viittaa tietojoukkoihin, jotka ovat niin massiivisia, nopeasti liikkuvia ja rakenteellisesti monimutkaisia, että perinteiset tietojenkäsittelyohjelmistot ja relaatiotietokannat eivät pysty hallitsemaan niitä. Teollisuusympäristössä Big Dataa luonnehditaan perinteisesti viidellä V:llä: volyymi (Volume), nopeus (Velocity), monipuolisuus (Variety), todenmukaisuus (Veracity) ja arvo (Value) (Lee et al., 2014). Volyymi kattaa tiedon valtavan laajuuden, joka usein vastaa teratavuja tai petatavuja päivittäin tuotettua anturidataa. Nopeus viittaa äärimmäiseen nopeuteen, jolla dataa luodaan ja käsitellään, usein jatkuvasti reaaliajassa tai millisekuntien välein. Monipuolisuus korostaa teollisuusdatan monimuotoisia muotoja, jotka vaihtelevat strukturoiduista taulukkomuotoisista lokeista (kuten lämpötilalukemista) erittäin strukturoimattomiin syötteisiin (kuten teräväpiirtovideosyötteisiin, joita käytetään visuaaliseen laaduntarkastukseen). Lopuksi Veracity käsittelee datan luotettavuutta ja tarkkuutta, hallitsee virheelisiä tai puuttuvia anturisignaaleja – kun taas Value edustaa datasta saatua lopullista taloudellista ja operatiivista hyötyä (Lee et al., 2014; Xu et al., 2018).

Raakadata on kuitenkin luonnostaan passiivista; ilman hienostuneita mekanismeja sen tulkitsemiseksi se ei tarjoa operatiivista etua. Data-analytiikka toimii Teollisuus 4.0:n kognitiivisina aivoina, jotka muuttavat tämän raakadatan toiminnalliseksi älykkyydeksi. Analytiikan soveltaminen valmistuksessa etenee yleensä neljän kypsyysvaiheen läpi: kuvaileva (mitä tapahtui tehtaan lattialla), diagnostinen (miksi vika tai vika ilmeni), ennustava (mitä todennäköisesti tapahtuu seuraavaksi) ja ohjaava (mitä itsenäisiä toimia tulisi tehdä tuloksen optimoimiseksi) (Lee et al., 2014).

Nykyaikaiset edistyneet analytiikka-alustat ovat yhä enemmän tekoälyn (AI) ja koneoppimisen (ML) algoritmien ohjaamia. Nämä järjestelmät pystyvät ainutlaatuisen hyvin seulomaan teollisen Big Datan epätarkkuuksia tunnistukseen piileviä toimintamalleja ja korreloidakseen erittäin monimutkaisia muuttujia, jotka olisivat ihmisille huomaamattomia. Tämän merkittävin teollinen sovellus on ennakoiva kunnossapito. Käyttämällä koneoppimismalleja historiallisten vikatietojen analysointiin reaaliaikaisen värinän ja akustisen telemetrian rinnalla valmistusjärjestelmät voivat ennustaa laitteiden heikkenemistä ja ajoittaa huollon juuri ennen vikaantumista (Lee et al., 2014). Kunnossapidon lisäksi tekoälypohjainen ohjaileva analytiikka voi dynaamisesti uudelleenreitittää toimitusketjuja globaalien materiaalipulan perusteella, säätää koneistusparametreja lennossa vikojen poistamiseksi ja optimoida kokonaisvaltaista energiankulutusta. Big Datan ja data-analytiikan hienostunut soveltaminen antaa Teollisuus 4.0:lle mahdollisuuden ylittää perusautomaatio ja saavuttaa perimmäisen tavoitteensa, joka on todella älykäs, itseoptimoituva ja erittäin joustava valmistusmalli.

## 3 Digitaalinen kaksonen

### 3.1 Digitaalisen kaksosen perusteet

Digitaalinen kaksonen (DT) on dynaaminen, virtuaalinen esitys fyysisestä laitteesta, järjestelmästä tai prosessista, joka hyödyntää reaaliaikaista dataa peilataksaan reaali maailman vastineensa käyttäytymistä (Hu et al., 2024). Tämä teknologia toimii jatkuvana siltana, joka yhdistää fyysiset koneet digitaaliseen data-analytiikan, simuloinnin ja ennakoivan mallinnuksen maailmaan (Maranco et al., 2024).

Teknologian ytimen ymmärtämiseksi on tärkeää erottaa todellinen digitaalinen kaksonen yksinkertaisemmista digitaalisista malleista tai varjoista. Digitaalinen kaksonen määritellään sen kyvyllä automatisoituun, kaksisuuntaiseen tiedonvaihtoon. Tämä tarkoittaa, että fyysisen ympäristön muutokset päivittävät virtuaalista kopiota dynaamisesti reaaliajassa, ja virtuaalitulissa syntyvät tiedot voivat automaattisesti aktivoida ohjaimia ja säätöjä fyysisessä maailmassa (Amthiou et al., 2023). Tämä edellyttää perustavanlaatuisen teknologioiden, kuten esineiden internetin (IoT) anturien, koneoppimisalgoritmien ja edistyneiden kolmiulotteisten visualisointialustojen, monimutkaista integrointia.

### 3.2 Digitaalisen kaksosen sovellukset

Teollisuus 4.0:n tulo on katalysoinut merkittävän digitaalisen muutoksen valmistusteollisuudessa, jota suurelta osin vauhdittaa edistyneiden datalähtöisten teknologioiden integrointi. Keskeistä tässä muutoksessa on digitaalisen kaksosen (DT) käsite, joka määritellään dynaamiseksi, jatkuvaksi ja erittäin tarkaksi virtuaaliseksi esitykseksi fyysisestä omaisuudesta, järjestelmästä tai prosessista (Pires et al., 2019). Luomalla kaksisuuntaisen yhteyden tehtaan lattialla olevien fyysisten yksiköiden ja niiden virtuaalisten vastineiden välille digitaaliset kaksoset keräävät, simuloivat ja analysoivat jatkuvasti reaaliaikaista dataa (Amthiou et al., 2023). Tämä ominaisuus on nostanut teknologian yksinkertaisen simuloinnin ulkopuolelle ja asettanut sen älykkään

valmistuksen perustavanlaatuisiksi edellytykseksi. Digitaalisen kaksosen teknologiaa sovelletaan koko toimialalla muuttamaan tuotesuunnittelua, optimoimaan reaaliaikaisia tuotantoprosesseja, mahdollistamaan ennakoivan kunnossapidon ja edistämään kestäviä toimintamalleja.

Yksi digitaalisen kaksosen teknologian tärkeimmistä sovelluksista on tuotesuunnittelu ja -kehitys. Perinteisesti uuden tuotteen validointi on vaatinut useiden fyysisten prototyyppien valmistamista, mikä on sekä aikaa vievä että kallis prosessi. Digitaaliset kaksoset mahdollistavat insinöörien luoda virtuaalisen vastineen tuotteesta ja testata sen toiminnallisuutta erilaisissa simuloituissa olosuhteissa ennen fyysistä valmistusta (Amthiou et al., 2023). Analysoimalla tietovirtoja ja suorittamalla simulaatioita suunnittelijat voivat varmistaa tuotteen suorituskyvyn, tutkia erilaisia variaatioita ja tunnistaa mahdollisia suunnitteluvirheitä elinkaaren alkuvaiheessa. Olemassa olevien tuotteiden digitaaliset kaksoset voivat syöttää reaali maailman kuluttajakäyttötietoja takaisin suunnitteluvaiheeseen, jolloin valmistajat voivat iteratiivisesti parantaa tuotteen tulevia sukupolvia todellisten käyttäytymistietojen perusteella (Amthiou et al., 2023; Wynn & Irizar, 2023).

Tehdaslattialla digitaalisia kaksosia käytetään paljon reaaliaikaiseen prosessien seurantaan ja optimointiin. Nykyaikainen valmistus perustuu monimutkaiseen koneistukseen, jossa pienetkin poikkeamat voivat johtaa merkittäviin tuotevirheisiin. Valmistuslaitteisiin integroidut anturijärjestelmät mahdollistavat kaikkien muutosten reaaliaikaisen seurannan koneistusprosessin aikana (Hu et al., 2024). Esimerkiksi digitaalisia kaksosia käytetään leikkaustyökaluihin tarkan tiedon keräämiseksi työkalujen kulumisesta ja lämpödynamiikasta koko tuotantosyklin ajan (Hananto et al., 2024). Syöttämällä tätä reaaliaikaista dataa digitaaliseen kaksosmalliin järjestelmä voi jatkuvasti säätää toimintaparametreja – kuten syöttönopeuksia tai leikkausnopeuksia – koneistusratkaisun optimoimiseksi ja tasaisen tuotteen laadun ylläpitämiseksi ilman manuaalista ihmisen puuttumista asiaan (Hananto et al., 2024).

Prosessioptimoinnin lisäksi digitaaliset kaksoset ovat muuttaneet perustavanlaatuisesti valmistajien lähestymistapaa laitteiden kunnossapitoon ennakoivan kunnossapidon avulla. Perinteisessä valmistuksessa kunnossapito on usein reaktiivista tai perustuu jäykkiin, aikataulutettuihin aikaväleihin, mikä johtaa joko odottamattomiin laitevikoihin tai tarpeettomiin seisokkeihin. Digitaaliset kaksoset ratkaisevat tämän seuraamalla jatkuvasti koneiden toimintatilaa esineiden internetin (IoT) antureiden avulla ja käyttämällä tekoälyä datan analysointiin (Huang et al., 2021). Vertaamalla reaaliaikaisia toimintamittareita digitaaliseen malliin järjestelmä voi havaita poikkeamia ja ennustaa tarkasti laitteiden heikkenemisen ennen katastrofaalisen vian tapahtumista (Amthiou et al., 2023). Tämä ennakointi antaa laitospäälliköille mahdollisuuden ajoittaa huolto vain tarvittaessa, mikä vähentää merkittävästi suunnittelemattomia seisokkeja ja pidentää fyysisten omaisuserien kokonaiskäyttöikä.

### **3.3 Digitaalisen kaksosen käyttöönotto**

Digitaalisen kaksosen käyttöönotto on kiihtynyt merkittävästi Industry 4.0- ja Industry 5.0 mallien keskeisenä ajurina, mikä on johtanut laajaan integraatioon eri globaaleilla toimialoilla (Iliuță et al., 2024). Korkean arvonlisän teollisuussektorit, erityisesti ilmailu- ja autoteollisuus, ovat olleet varhaisimpia ja aggressiivisimpia omaksujia, ja ne ovat onnistuneesti ottaneet käyttöön erittäin kypsiä, moniulotteisia digitaalisia kaksosia.

Valmistusteollisuutta kokonaisuutena tarkasteltaessa käyttöönoton syvyys on kuitenkin edelleen vaihtelevaa. Tällä hetkellä suurin osa aktiivisesti käyttöönotetuista digitaalisista kaksosista tyypillisissä valmistusympäristöissä käytetään ensisijaisesti reaaliaikaiseen valvontaan ja ennakoivaan kunnossapitoon täysin autonomisen, suljetun kierron ohjauksen sijaan (Amthiou et al., 2023). Vaikka digitaalisten kaksosten teoreettinen viitekehys on vankka, laaja integraatio pienissä ja keskisuurissa yrityksissä (pk-yrityksissä) on edelleen selvitysvaiheessa. Koko toimialan kattava käyttöönotto kohtaa useita merkittäviä esteitä, kuten käyttöönoton korkeat taloudelliset kustannukset, vanhojen fyysisten laitteiden integroinnin monimutkaisuus nykyaikaisiin tietojärjestelmiin,

yhtenäisten standardointimenetelmien puute laitteiden liitettävyyttä varten ja kasvavat huolet kyberturvallisuudesta (Hu et al., 2024).

## 4 Digitaalisen kaksosen soveltaminen Teollisuus 4.0:ssa

IIoT:n, pilvipohjaisten laskenta-arkkitehtuurien ja edistyneen Big Data -analytiikan synteesi neljännessä teollisessa vallankumouksessa huipentuu digitaalisen kaksosen käyttöönottoon. Vaikka perustavanlaatuiset mahdollistavat teknologiat tarjoavat tarvittavan infrastruktuurin tiedonkeruulle, -siirrolle ja kognitiiviselle prosessoinnille, digitaalinen kaksonen toimii Teollisuus 4.0:n perimmäisenä ilmentymänä: täysin integroituna, korkean tarkkuuden kyberfyysisenä järjestelmänä (CPS). Tässä mallissa digitaalinen kaksonen ylittää staattisen, kolmiulotteisen tietokoneavusteisen suunnittelun (CAD) mallin rajoitukset, sillä se on dynaaminen ja jatkuvasti synkronoitu virtuaalinen kopio fyysisestä omaisuudesta, toimintaprosessista tai koko tuotantolaitoksesta (Tao et al., 2018). Hyödyntämällä IIoT-verkkojen tuottamaa keskeytymätöntä, kaksisuuntaista tiedonkulkua digitaalinen kaksonen peilaa fyysistä maailmaa reaaliajassa. Tämä syvälinen synkronointi antaa valmistajille mahdollisuuden simuloida, ennustaa ja optimoida itsenäisesti teollisia toimintoja koko niiden elinkaaren ajan, alustavasta konseptin suunnittelusta aina käytöstä poistoon asti. Yksi digitaalisten kaksosten vaikuttavimmista sovelluksista Teollisuus 4.0:ssa tapahtuu tuotteen elinkaaren hallinnan (PLM) alkuvaiheissa, erityisesti älykkään suunnittelun ja virtuaalisen käyttöönoton kautta. Ennen kuin fyysinen prototyyppi valmistetaan tai miljoonien dollarien arvoinen tuotantolinja rakennetaan, insinöörit voivat rakentaa ehdotetusta järjestelmästä kattavan, fysiikkaan perustuvan digitaalisen kaksosen (Kritzinger et al., 2018). Tämä virtuaaliympäristö mahdollistaa fyysisen käyttäytymisen, rakenteellisen eheyden, robottikinematiikan ja monimutkaisten materiaalivirtojen tarkan simuloinnin erilaisten toiminnallisten stressitekijöiden alaisena. Suorittamalla tuhansia automatisoituja "mitä jos" -skenaarioita valmistajat voivat tunnistaa suunnitteluvirheitä, fyysisiä törmäyksiä tai tuotannon pullonkauloja pelkästään digitaalisessa maailmassa. Tämä ominaisuus muuttaa perustavanlaatuisesti perinteiset valmistustyönkulut välttämällä kokonaan fyysiseen prototyyppien valmistukseen ja kokeilu- ja erehdysmenetelmään perustuvaan käyttöönottoon liittyvät kohtuuttomat taloudelliset kustannukset, materiaalihävikin ja pitkät aikataulut.

Kun fyysinen tuotanto alkaa, digitaalisen kaksosen käyttö siirtyy kohti reaaliaikaista valvontaa ja autonomista, suljetun kierron prosessinohjausta. Aktiivisen valmistuksen aikana fyysinen omaisuus ja sen digitaalinen kaksonen toimivat jatkuvassa tandemissa. Suoraan tehtaan lattiaan upotetut IIoT-anturit syöttävät jatkuvasti operatiivista telemetriatietoa, kuten lämpödynamiikkaa, akustisia taajuuksia, värähtelyä ja vääntömomenttia, suoraan digitaaliseen malliin (Qi & Tao, 2018). Digitaalinen kaksonen hyödyntää reunalaskennan arkkitehtuureja kriittisen dataviiveen poistamiseksi ja analysoi tätä telemetriaa välittömästi optimaalisten suorituskykytasojen perusteella. Jos kaksonen havaitsee mikropoikkeaman, joka voi johtaa tuotevikaan, se voi automaattisesti lähettää korjaavia komentoja takaisin fyysisille koneille. Esimerkiksi erittäin herkissä toiminnoissa, kuten metallien lisäainevalmistuksessa (3D-tulostus) tai tarkkuuskoneistuksessa (CNC), digitaalinen kaksonen voi dynaamisesti säätää laserin tehoa, syöttönopeutta tai leikkausnopeutta millisekunneissa kompensoidakseen odottamatonta lämpövääritystä tai työkalun kulumista. Tämä varmistaa tinkimättömän ja erittäin toistettavan tuotelaadun ilman manuaalista ihmisen puuttumista asiaan (Tao et al., 2018).

Digitaalinen kaksonen muuttaa omaisuuden elinkaaren hallinnan ennakoivan ja ohjaavan kunnossapidon toteuttamisen avulla. Perinteiset teolliset kunnossapitostrategiat ovat historiallisesti olleet joko reaktiivisia (koneen korjaaminen sen jo hajottua) tai ennaltaehkäiseviä (osien vaihtaminen jäykän aikataulun mukaisesti todellisesta kulumisesta riippumatta). Molemmat perinteiset lähestymistavat johtavat valtaviin taloudellisiin tappioihin katastrofaalisten suunnittelemattomien seisokkiaikojen tai käyttökelpoisten komponenttien ennen aikaisen ja tuhlaavan hävittämisen vuoksi. Digitaaliset kaksoset siirtävät tehtaat pois näistä vanhentuneista malleista syöttämällä jatkuvasti historiallisia vikatietoja ja reaaliaikaisia sensorisia syötteitä kehittyneisiin koneoppimisalgoritmeihin (Kritzinger et al., 2018). Tämä mahdollistaa digitaalisen kaksosen laskea tarkasti kriittisten mekaanisten komponenttien jäljellä olevan käyttöiän (RUL). Pelkän ennustamisen lisäksi edistyneet kaksoset mahdollistavat määräysten mukaisen kunnossapidon; järjestelmä ei ainoastaan ennako uuhkaavaa vikaa, vaan

määrää myös kustannustehokkaimman ajankohdan huollon suorittamiseen, tilaa automaattisesti tarvittavat varaosat ja ohjaa tehtaan tuotantoa uudelleen häiriöiden välttämiseksi.

Lopuksi, Teollisuus 4.0:n kypsyessä digitaalisten kaksosten soveltaminen skaalautuu erillisistä, konetason malleista kattaviin, järjestelmätason "yritystason kaksosiin". Nämä makrotason digitaaliset kaksoset kattavat kokonaisia toisiinsa yhteydessä olevia tehtaita ja globaaleja toimitusketjuja (Qi & Tao, 2018). Yhdistämällä tietoja useista laitoksista järjestelmätason kaksoset voi optimoida kokonaisvaltaista energiankulutusta, seurata tuotantolinjojen hiilijalanjälkeä reaaliajassa ja säätää dynaamisesti valmistusmääriä vastauksena globaaleihin toimitusketjun häiriöihin tai kuluttajakysynnän äkillisiin muutoksiin.

Viime kädessä digitaalisen kaksosen teknologian soveltaminen nostaa pitkälle automatisoidun tehtaan aidosti "älykkääksi" tehtaaksi. Yhdistämällä saumattomasti tuotantotilan fyysiset rajoitukset digitaalisen maailman rajattomiin analyyttisiin ominaisuuksiin digitaaliset kaksoset tarjoavat kattavan näkyvyyden, ennakoivan tulevaisuuden ja autonomisen ohjauksen, joita tarvitaan Teollisuus 4.0:n täyden potentiaalin toteuttamiseen.

## 5 Digitaalisen kaksosen haasteet ja mahdollisuudet Teollisuus 4.0:ssa

Digitaalisen kaksosen integrointi neljänteen teolliseen vallankumoukseen tuo mukanaan muutoksen valmistusteollisuudelle. Luomalla korkean tarkkuuden, kaksisuuntaisen kyberfyysisen silmukan digitaaliset kaksoset avaavat merkittäviä operatiivisia kykyjä. Siirtyminen teoreettisista malleista laajaan teolliseen käyttöön ottoon on kuitenkin täynnä merkittäviä teknisiä, taloudellisia ja organisatorisia esteitä. Sekä transformatiivisten mahdollisuuksien, että kriittisten haasteiden ymmärtäminen on välttämätöntä älykkään valmistuksen täyden potentiaalin hyödyntämiseksi.

### 5.1 Mahdollisuudet

Digitaalisen kaksosen teknologian tarjoamat mahdollisuudet muuttavat perusteellisesti valmistusjärjestelmien suunnittelun, käytön ja ylläpidon. Välittömin ja merkittävin mahdollisuus piilee ennakoivan ja määräävän kunnossapidon alueella. Perinteinen valmistus perustuu reaktiiviseen tai tiukasti aikataulutettuun kunnossapitoon, jotka molemmat johtavat kalliisiin seisokkeihin ja tehottomaan resurssien kohdentamiseen. Digitaaliset kaksoset hyödyntävät reaaliaikaista teollisen internetin (IIoT) telemetriaa ja koneoppimisalgoritmeja fyysisten omaisuuserien tarkan jäljellä olevan käyttöiän (RUL) laskemiseen. Tämä ominaisuus antaa valmistajille mahdollisuuden siirtyä määräävään malliin, jossa järjestelmä ei ainoastaan ennusta uhkaavaa mekaanista vikaa, vaan myös aikatauluttaa automaattisesti kunnossapidon ja uudelleen reitittää tuotantotyönkulkuja varmistaakseen, ettei suunnittelemattomia seisokkeja esiinny (Tao et al., 2019). Digitaalisten kaksosten avulla valmistusyritykset voivat saavuttaa kustannussäästöjä seisokkiaikojen vähentämisen ja resurssien tehokkaamman kohdentamisen kautta (Fuller et al., 2020). Lisäksi reaaliaikaisen datan ja ennustavien analyysien yhdistäminen mahdollistaa aktiivisen päätöksenteon, joka parantaa tuotannon luotettavuutta ja tehokkuutta (Qi & Tao, 2018).

Lisäksi digitaaliset kaksoset tarjoavat valtavia mahdollisuuksia prosessien optimointiin ja ketterään tuotekehitykseen. Virtuaalisen käyttöönoton avulla insinöörit voivat simuloida kokonaisia tuotantolinjoja ja testata monimutkaista robottikinematiikkaa riskittömässä digitaalisessa ympäristössä ennen fyysisen pääoman käyttöönottoa. Tämä nopeuttaa merkittävästi uusien tuotteiden markkinoille tuloaikaa ja vähentää merkittävästi fyysiseen prototyyppien valmistukseen liittyvää taloudellista hukkaa (Fuller et al., 2020). Aktiivisella tehtaan lattialla fyysisten ja digitaalisten kaksosten reaaliaikainen synkronointi mahdollistaa autonomisen, suljetun silmukan ohjauksen. Jos digitaalinen kaksonen havaitsee pienen poikkeaman työstöprosessissa, se voi välittömästi säätää toimintaparametreja, kuten karan nopeutta tai jäähdytysnesteen virtausta, vikojen estämiseksi, mikä takaa tinkimättömän tuotteen laadun ja minimoi hylkymateriaalin määrän. Samalla digitaaliset kaksoset mahdollistavat modulaarisen ja joustavan tuotannon, mikä tukee massaräätälöintiä ja nopeaa reagoitua asiakkaiden muuttuviin tarpeisiin (Kritzinger et al., 2018).

Lopuksi digitaaliset kaksoset avaavat mahdollisuuden erittäin kestäväan valmistukseen ja uusiin taloudellisiin malleihin. Yhdistämällä tietoja "yrittäjäkaksosten" välillä organisaatiot voivat seurata kokonaisvaltaista energiankulutusta, seurata hiilidioksidipäästöjä ja optimoida toimitusketjun logistiikkaa reaaliajassa tiukkojen ympäristö-, sosiaali- ja hallintotapavoitteiden (ESG) saavuttamiseksi (Jones et al., 2020). Lisäksi laitevalmistajat (OEM) voivat hyödyntää digitaalisia kaksosia siirtyäkseen fyysisten koneiden myynnistä "kone palveluna" (MaaS) -mallien tarjoamiseen, mikä tuottaa jatkuvia tulovirtoja tarjoamalla asiakkailleen etävalvontaa, suorituskyvyn säätöä ja digitaalisia päivityksiä. Lisäksi kokonaisvaltaisen datan yhdistäminen organisaatiossa mahdollistaa toimitusketjujen optimoinnin useiden toimijoiden välillä, mikä parantaa koko verkoston tehokkuutta ja resilienssiä (Jones et al., 2020).

## 5.2 Haasteet

Merkittävistä mahdollisuuksista huolimatta digitaalisen kaksosen teollinen käyttöönotto kohtaa useita kriittisiä haasteita, joihin on puututtava laajan käyttöönoton saavuttamiseksi. Haasteiden tunnistaminen on kriittistä, sillä ne selittävät, miksi teknologian käyttöönotto on ollut pk-yrityksissä hitaampaa. Merkittävin este on käyttöönoton valtavat taloudelliset ja infrastruktuurikustannukset. Korkean tarkkuuden digitaalisen kaksosen rakentaminen vaatii massiivisia pääomainvestointeja kestäviin IIoT-antureihin, reunalaskennan laitteistoon, pilvitallennukseen ja edistyneisiin data-analytiikka-alustoihin. Pienille ja keskisuurille yrityksille (pk-yrityksille) alkuinvestoinnin tuotto prosenttia (ROI) on usein vaikea perustella, mikä rajoittaa teknologian ensisijaisesti suuriin, pääomavaltaisiin monikansallisiin yrityksiin, kun samaan aikaan korkeat alkuinvestoinnit muodostavat erityisen merkittävän esteen pk-yrityksille, joilla ei usein ole tarvittavia taloudellisia resursseja digitaalisen infrastruktuurin rakentamiseen (Fuller et al., 2020).

Toinen merkittävä tekninen haaste liittyy datan integrointiin, laatuun ja vanhojen järjestelmien yhteentoimivuuteen. Nykyaikaiset tuotantolaitokset toimivat harvoin täysin uusilla laitteilla; ne ovat erittäin riippuvaisia vanhoista koneista, joita ei ole koskaan suunniteltu internet-yhteyttä tai jatkuvaa tiedonkeruuta varten. Näiden vanhempien koneiden jälkiasentaminen IIoT-antureilla on monimutkaista ja kallista. Lisäksi tehtaat käyttävät usein pirstaloitunutta maisemaa eri toimittajien omistamista ohjelmistoista ja tietoliikenneprotokollista. Tämä standardoinnin puute luo vakavia datasiiloja, mikä tekee vaikeaksi koota yhteen yhtenäistä ja korkealaatuista dataa, jota tarvitaan tarkkojen tekoälymallien kouluttamiseen ja systeemisen digitaalisen kaksosen synkronointiin. Datan laadun varmistaminen on kriittistä, sillä epätarkka tai puutteellinen data voi johtaa virheellisiin ennusteisiin ja heikentää digitaalisen kaksosen luotettavuutta (Jones et al., 2020). Lisäksi standardoinnin puute eri järjestelmien välillä vaikeuttaa yhteentoimivuutta ja hidastaa digitaalisten kaksosten laajamittaista käyttöönottoa teollisuudessa (Kritzinger et al., 2018). Jos kaksoselle syötetään

epätäydellistä tai epätarkkaa dataa, sen ennustavat algoritmit epäonnistuvat väistämättä, mikä tekee järjestelmästä hyödyttömän tai jopa vaarallisen yritykselle.

Digitaalisten kaksosten laajamittainen käyttöönotto tuo mukanaan vakavia kyberturvallisuushaavoittuvuuksia ja organisaatioiden osaamisvajeita. Koska digitaalinen kaksonen ylläpitää kaksisuuntaista ohjaussilmukkaa fyysisten koneiden kanssa, virtuaalimalliin kohdistuva kyberhyökkäys voi johtaa todellisiin, katastrofaalisiin fyysisiin vahinkoihin tehtaan lattialla. Tuhansien verkottuneiden IIoT-antureiden luoma laajennettu hyökkäyspinta vaatii yritystason, nolaluottamusperiaatteella toimivia kyberturvallisuuskehyskehyksiä, joita monet perinteiset valmistajat eivät ole valmiita hallitsemaan (Tao et al., 2019). Tätä ongelmaa pahentaa erikoistuneiden kykyjen maailmanlaajuinen pula. Digitaalisen kaksosen ekosysteemin ylläpitäminen vaatii työvoimaa, joka on erittäin taitava datatieteessä, koneoppimisessa, järjestelmätekniikassa ja kyberturvallisuudessa. Nykyisen valmistustyövoiman muuttaminen vastaamaan näihin monimutkaisiin digitaalisiin vaatimuksiin on merkittävä muutoshallinnan haaste, jonka kanssa eri toimialojen on painittava seuraavan vuosikymmenen ajan. Organisaatioiden näkökulmasta osaamisvaje ja muutosvastarinta muodostavat merkittäviä esteitä, sillä digitaalisten kaksosten tehokas hyödyntäminen edellyttää uudentyyppistä yhdistelmää teknologista ja analyttistä osaamista (Fuller et al., 2020).

## 6 Yhteenveto ja johtopäätökset

### 6.1 Yhteenveto

Neljäs teollinen vallankumous, joka tunnetaan laajalti nimellä Teollisuus 4.0, edustaa syvällistä ajatusmallin muutosta valmistussektorilla, jolle on ominaista fyysisen tehdastilan ja digitaalisen laskennallisen tilan välisen rajan hämärtyminen. Toisin kuin aiemmat teolliset vallankumoukset, jotka keskittyivät koneistamiseen, sähköistämiseen ja automaatioon, Teollisuus 4.0:lle on ominaista toisiinsa kytkeytyneen autonomian merkitys (Xu et al., 2018). Se perustuu pitkälle integroituihin kyberfyysisiin järjestelmiin, jotka kykenevät hajautettuun, reaaliaikaiseen ja datalähtöiseen päätöksentekoon. Tämän teknologisen kehityksen huipulla on digitaalinen kaksonen elävä, dynaaminen ja jatkuvasti synkronoitu virtuaalinen kopio fyysisestä omaisuudesta, toimintaprosessista tai koko tuotantolaitoksesta. Tämä korkealaatuinen virtuaalimalli ei kuitenkaan ole itsenäinen ratkaisu, vaan pikemminkin syvästi toisiinsa kytkeytyneen perustavanlaatuisen teknologioiden pinon lopullinen ilmentymä.

Digitaalisen kaksosen toteutuminen alkaa sen aistihermostosta: teollisesta esineiden internetistä (IIoT). Toisin kuin kuluttajaluokan IoT, IIoT koostuu erittäin kestävästä antureista ja deterministisistä viestintäprotokollista, jotka on suunniteltu kestävään ankaria tehdasympäristöjä ja takaamaan välittömän koneiden välisen tiedonsiirron (Boyes et al., 2018). Nämä anturit tallentavat jatkuvaa reaaliaikaista operatiivista telemetriatietoa, kuten lämpödynamiikkaa, värinää ja vääntömomenttia, luoden yhteyden fyysisten toimintojen ja digitaalisen datan välillä. Tämän massiivisen tietotulvan hallitsemiseksi moderni älykäs valmistus perustuu pilvi-reunalaskennan muodostaman kokonaisuuden kaksoisarkkitehtuuriin. Reunalaskenta hajauttaa prosessoinnin tehtaan lattialle varmistaen reaaliaikaisen autonomisen ohjauksen edellyttämän erittäin pienen viiveen, kun taas pilvilaskenta tarjoaa keskitetyn, erittäin skaalautuvan infrastruktuurin, jota tarvitaan pitkäaikaiseen tiedontallennukseen ja monimutkaisiin koko yrityksen laajuisiin simulaatioihin (Qiu et al., 2020).

Lisäksi IIoT-verkkojen tuottama raakadata vaatii kehittyneitä kognitiivisia moottoreita, jotta siitä voi tulla toimivaa. Tämä saavutetaan Big Data -kehysten ja edistyneen data-analytiikan avulla, joita yhä enemmän tukevat tekoäly ja koneoppiminen (Lee et al., 2014). Nämä analyttiset alustat seulovat valtavia määriä monimutkaista ja nopeaa dataa tunnistukseen piileviä toimintamalleja ja toimivat käytännössä digitaalisen kaksosen "aivoina". Kun nämä teknologiat yhdistyvät, digitaalinen kaksonen antaa valmistajille mahdollisuuden simuloida, ennustaa ja optimoida itsenäisesti teollisia toimintoja koko niiden elinkaaren ajan. Suunnitteluvaiheen aikana virtuaalinen käyttöönotto mahdollistaa tuotantolinjojen perusteellisen testauksen riskittömässä digitaalisessa ympäristössä, mikä vähentää merkittävästi fyysiseen prototyyppien valmistukseen liittyviä kustannuksia (Kritzinger et al., 2018). Aktiivisella tehtaan lattialla jatkuva kaksisuuntainen tiedonkulku mahdollistaa kaksosen dynaamisesti säätää koneistusparametreja millisekunneissa virheiden estämiseksi ja tuotteen laadun takaamiseksi (Tao et al., 2018).

Näistä ominaisuuksista huolimatta digitaalisen kaksosen teknologian laajamittainen teollinen käyttöönotto kohtaa valtavia haasteita. Kestävien antureiden, reunalaitteiston ja edistyneiden analytiikka-alustojen käyttöönoton valtavat taloudelliset kustannukset rajoittavat usein tämän teknologian pääomavaltaisiin monikansallisiin yrityksiin, jolloin pienet ja keskisuuret yritykset (pk-yritykset) kamppailevat alkuinvestoinnin tuoton perustelemiseksi (Fuller et al., 2020). Myöskin tehtaat toimivat harvoin täysin uusilla laitteilla; Nykyaikaisten digitaalisten arkkitehtuurien integrointi vanhoihin, toisiinsa kytkemättömiin koneisiin on vakava tekninen ja taloudellinen este (Jones et al., 2020). Lisäksi, koska digitaalinen kaksonen ylläpitää kaksisuuntaista ohjaussilmukkaa fyysisten koneiden kanssa, tuhansien verkottuneiden IIoT-antureiden luoma laajentunut hyökkäyspinta aiheuttaa vakavia kyberturvallisuushaavoittuvuuksia, jotka muuttavat aiemmin puhtaasti digitaalisiksi tietomurroiksi potentiaalisia fyysisiä turvallisuusuhkia (Tao et al., 2019).

## **6.2 Johtopäätökset ja kriittiset pohdinnat**

Kun pohditaan Teollisuus 4.0:n ja digitaalisen kaksosen teknologian yleistä kehityskulkua, esiin nousee useita keskeisiä johtopäätöksiä ja sosiologisia seurauksia. Digitaalinen kaksonen ei ole pelkästään uusi työkalu tehtaan optimointiin; se edustaa perustavanlaatuaista uudelleenkuvausta valmistusekosysteemistä ja sen taustalla olevista liiketoimintamalleista.

### **6.2.1 Ihmistekijä ja sosiologinen muutos**

Vaikka digitaaliset kaksoset ajavat autonomista tuotantoa, ne eivät tee ihmistyöntekijästä tarpeetonta; pikemminkin ne nostavat merkittävästi vaadittavaa kognitiivista perustasoaa. Valmistava teollisuus on parhaillaan ottamassa käyttöön 2000-luvun kyberfyysisiä järjestelmiä, mutta sitä rajoittaa edelleen työvoima, joka on suurelta osin koulutettu 1900-luvun mekaanisiin operaatioihin. Tehtaan tulevaisuus on vähemmän riippuvainen manuaalisista operaattoreista ja enemmän datatieteilijöistä, järjestelmäinsinööreistä ja kyberturvallisuusasiantuntijoista. Siksi Teollisuus 4.0:n menestys on yhtä lailla syvällinen koulutuksellinen ja muutoshallintahaaste kuin teknologinen haaste.

### **6.2.2 IT- ja OT-riskien lähentyminen**

Historiallisesti tietotekniikka (IT) ja operatiivinen teknologia (OT) olivat fyysisesti erillään toisistaan. Tietokonevirus saattoi kaataa yrityksen palvelimen, mutta se ei voinut suistaa fyysistä kokoonpanolinjaa raiteiltaan. Digitaalinen kaksonen poistaa tämän rajan pysyvästi. Näin ollen kyberturvallisuuden on kiireellisesti kehityttävä puolustavasta IT-strategiasta fyysisen teollisuusturvallisuuden perustavanlaatuisiksi periaatteeksi.

### **6.2.3 Valmistusliiketoimintamallien kehitys**

Digitaalisen kaksosen merkittävin pitkän aikavälin vaikutus saattaa olla sen "palvelullistamisen" kiihtyminen. Koska digitaalinen kaksonen tarjoaa jatkuvaa,

reaaliaikaista tietoa tuotteen kunnosta ja suorituskyvystä, laitevalmistajat (OEM) voivat siirtyä fyysisten omaisuserien myynnistä taattujen tulosten, kuten "Machine-as-a-Service" (MaaS) -mallin, myyntiin. Tämä siirtää tehokkaasti ylläpidon ja tehokkuuden taakan takaisin luojalle, mikä kannustaa voimakkaasti kestävään suunnitteluun ja määrittelee täysin uudelleen valmistajien ja kuluttajien välisen taloudellisen suhteen.

Yhteenvetona voidaan todeta, että vaikka perinteisten järjestelmien integroinnin, kyberturvallisuuden ja työvoiman osaamisen kehittämisen esteet ovat merkittäviä, digitaalisen kaksosen toiminnalliset mahdollisuudet – aina suunnittelemattomien seisokkien poistamisesta erittäin kestävään, autonomiseen tuotantoon – tekevät tästä digitaalisesta muutoksesta väistämättömän teollisen välttämättömyyden.

## Lähteet

Amthiou, H., Arioua, M., & Benbarrad, T. (2023). Digital twins in Industry 4.0: A literature review. *ITM Web of Conferences*, 52, Article 01002. <https://doi.org/10.1051/itmconf/20235201002>

Atzori, L., Iera, A., & Morabito, G. (2010). The internet of things: A survey. *Computer Networks*, 54(15), 2787–2805. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2010.05.010>

Boyes, H., Hallaq, B., Cunningham, J., & Watson, T. (2018). The industrial internet of things (IIoT): An analysis framework. *Computers in Industry*, 101, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2018.04.015>

Fuller, A., Fan, Z., Day, C., & Barlow, C. (2020). Digital twin: Enabling technologies, challenges and open research. *IEEE Access*, 8, 108952–108971. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2998358>

Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S., & Palaniswami, M. (2013). Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. *Future Generation Computer Systems*, 29(7), 1645–1660. <https://doi.org/10.1016/j.future.2013.01.010>

Hananto, A. L., Tirta, A., Herawan, S. G., Idris, M., Soudagar, M. E. M., Djamari, D. W., & Veza, I. (2024). Digital Twin and 3D Digital Twin: Concepts, Applications, and Challenges in Industry 4.0 for Digital Twin. *Computers*, 13(4), 100. <https://doi.org/10.3390/computers13040100>

Hu, S., Li, C., Li, B., et al. (2024). Digital twins enabling intelligent manufacturing: From methodology to application. *Intelligent and Sustainable Manufacturing*, 1, Article 10007. <https://doi.org/10.35534/ism.2024.10007>

Huang, Z., Shen, Y., Li, J., Fey, M., & Brecher, C. (2021). A Survey on AI-Driven Digital Twins in Industry 4.0: Smart Manufacturing and Advanced Robotics. *Sensors*, 21(19), 6340.

<https://doi.org/10.3390/s21196340>

Iliuță, M.-E., Moisescu, M.-A., Pop, E., et al. (2024). Digital Twin—A review of the evolution from concept to technology and its analytical perspectives on applications in various fields. *Applied Sciences*, 14(13), Article 5454.

<https://doi.org/10.3390/app14135454>

Jones, D., Snider, C., Nassehi, A., Yon, J., & Hicks, B. (2020). Characterising the Digital Twin: A systematic literature review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 29, 36–52. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2020.02.002>

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>

Lasi, H., Fettke, P., Kemper, H.-G., Feld, T., & Hoffmann, M. (2014). Industry 4.0. *Business & Information Systems Engineering*, 6(4), 239–242. <https://doi.org/10.1007/s12599-014-0334-4>

Lee, J., Kao, H. A., & Yang, S. (2014). Service innovation and smart analytics for Industry 4.0 and big data environment. *Procedia CIRP*, 16, 3–8. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.02.001>

Maranco, M., Sivakumar, M., Krishnaraj, N., Ivaturi, K. A., & Nidhya, R. (2024). Digital twin-enabled smart manufacturing. In *Artificial Intelligence-Enabled Digital Twin for Smart Manufacturing* (pp. 479–504). Wiley.

<https://doi.org/10.1002/9781394303601.ch21>

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)*.  
<https://doi.org/10.1109/indin41052.2019.8972134>

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>

Qiu, T., Chi, J., Zhou, X., Ning, Z., Atiquzzaman, M., & Wu, D. O. (2020). Edge computing in the industrial internet of things: Architecture, advances and challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, *22*(4), 2462–2488.  
<https://doi.org/10.1109/COMST.2020.3009103>

Sisinni, E., Saifullah, A., Han, S., Jennehag, U., & Gidlund, M. (2018). Industrial internet of things: Challenges, opportunities, and directions. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, *14*(11), 4724–4734. <https://doi.org/10.1109/TII.2018.2852491>

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., Zhang, M., Liu, Y., & Nee, A. Y. C. (2018). Digital twin in industry: State-of-the-art. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, *15*(4), 2405–2415.  
<https://doi.org/10.1109/TII.2018.2873186>

Wynn, M., & Irizar, J. (2023). Digital Twin Applications in Manufacturing Industry: A Case Study from a German Multi-National. *Future Internet*, *15*(9), 282.  
<https://doi.org/10.3390/fi15090282>

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