Upi Jylhä

IoT ja AI tuotannon optimoinnissa

Reaaliaikaisesta seurannasta kohti autonomisia järjestelmiä

Tekniikan ja innovaatiojohtamisen yksikkö
Kandidaatintutkielma
Automaatio- ja tietotekniikka

Vaasa 2025

VAASAN YLIOPISTO

Tekniikan ja innovaatiojohtamisen yksikkö

Tekijä: Upi Jylhä

Tutkielman nimi: IoT ja AI tuotannon optimoinnissa: Reaaliaikaisesta seurannasta kohti autonomisia järjestelmiä

Tutkinto: Tekniikan kandidaatti

Koulutusohjelma: Automaatio- ja tietotekniikka

Työn ohjaaja: Timo Mantere

Valmistumisvuosi: 2025 **Sivumäärä:** **43**

TIIVISTELMÄ

Tällä hetkellä teollinen tuotanto on merkittävässä vaiheessa. Industry 4.0 eli teollinen vallankumous muuttaa tuotantojärjestelmiä. IoT, AI ja kyberfyysiset järjestelmät ovat osa vallankumousta. Näiden teknologioiden avulla pystytään rakentamaan älykkäät ja joustavat tuotantoympäristöt.

IoT on peräisin 1990-luvulta. Tällöin sillä tarkoitettiin teknisten laitteiden automaattista tiedonsiirtoa Internetin välityksellä. Teollinen Internet (IIoT) painottaa erityisesti sitä, miten kerättyä dataa voidaan hyödyntää liiketoiminnallisen lisäarvon saavuttamiseen. Tekoälyllä saadaan mahdollistettua datan analysoinnin ja päätöksenteon automatisointi.

Tässä työssä tarkastellaan IoT:n ja tekoälyn roolia teollisessa tuotannossa. Aluksi käsitellään teknologioiden merkitystä tuotannolle yleisellä tasolla ja niiden yhdistämisen vaikutuksia. Tämän jälkeen syvennytään tuotannon optimointiin, sen tavoitteisiin ja menetelmiin. Lisäksi esitellään keskeisiä sovelluskohteita, kuten ennakoivaa kunnossapitoa, laadunvalvontaa sekä tuotannon reaaliaikaista seurantaa ja ohjausta, ja arvioidaan niiden tuomia hyötyjä ja haasteita. Lopuksi tarkastellaan tulevaisuuden kehityssuuntia, kuten digitaalista kaksosta, autonomisia järjestelmiä ja vastuullisuuskysymyksiä.

Tulosten perusteella IoT ja tekoäly muuttavat tuotantoa reaktiivisesta toiminnasta ennakoivaksi ja dataohjatuksi kokonaisuudeksi. Haasteita ovat osaamisvaje, erilaiset tietoturvariskit ja investoinnit. Liiketoiminnalle IoT ja AI tuovat ansaintamalleja, kuten digitaalinen servitisaatio, joka mahdollistaa tulovirtoja ja tiiviimpiä asiakassuhteita.

IoT ja tekoäly eivät ole enää tulevaisuuden visioita, vaan osa nykyaikaista teollisuutta. Digitaalisten kaksosten ja autonomisten tuotantojärjestelmien yleistyminen sekä se, miten vastuullisuus ja uusien teknologioiden hyödyntäminen toteutetaan käytännössä.

Johtopäätöksenä voidaan todeta, että IoT ja tekoäly eivät ole enää tulevaisuuden visioita, vaan osa nykyaikaista teollisuutta. Digitaalisten kaksosten ja autonomisten tuotantojärjestelmien yleistyminen sekä se, miten vastuullisuus ja uusien teknologioiden hyödyntäminen toteutetaan käytännössä. Ne tulevat ohjaamaan teollisuutta seuraavien vuosien aikana.

AVAINSANAT: IoT, IIoT, AI, tuotannon optimointi, tehtaat, tekoäly, esineiden internet, Industry 4.0

Sisällys

1 Johdanto 6

2 Teollinen internet ja tekoäly tuotannossa 8

2.1 Industrial Internet of Things (IIoT) perusperiaatteet 8

2.2 Tekoälyn rooli tuotannossa 9

2.3 IIoT:n ja AI:n arkkitehtuurista 10

3 Tuotannon optimoinnin näkökulmat 11

3.1 Tuotannon ohjauksen perusteet 11

3.2 Optimoinnin tavoitteet 12

3.3 AI- ja IoT-pohjaiset menetelmät optimoinnissa 13

4 Keskeiset sovelluskohteet 14

4.1 Ennakoiva kunnossapito (Predictive Maintenance) 14

4.2 Laadunvalvonta ja prosessiseuranta 16

4.3 Tuotantolinjan reaaliaikainen optimointi 19

5 Hyödyt ja haasteet 21

5.1 Teknologiset hyödyt 21

5.2 Liiketoiminnalliset hyödyt 22

5.3 Haasteet ja rajoitukset 23

6 AIoT:n seuraavat kehitysaskeleet 25

6.1 Digitaalinen kaksonen (Digital Twin) 25

6.2 Autonomiset tuotantojärjestelmät 26

6.3 Sääntely, standardit ja vastuullisuusnäkökulmat 27

7 Yhteenveto ja johtopäätökset 29

Lähteet 31

Kuvat

Kuva 1 Teollisuus 4.0 keskeiset teknologiat 11

Kuva 2 IoT- pohjaisen ennakoivan kunnossapidon keskeiset osa-alueet 16

Taulukot

Taulukko 1 Digitaalisen kaksosen markkinakehitys 26

Termit ja lyhenteet

Industry 4.0: Neljäs teollinen vallankumous (automaatio, data, IoT ja tekoäly)

Digital Twin: Digitaalinen kaksonen

Edge AI: Tekoäly reunalaitteilla

EU AI Act: Euroopan Unionin tekoälylaki

Lyhenteet

AI: Artificial Intelligence (tekoäly)

AIoT: AI:n ja IoT:n yhdistelmä

ML: Machine Learning (koneoppiminen)

DL: Deep Learning (syväoppiminen)

IoT: Internet of Things (esineiden internet)

IIOT: Industrial Internet of Things (teollinen esineiden internet)

PdM: Predictive Maintenance (ennakoiva kunnossapito)

QC:	Quality Control (laadunvalvonta)
QA:	Quality Assurance (laadunvarmistus)
OEE:	Overall Equipment Effectiveness (laitteiden kokonaistehokkuus)
CPS:	Cyber-physical Systems (kyberfyysiset järjestelmät)
SPC:	Statistical Process Control (Tilastollinen prosessiohjausta)
MQTT:	Message Queuing Telemetry Transport (viestintäprotokolla IoT:lle)
ERP:	Enterprise Resource Planning (Toiminnanohjausjärjestelmä)
SCADA:	Supervisory Control and Data Acquisition (valvonta- ja ohjausjärjestelmä)
PLC:	Programmable Logic Controller (Ohjelmoitava logiikkamoduuli)
AMR:	Autonomous Mobile Robot (Autonominen liikkuva robotti)
XAI:	Explainable AI (Selitettävä tekoäly)
ISO 42001:	Tekoälyn hallintajärjestelmä standardi
NIST:	National Institute of Standards and Technology
CAGR:	Compound Annual Growth Rate

1 Johdanto

Tällä hetkellä elämme aikaa, jossa tapahtuu isoja muutoksia nopealla tahdilla. Teollisuuden puolella erästä muutosta kuvataan termillä Industry 4.0, joka käsittää kyberfyysiset järjestelmät, esineiden internetin (IoT) ja tekoälyn (AI). Ne yhdessä muodostavat kokonaisuuden, joka mahdollistaa älykkäiden ja joustavien tuotantojärjestelmien kehittämisen (Kagermann ja muut, 2013). Industry 4.0:n avulla koneet, ihmiset, sekä järjestelmät pystyvät kommunikoimaan yhdessä ja reaaliajassa.

IoT:n ja AI:n merkitys korostuu erityisesti optimoinnissa. IoT:n avulla voidaan kerätä suuria määriä dataa käyttäen sensoreita. AI:n avulla pystytään analysoimaan dataa ja käsittelemään tietoa. Sen avulla voidaan myös tehdä ennusteita, jotka auttavat optimointipäätöksen tekemisessä. Yhdessä ne (jatkossa AIoT) luovat hyvät edellytykset tehokkaalle teollisuuden tuotannolle.

Tuotannon optimointi on keskeinen osa teollisuusyritysten kilpailukykyä. AIoT:n hyödyntäminen tarjoaa konkreettisia etuja kuten ennakoivan kunnossapidon, reaaliaikaisen laadunvalvonnan ja tuotantolinjojen tehokkaamman ohjauksen (Varalakshmi & Kumar, 2025). Näin voidaan vähentää tuotannossa syntyviä katkoksia, säästää rahaa, energiaa ja ennen kaikkea parantaa laatua.

AIoT:n käyttöönottoon liittyy myös haasteita, kuten tietoturvakysymykset, datan laatu, järjestelmien yhteentoimivuus ja investointikustannukset (Kodumuru ja muut, 2025). Ymmärtämällä haasteet ja ottamalla ne huomioon yritykset voivat kuitenkin saavuttaa merkittävää kilpailuetua.

Tutkielman alussa käsitellään ensin IoT:n ja AI:n merkitystä tuotannossa yleisellä tasolla sekä perehdytään niiden yhdistämiseen ja sen vaikutuksiin. Tämän jälkeen keskitytään niiden avulla toteutettavaan tuotannon optimointiin, esitellään tavoitteita ja erilaisia menetelmiä. Lisäksi käsitellään sovelluskohteita ja käydään läpi niiden tuomia haasteita ja hyötyjä. Lopuksi käydään läpi seuraavia kehitysaskelia.

Tämä kandidaatintutkielma on suunnattu yritysten henkilöstölle, jotka työskentelevät tuotannon ja/tai sen laadun kehittämisen parissa. Se sopii myös kaikille, joita kiinnostaa tekoälyn vaikutus teollisuuteen ja tuotantoprosesseihin.

Oma kiinnostukseni AI:hin ja IoT:hen on kasvanut opintojen ja työkokemuksen kautta. Olen työskennellyt kahtena kesänä ABB:llä taajuusmuuntajien tuotannossa Helsingissä. Tämä on herättänyt kiinnostukseni siihen, millaisia haasteita tuotannossa esiintyy, ja miten niitä mahdollisesti voitaisiin tulevaisuudessa ratkaista teknologioiden avulla.

Tutkielman tekemisessä on hyödynnetty apuna tekoälyä. Lähteitä on haettu Tekoälyn avulla. Tekoälyä on myös käytetty apuna rakenteen suunnittelussa ja sisällysluettelossa.

2 Teollinen internet ja tekoäly tuotannossa

Teollisuuden digitalisaatio on tuonut mukanaan teknologioita, joiden avulla tuotantoa voidaan ohjata aiempaa tarkemmin ja tehokkaammin. Näistä keskeisimpiä ovat teollinen internet (IIoT) ja tekoäly (AI). Yhdessä ne muodostavat perustan älykkäille tuotantojärjestelmille ja tukevat neljännen teollisen vallankumouksen kehitystä (Kagermann ja muut, 2013).

Teollisella Internetillä (Industrial Internet of Things, IIoT) viitataan tuotantoympäristöihin, joissa laitteet, koneet ja sensorit on liitetty verkkoon reaaliaikaista tiedonkeruuta varten. IIoT mahdollistaa tuotannon tilan jatkuvan seurannan ja kerätyn datan hyödyntämisen prosessien ohjauksessa sekä päätöksenteossa (Ahmed ja muut, 2023).

Tekoälyllä (Artificial Intelligence, AI) tarkoitetaan tietojärjestelmiä ja algoritmeja, jotka kykenevät analysoimaan dataa, oppimaan datan perusteella, ja tuottamaan ennusteita tai suosituksia. Teollisessa tuotannossa tekoälyä hyödynnetään erityisesti suurten datamäärien käsittelyyn, laadunvalvontaan, prosessien optimointiin ja ennakoivaan kunnossapitoon (Plathottam ja muut, 2023).

2.1 Industrial Internet of Things (IIoT) perusperiaatteet

IIoT:n perusperiaatteita ovat laitteiden verkottuminen, datan keruu ja analysointi, sekä älykkäiden sovellusten hyödyntäminen tuotannon eri tasoilla (Xu ja muut, 2018). Sensorit ja laitteet yhdistetään verkkoon, jolloin laitteita voidaan seurata reaaliajassa ja pystytään reagoimaan mahdollisiin poikkeuksiin.

IIoT ja IoT eroavat toisistaan siten, että IIoT:ta käytetään erityisesti teollisuuden eri tarpeisiin. Teollisessa ympäristössä korostuu datan luotettavuus, järjestelmien toimivuus ja kyberturvallisuus. Yleensä tuotanto on kriittistä ja mahdolliset poikkeamat tuotannossa aiheuttavat kustannuksia ja vievät aikaa (Ahmed ja muut, 2023).

IIoT:n tavoitteena on luoda älykkäitä järjestelmiä, joissa kerätty tieto ohjaa toimintaa automaattisesti. Tällöin voidaan saavuttaa parempaa tehokkuutta ja vähentää häiriöitä ja poikkeamia (Kagermann ja muut, 2013).

IIoT-ympäristössä erilaiset sensorit ja laitteet keräävät dataa tuotantoprosesseista. Kerätty data siirretään verkon kautta esim. pilvipalveluihin tai yksityisille palvelimille. Siirrettyä dataa voidaan analysoida erilaisilla ohjelmistoilla ja käyttää apuna myös tekoälypohjaisia menetelmiä. Ohjelmien avulla voidaan seurata ja ohjata tuotantoa reaaliajassa. Kaikki nämä luovat kokonaisuuden, jossa jokainen osa-alue tukee päätöksen tekoa ja prosessien optimointia (Xu ja muut, 2018; Gupta ja muut, 2022).

2.2 Tekoälyn rooli tuotannossa

Yksi tekoälyn sovellusalueista on ennakoiva kunnossapito (PdM). Datan ja koneopin avulla pystytään arvioimaan, milloin laite on rikkoutumassa ja huoltaa laite ennen kuin se rikkoutuu. Näin pystytään välttämään tuotannon katkoksia ja myös pidentämään laitteiden käyttöikää (Varalakshmi & Kumar, 2025).

Toinen sovellusalue on laadunvalvonta. AI:n avulla voidaan tunnistaa kuvia, joissa sensorit ja koneoppi havaitsevat tuotannossa tapahtuvia virheitä nopeammin ja tarkemmin kuin ihminen (Hasan ja muut, 2024). Tämä tukee myös reaaliaikaisuutta, kun tuotantolinjojen asetuksia voidaan säätää automaattisesti saadun data ansioista.

AI:ta voidaan myös käyttää apuna kokonaisvaltaisessa tuotannon optimoinnissa, kun halutaan tasapainottaa tuotantomääriä, toimitusaikoja ja energiankulutusta. Se tukee päätöksentekoa ja ohjaa prosesseja itsenäisesti (Ahmmed ja muut, 2024).

AI ei ole vain yksittäinen työkalu. Sen avulla yritykset voivat tehostaa tuotantoa, sen laatua, sekä vähentää kustannuksia. Tämä edellyttää laadukasta dataa, osaamista ja toimivia järjestelmiä.

2.3 IIoT:n ja AI:n arkkitehtuurista

IIoT ja AI liittyvät toisiinsa kyberfyysisissä järjestelmissä (Cyber-Physical Systems, CPS) ja älytehtaissa (Smart Factories). Kyberfyysisissä järjestelmissä fyysiset tuotantoresurssit, kuten koneet ja varastot, kytkeytyvät digitaalisiin malleihin ja ohjausjärjestelmiin. Näin reaaliaikainen data voidaan liittää suoraan tuotannon ohjaukseen. Älytehtaissa tämä viedään vielä pidemmälle. Järjestelmät vaihtavat tietoa keskenään, havaitsevat muutoksia ympäristössä ja pystyvät optimoimaan toimintaansa itsenäisesti (Hu ja muut, 2023).

Digitaalinen kaksonen (Digital Twin) on virtuaalinen vastine fyysiselle järjestelmälle. Sillä voidaan suorittaa erilaisia toimintoja ilman, että fyysistä järjestelmää jouduttaisiin muuttamaan välittömästi. Sen avulla voidaan optimoida tuotantoa, testata erilaisia tilanteita ja vähentää riskejä (Soori ja muut, 2023). Digitaaliset kaksoset voivat toimia eri tasoilla esim. laite- tai tehdasluokassa (McKinsey, 2024).

Toinen tärkeä kehityssuunta on Edge-AI, AI:n osittainen siirtäminen lähemmäksi laitteita, jonka avulla pystytään vähentämään viivettä ja verkon kuormitusta. Tämä on erityisen hyödyllistä kriittisissä ympäristöissä, joissa viiveet tai tiedonsiirron katkokset eivät ole hyväksyttäviä (Singh ja muut, 2025). Edge-AI yhdistyy CPS:ään tuottamalla nopeasti analyyseja sensoridatasta ja tekemällä paikallisia päätöksiä ilman, että kaikkea dataa lähetetään pilveen.

IIoT:n ja AI:n yhdistyminen CPS- ja älytehdasrakenteissa voi muuttaa tuotannon luonnetta radikaalisti. Se voi siirtää painopistettä manuaalisesta ohjauksesta kohti älykkäitä järjestelmiä, jotka tekevät suurimman osan päätöksistä itsenäisesti. Tämä muutos edellyttää investointeja infrastruktuuriin, uutta osaamista ja luottamusta teknologioihin, mutta tarjoaa myös mahdollisuuden merkittäviin suorituskyvyn ja joustavuuden parannuksiin.

3 Tuotannon optimoinnin näkökulmat

Tuotannon optimoinnissa on otettava huomioon asioita, joiden avulla pyritään parantamaan tuotannon ohjauksen ja -hallinnan eri osa-alueita. Näitä osa-alueita ovat esim. tehokkuus, kustannustehokkuus ja laatu (Kagermann ja muut, 2013). Industry 4.0:ssa korostuvat erilaiset teknologiat (kuva 1). Kuten CPS, IoT ja AI. Niiden avulla voidaan kerätä dataa ja resursseja, joita voidaan hyödyntää tuotannon optimoinnissa (Kagermann ja muut, 2013).

Kuva 1 Teollisuus 4.0 keskeiset teknologiat (kuva tehty itse)

3.1 Tuotannon ohjauksen perusteet

Tuotannon ohjauksella pyritään vaikuttamaan tuotannon eri vaiheisiin, kun tavoitellaan tuottavuuden, laadun ja joustavuuden parantamista. Se käsittää yleensä resurssien suunnittelun, aikataulutuksen, operaatiovirtojen hallinnan ja operatiivisen ohjauksen, joka toteutetaan yleensä käyttäen hyväksi ennakoivaa suunnittelua (Herrmann ja muut, 2022).

Industry 4.0:n keskeiset teknologiat, kuten kyberfyysiset järjestelmät, IoT ja AI, tuovat tuotannon ohjaukseen reaaliaikaisen tiedonkeruun ja analyysin. Tämä mahdollistaa joustavan ja älykkään tuotannon optimoinnin (Herrmann ja muut, 2022; Monostori ja muut, 2016)

Tuotannon optimointi keskittyy tuotantoprosessin eri muuttujien hallintaan, tavoitteena koko tuotantojärjestelmän tehokkuuden parantaminen. Tämä kokonaisvaltainen prosessi vaatii modernien teknologioiden, kuten automaation ja AI:n, hyödyntämistä yhdessä henkilöstön osaamisen ja jatkuvan prosessien kehittämisen kanssa. Tällöin tuotannon joustavuutta voidaan lisätä ja tuotantohäiriöitä minimoida, mikä parantaa yrityksen kilpailukykyä ja kannattavuutta (Delfoi, 2025; Reminet, 2023; Pinja, 2022).

3.2 Optimoinnin tavoitteet

Tuotannon tehokkuudella tarkoitetaan prosessien sujuvuutta ja resurssien optimaalista käyttöä. Tämä auttaa vähentämään hukkaa ja lyhentämään tuotantoaikoja (Delfoi, 2025). Tuotannon kustannukset ovat toinen optimoinnin tavoitteista. Se käsittää työvoiman, raaka-aineiden ja energiakulujen vähentämisen (Reminet, 2023).

Laadunvarmistus on keskeisessä roolissa asiakastyytyväisyyden ja tuotteen markkina-arvon säilyttämiseksi. Se käsittää systemaattisen valvonnan ja jatkuvan parantamisen periaatteet. Niiden avulla tuotanto pystytään pitämään tasalaatuisena (Andersson & Tikka, 1997; Lecklin, 2006). Joustavalla tuotannolla pystytään reagoimaan nopeasti muuttuviin asiakastarpeisiin ja markkinatilanteisiin.

Nykyään tuotannossa on pystyttävä huomioimaan myös kestävyystavoitteet. Tuotanto pyritään optimoimaan siten, että ympäristövaikutukset minimoidaan ja samalla turvataan taloudellinen kannattavuus (Kestävän kehityksen edistäminen, n.d.).

3.3 AI- ja IoT-pohjaiset menetelmät optimoinnissa

IoT:n avulla kerätty data toimii perustana erilaisille analytiikkasovelluksille. AI analysoi suuria määriä dataa, tunnistaa mahdolliset poikkeamat ja ehdottaa erilaisia toimenpiteitä ennakkoon.

Tekoälyn avulla pystytään automatisoimaan päätöksentekoa, mikä nopeuttaa reagointia muuttuviin olosuhteisiin. Koneoppimisen ja syväoppimisen avulla pystytään ennakoimaan laitteiden rikkoutumista, jolloin huollot pystytään ajoittamaan optimaalisesti (Spenhoff, 2022). Lisäksi tekoäly mahdollistaa laadunarvioinnin reaaliajassa, parantaen lopputuotteen laatua ja vähentäen kustannuksia.

IoT-pohjaiset menetelmät tukevat tuotannon optimointia tarjoamalla reaaliaikaisen ja yksityiskohtaisen näkymän tuotantoprosessiin. Sensorit ja laitteet keräävät dataa jatkuvasti koneiden toiminnasta ja tuotteen laadusta. Tämä mahdollistaa tuotannon ketteryyden ja joustavuuden (Hurja.fi, 2025).

Esimerkkinä AI:n ja IoT:n mahdollisuuksista on tekoälyn käyttö itsenäisesti tuotantolinjaston optimoinnissa. Sillä voidaan parantaa energia- ja materiaalitehokkuutta, vähentää jätettä ja päästöjä. AI ja IoT ovatkin avainasemassa tulevaisuuden tehokkaassa ja kestävän kehityksen mukaisessa tuotannossa (Hurja.fi, 2025).

4 Keskeiset sovelluskohteet

Älykkäiden teknologioiden keskeisiä sovelluskohteita ovat ennakoiva kunnossapito, laadunvalvonta sekä tuotantolinjan reaaliaikainen optimointi. Ennakoiva kunnossapito perustuu koneiden ja laitteiden jatkuvaan seurantaan, jonka avulla voidaan ennustaa vikaantumisia ja minimoida tuotantokatkot (Hector ja muut, 2024). Laadunvalvonta puolestaan hyödyntää anturidataa ja tekoälyä tuotantoprosessin seuraamiseen ja virheiden havaitsemiseen reaaliajassa, mikä auttaa pitämään tuotteen laadun tasaisena (Okuyelu & Adaji, 2024). Tuotantolinjan reaaliaikaisessa optimoinnissa käytetään koneoppimismalleja ja muita algoritmeja, joiden avulla voidaan säätää tuotantoprosessia sujuvasti ja tehokkaasti vastaamaan muuttuvia tarpeita (Ehlhardt ja muut, 2023). Hyödyntämällä älyteknologioita, yritykset pystyvät vastaamaan paremmin nykypäivän kilpailu- ja markkinaolosuhteisiin. Seuraavissa alaluvuissa keskitytään näihin kolmeen sovelluskohteeseen tarkemmin.

4.1 Ennakoiva kunnossapito (Predictive Maintenance)

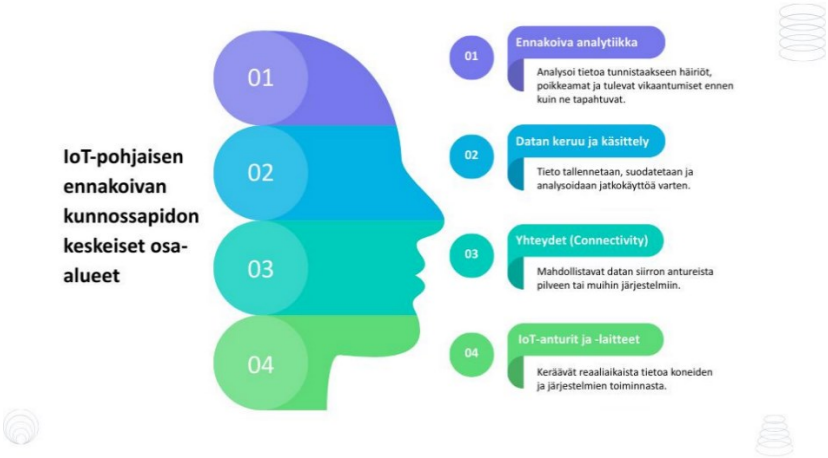
Ennakoiva kunnossapito on merkittävä osa kehitystä teollisessa kunnossapidossa. Reaktiivisesta ja ennalta suunnitellusta huollosta siirrytään ylläpitoon, joka perustuu reaaliaikaisuuteen ja kerättyyn dataan. IoT-sensorien ja tekoälyn avulla kerätään dataa esim. laitteiden värähtelystä, lämpötilasta ja käyttösykleistä. Aineistoa analysoidaan koneopin ja edistyneiden analytiikan keinoilla. Tämä mahdollistaa vikojen ennustamisen ja optimaaliset huoltoaikataulut (Hector ja muut, 2024)

Ennakoiva kunnossapito on yleistynyt runsaasti monilla eri teollisuuden aloilla. Kuten valmistavassa teollisuudessa, ilmailussa ja prosessiteollisuudessa. Niissä ennakoiva kunnossapito on tuonut merkittäviä parannuksia käyttöasteeseen, luotettavuuteen ja kestävyyteen. Yksi keskeisistä periaatteista on hyödyntää koneoppimismalleja. Tällöin pystytään ennustamaan laitteen vikaantuminen etukäteen (Benhanifia ja muut, 2025).

Digitaalisella kaksosella on myös kasvava rooli ennakoivassa kunnossapidossa. Se on laitteen virtuaalinen malli, jonka avulla pystytään simuloimaan laitteen toimintaa, seuraamaan laitteen kuntoa ja tekemään tekoälypohjaisia päätöksiä. Tämä parantaa ennustamisen tarkkuutta ja läpinäkyvyyttä etenkin monimutkaisessa tuotannossa. (Abd ja muut, 2024)

Ennakoivan kunnossapidon ratkaisut etenevät monivaiheisesti. Data kerätään sensoriverkoista, data muokataan ja valitaan keskeiset muutostekijät, ja sitten sovelletaan valvottua koneoppimista häiriöiden tunnistamiseen ja laitteen iän ennustamiseen (Hector ja muut, 2024; Mallioris ja muut, 2024). Ennusteet saattavat laukaista huoltopyyntöjä kunnossapitotiimille. Tämä tehostaa resurssien käyttöä ja niiden budjetointia. Tutkimusten mukaan ennakoiva kunnossapito ei ainoastaan laske kustannuksia ja paranna huollon suunnittelua, vaan se pidentää myös tuotantolaitteiden käyttöikää ja pienentää niiden energiankulutusta (Raj ja muut, 2024).

Ennakoivassa kunnossapidossakin on omat haasteensa. Niitä on mm. tuoton mittaamisen standardointi ja vanhojen järjestelmien integrointi moderneihin pilvipohjaisiin analytiikka-alustoihin.



Kuva 2 IoT- Pohjaisen ennakoivan kunnossapidon keskeiset osa-alueet (kuva tehty itse)

4.2 Laadunvalvonta ja prosessiseuranta

Perinteiset laadunvalvontamenetelmät ovat aikaa vieviä, alttiita virheille, eivätkä tunnista mikroskooppisia virheitä, jotka voivat olla oleellinen osa tuotteen toimivuutta (Quality Magazine, 2025). Jotta mikroskooppiset virheetkin saadaan poistettua tuotannosta, moni yritys on ottanut käyttöön automatisoidun laadunvalvonnan.

IoT-sensorit ovat tärkeä osa laadunvalvontaa. Niiden avulla pystytään seuraamaan tuotantoparametreja, kuten lämpötilaa, kosteutta ja tärinää (GAO Tek, 2024). Sensorit tuottavat reaaliaikaista dataa mahdollistaen erilaisten poikkeamien välittömän tunnistamisen laatustandardeista ja korjaavien toimenpiteiden käynnistämisen ennen vikojen syntyä. Tämä lähestymistapa varmistaa, että optimaaliset ympäristöolosuhteet säilyvät koko tuotannon ajan. Tämä on tärkeää esim. lääketeollisuudessa ja elektroniikkateollisuudessa (GAO Tek, 2024).

Myös tekoälypohjaiset järjestelmät ovat osa laadunvalvontaa. Tekoälyyn liittyvä syväoppiminen on yksi keskeisistä asioista. Syväoppimiseen perustuvat teknologiat

pystyvät käsittelemään jopa 67 000 profiilia sekunnissa edistyneitä kuvantamismenetelmiä käyttäen. Niiden löytämien virheiden havaitsemisaste on jopa 90 % korkeampi kuin perinteisissä manuaalisissa tarkastusmenetelmissä (Jidoka Technologies, 2025). Järjestelmät oppivat koko ajan uutta uusista dataseteistä ja pystyvät näin vähentämään uudelleenohjelmoinnin tarvetta ja soputumaan dynaamisesti tuotannon vaihteluihin. Robotit, jotka ovat näköohjattuja ja varustettu 2D- ja 3D -sensoreilla, pystyvät tekemään monipuolisia tarkistuksia poikkeuksellisella tarkkuudella yhdistämällä poikkeamien tunnistusalgoritmeja robotin tarkkuuteen reaaliaikaisessa kokoonpanon varmistuksessa (Jidoka Technologies, 2025).

IoT:n ja AI:n yhdistäminen reaaliaikaiseen laadun ja prosessin seurantaan tuo valmistajille monia hyötyjä. Kun tuotantoa seurataan jatkuvasti, laatuongelmat voidaan havaita ja korjata heti, jolloin kokonaisia tuotantoeriä ei mene hukkaan (Shanmugam, 2024). Ennakoiva analytiikka mahdollistaa ennakoivan laadunhallinnan ja tunnistaa ongelmat ennen niiden ilmenemistä. Lisäksi automaattinen tarkastus vähentää käsin tehtävien tarkistusten tarvetta, jolloin työntekijät voivat keskittyä tärkeämpiin tehtäviin ja laatu pysyy tasaisena kaikilla vuoroilla ja tuotantolinjoilla (Peerbits, 2025).

Edge-analytiikan ja IIoT:n avulla pystytään parantamaan laadunvalvontaa ja prosessiseurantaa mahdollistamalla laitteissa tapahtuva päätöksenteko millisekuntien viiveellä. Tuotantolaitokset käyttävät sensoriverkkoja, joiden avulla kerätään dataa koneiden tilasta ja tuotantoparametreista. Käsitellyn tiedon avulla mahdollistetaan välittömät korjaavat toimenpiteet silloin, kun laaturajat ylittyvät (Jidoka Technologies, 2025). Tämän avulla voidaan vähentää jopa 70 % virheistä. Tämä varmistaa nopeammat vasteajat ja minimoi laatuongelmien ilmenemisen riskejä (Jidoka Technologies, 2025).

Prosessiseuranta on osa nykyaikaista tuotannonhallintaa. Tilastollisen prosessiohjauksen (SPC) pystytään tunnistamaan prosessien vaihtelut ja saamaan ne hallintaan ennen kuin ne johtavat laatuongelmiin (Teradata, 2025). IoT-sensorit keräävät jatkuvasti dataa kriittisistä prosessiparametreista, kuten lämpötilasta ja paineesta, jonka

analytiikkajärjestelmät analysoivat tilastollisin menetelmin ja koneoppimisen avulla (IoT for All, 2024).

Prosessin poiketessa normaalista järjestelmät hälyttävät operaattorin ja käynnistävät automaattisia korjaustoimenpiteitä (Wolniak & Grebski, 2024). Prosessiseurannan avulla pystytään vähentämään hukkakappaleiden määrää, parantamaan tuotteiden laatua ja optimoimaan energian- ja raaka-aineiden käyttöä (Finkova, 2025; Peerbits, 2025). Pilvipalveluiden ja AI:n integrointi mahdollistaa tarkemman ja dynaamisemman tuotannon hallinnan. Tällöin prosesseja voidaan säätää reaaliajassa muuttuviin olosuhteisiin sopiviksi (Siemens Digital Industries, 2025).

Autoteollisuus on hyvä esimerkki siitä, miten IoT:ta voidaan käyttää hyödyksi laadunvalvonnassa ja prosessien seurannassa. IoT-sensorit ja kamerajärjestelmä, joissa käytetään sinistä laseria (aallonpituus 450nm) tarkkailevat kokoonpanolinjaa reaaliajassa ja havaitsevat mahdolliset virheet heti (GAO Tek, 2024; Jidoka Technologies, 2025). Reaaliaikainen prosessiohjaus (SPC) seuraa tuotannon arvoja ja ilmoittaa heti työntekijöille, jos ne lähestyvät raja-arvoja (Jidoka Technologies, 2025).

Kun robotit yhdistetään tekoälyyn liittyviin tarkastusjärjestelmiin, tuotannossa pystytään tarkastelemaan tuhansia tarkastuskuvia sekunneissa ja havaitsemaan mittaustarkkuudessa jopa ±0.03 mm:n toleranssipoikkeama. Eli laser-kamerajärjestelmä pystyy havaitsemaan 30 mikrometrin poikkeamat tuotteen dimensioissa (GAO Tek, 2024). Järjestelmä osaa pysäyttää tuotannon ja aloittaa korjaavat toimenpiteet, jos se havaitsee virheitä. Virheiden läpäisyprosentti on saatu laskemaan 0,5 %:iin. Tämä on vähentänyt takuuvaatimuksia huomattavasti. Vastaavanlaisia tuloksia on saatu myös esim. elintarvike- ja elektroniikkateollisuudessa (GAO Tek, 2024; Jidoka Technologies, 2025).

4.3 Tuotantolinjan reaaliaikainen optimointi

Tuotantolinjan reaaliaikainen optimointi on askel kohti älykästä tuotantoa. AIoT:n avulla voidaan seurata tuotantoa jatkuvasti ja säätää asetuksia, jotta laatu ja tehokkuus pysyvät halutuissa rajoissa. Reaaliaikainen optimointi pystyy reagoimaan heti muutoksiin, laitteiden kuntoon ja kysynnän vaihteluihin. Tällöin tuotantolinja toimii parhaalla mahdollisella tavalla erilaisissa tilanteessa (Datategy, 2025).

Koneoppiminen on reaaliaikaisen optimoinnin ydin. Sen avulla pystytään käsittelemään suuria määriä dataa sensoreista, koneista ja aiemmasta tuotannosta. Algoritmit tunnistavat toistuvia kaavoja, ennustavat mahdollisia pullonkauloja ja ehdottavat parhaita asetuksia koneille, kuten esim. koneen nopeuksia, lämpötilaa ja resurssien käyttöä (Küfner ja muut, 2021). Syväoppimismallit pystyvät analysoimaan monimutkaisia tuotantoympäristöjä ja antamaan tarkkoja ohjeita (Teng, 2025).

Reunalaskennan ja hajautetun älyn perusteella voidaan myös tehostaa reaaliaikaista optimointia. Yhdessä ne pystyvät tekemään päätöksenteon suoraan tuotantolinjalla erittäin nopeasti. Sen sijaan, että kaikki tiedot lähetettäisiin pilveen käsiteltäväksi, reunalaitteet analysoivat tiedot paikan päällä ja tekevät tarvittavat muutokset heti (Grobelna, 2023). Tämä on hyödyksi erityisesti nopeissa tuotantoympäristöissä, joissa suuret viiveet voivat aiheuttaa laatu- tai turvallisuusongelmia.

Tekoälyyn perustuvat ajoitus- ja resurssinhallintajärjestelmät parantavat tuotannon suunnittelua ottamalla huomioon useita eri tekijöitä, kuten koneiden käytettävyyden, tilausten tärkeysjärjestyksen energiakulut ja huoltokatkot (RELEX Solutions, 2025). Järjestelmä voi automaattisesti muuttaa tuotantojärjestystä, siirtää tuotantoa eri linjoille, ja jakaa työntekijät ja materiaalit sen mukaan, mitä tuotannossa tapahtuu. Tämä pystytään tekemään reaaliajassa. Ennakoiva analytiikka auttaa myös tekemään toimenpiteitä etukäteen.

Älykkäät prosessinohjausjärjestelmät käyttävät IoT- sensoreita ja AI:ta valvoakseen ja säätääkseen tuotantoa ilman ihmistä. Ne oppivat jatkuvasti tuotannon datasta (Tripathi ja muut, 2022). Tällaiset järjestelmät ovat esim. lyhentäneet tuotantosyklejä 15–30 % (Astrikos AI, 2025).

5 Hyödyt ja haasteet

5.1 Teknologiset hyödyt

IoT:n ja tekoälyn käytössä ei ole kyse vain siitä, että prosessit nopeutuvat. Suurin muutos on siinä, kuinka dataa kerätään, käsitellään ja hyödynnetään. Vanhemmissa tuotantojärjestelmissä data tulee monesta eri paikasta usein viiveellä ja sattumanvaraisesti. Tietoa siirretään järjestelmien välillä käsin ja esim. yöaikaan, joka tekee kokonaisuudesta arvaamattoman (HiveMQ, 2025). Tätä kutsutaan myös nimellä ”spagettiarkkitehtuuriksi”, koska järjestelmät ovat kietoutuneet toisiinsa hankalasti. Rakenne aiheuttaa hitautta ja tuotanto ei ole ajan tasalla.

Reaaliaikainen datavirta (esim. MQTT-protokolla) muuttaa tilannetta. Sensorit ja laitteet, kuten PLC:t ja SCADA-järjestelmät, lähettävät tietoa suoraan keskitetylle alustalle reaaliajassa. Tämä toimii tehtaiden ”tiedon valtaväylänä” (HiveMQ, 2025; Dattell, 2025). Tämän seurauksena data ei jää järjestelmien omiin siiloihin. Sama reaaliaikainen tieto voidaan jakaa suoraan kunnossapitoon, laadunvalvontaan, ERP-järjestelmiin, sekä pilven eri työkaluille. Tällöin koko yrityksellä tai organisaatiolla on yhteinen näkymä tuotannosta (HiveMQ, 2025).

AI:lla pystytään muokkaamaan päätöksen tekoa kolmella eri tasolla organisaatioiden sisällä. Operaattorit saavat tekoälyltä suoraan tukea. Esimerkiksi koneoppimiseen perustuva anomalian tunnistus voi antaa ehdotuksia prosessista sekuntien sisällä. Toiseksi, kun johto käyttää analytiikkaa, se pystyy yhdistämään paljon eri prosessien tietoa. Näin voidaan nähdä suurempia ja pidemmän aikavälin ongelmia, joita ei huomattaisi, jos katsottaisiin vain yhtä prosessia kerrallaan. Kolmanneksi strategisella tasolla tekoäly yhdistää historiadatan, reaaliaikaisen datan ja markkina- ja kysyntäennusteet, jolloin yritys pystyy tekemään pitkän aikavälin päätöksiä esim. kapasiteetin lisäämisestä tai investoinneista dataan perustuen (Microsoft, 2025; IBM, 2024).

Esimerkiksi, kun uunin lämpötila nousee liian korkeaksi, järjestelmä ei vain hälytä operaattoria, vaan ilmoittaa kunnossapitotiimille, että tämä laite saattaa vaatia huoltoa seuraavien viikkojen aikana. Tieto tästä integroituu automaattisesti ERP-järjestelmään varaosien tilaamista varten. Samaan aikaan edistyneet analytiikkajärjestelmät havaitsevat, että kolme muuta uunia alkaa näyttämään samankaltaisia oireita ja ehdottavat huoltoa myös näille kolmelle uunille (HiveMQ, 2025).

5.2 Liiketoiminnalliset hyödyt

Liiketoiminnan analyysit kertovat, että IoT ja AI muuttavat jopa sen, mitä yritykset myyvät ja miten ne kilpailevat.

Perinteisesti valmistusyritykset myyvät asiakkailleen koneen tai laitteen kerralla ja tulo tulee kertaluontaisesta kaupasta. IoT ja AI mahdollistavat siirtymisen malliin, jossa ei myydä enää pelkkää tuotetta vaan myydäänkin palvelua.

Esim. moottorialalla Rolls-Royce ei enää myy pelkkiä moottoreita. Se myös huolehtii huollosta ja kunnossapidosta (Kohtamäki ja muut, 2019; Frank ja muut, 2019). Tätä kutsutaan digitaaliseksi servitisaatioksi (Digital Servitization). Tämä edellyttää IoT-sensoreita, jotka seuraavat koneen kuntoa ja suorituskykyä reaaliajassa. Tämä takaa sen, että palvelu voidaan toteuttaa luotettavasti.

Tähän palvelumalliin siirtyminen luo yritykselle uusia tulonlähteitä. Palvelun myyminen tuottaa toistuvaa tuloa ja sillä pystytään vahvistamaan asiakassuhdetta (Kohtamäki ja muut, 2019). Lisäksi yritys saa käyttöönsä dataa siitä, kuinka asiakas käyttää tuotetta. Tämä auttaa kehittämään parempia tuotteita ja saavuttamaan kilpailuetua. Eräs kemianteollisuuden yritys kertoi, että tekoälyn ansiosta uuden tuotteen kehitys lyheni kuudesta kuukaudesta noin 6–8 viikkoon, koska he pystyivät hyödyntämään asiakastietoja (Microsoft, 2025).

IBM:n tutkimuksen mukaan tekoälyyn perustuvat ennustemallit voivat parantaa kysynnän ennustetta jopa niin paljon, että varaston loppumisesta aiheutuvat tappiot voivat pienentyä jopa 65 % (IBM, 2024). Eräässä yrityksessä tekoälyratkaisut pienensivät kysynnän ennustamisen kustannuksia jopa 90 % (Microsoft, 2025). Myös ennustava kunnossapito tuo säästöjä, kun laiterikkoja pystytään ennustamaan etukäteen. Tuotantoseisakkien väheneminen luonnollisesti vähentää myös kustannuksia (HiveMQ, 2025).

On hyvä ymmärtää, että pelkkä teknologian käyttöönotto ei tuo pysyvää kilpailuetua. Jossain vaiheessa myös muut yritykset ottavat käyttöön samanlaiset IoT- ja AI-ratkaisut. Niistä tulee alalle perusvaatimus, ja kilpailuetu menetetään (Amplyfi, 2025). Kun halutaan pitkäaikaista kilpailuetua, on opittava hyödyntämään AI:n ja IoT:n avulla hankittua dataa. Ne yritykset, jotka onnistuvat parhaiten omaksumaan datajohtamisen taidot ja toimintatavat pysyvät kilpailun kärjessä. Jos tähän ei pystytä jäädään markkinoilla näkymättömäksi (Microsoft, 2025; Amplyfi, 2025).

5.3 Haasteet ja rajoitukset

Tutkielmassa on käyty läpi positiivisia asioita. On kuitenkin hyvä muistaa, että on olemassa myös haasteita, kuten tietoturvariskit, korkeat investointikustannukset ja osaamisen puute.

Aiemmissa kappaleissa on käyty läpi, kuinka IoT- ja tekoälyjärjestelmät keräävät ja käsittelevät suuria määriä sensoridataa. Tähän liittyy tietoturvan ja kyberhyökkäyksen riski. Prosessit ja kriittiset järjestelmät voivat joutua mm. palvelunestohyökkäysten, tietojen muokkaamisen tai luvattoman käytön kohteiksi. Koska laitteita ja erilaisia järjestelmiä on paljon ja ne ovat usein eri paikoissa, on yhden selkeän ja kattavan tietoturva-arkkitehtuurin rakentaminen vaikeaa (SecureIT World, 2025). Myös turvastandardien puute tekee yrityksistä varovaisia ja käyttöönotto vie paljon aikaa (Device Authority, 2025).

AIoT:n käyttöönotto voi olla hyvin kallista. Yritykset joutuvat tekemään suuria investointeja varsinkin, kun kyse on tehtaiden infrastruktuurin päivittämisestä tai järjestelmiä pitää integroida olemassa oleviin prosesseihin (SupplyChainBrain, 2025).

Kun suuria investointeja tehdään, ei kuitenkaan ole varmuutta siitä onko tuleva tuotto positiivista vai negatiivista. Vaikutukset voivat näkyä vasta pitkän ajan kuluttua ja ne voivat olla epäsuoria tai vaikeasti määriteltäviä. Monet yritykset kokevat, että investoinnin takaisinmaksuaika on epävarma, tällöin päätöksentekokin on hidasta (World Economic Forum, 2023). Yritysten pitää suunnitella käyttöönotto huolellisesti. Siitä huolimatta on olemassa aina riski, että käyttöönotto ei onnistu halutulla tavalla. Yritykselle voi tulla ylimääräisiä kuluja ja jopa häiriöitä tuotannossa.

Päätöksentekohetkellä on myös hyvä ymmärtää, että AIoT:n käyttöönotto vaatii yrityksiltä uudenlaista osaamista. OECD:n mukaan jopa yli puolet teollisuuden työntekijöistä tarvitsee lisäkoulutusta tekoälyn ja digitalisaation oppimiseen vuoteen 2025 mennessä (OECD, 2023). Monissa yrityksissä työntekijöiltä ei kysytä tällaisista uudistuksista ja se voi aiheuttaa vastarintaa. Jos strategista suunnitteluakaan ei ole tehty kunnolla, käyttöönotto voi epäonnistua (SupplyChainBrain, 2025). Jotta yritykset onnistuvat käyttöönotossa se edellyttää selkeää muutosjohtamista ja organisaatiokulttuurin kehittämistä. Tällöin uudesta teknologiasta saadaan kaikki mahdollinen irti (World Economic Forum, 2023).

6 AIoT:n seuraavat kehitysaskeleet

IIoT:n ja AI:n kehitys jatkuu kovalla vauhdilla. Yhä suuremmassa roolissa tulee olemaan digitaaliset kaksoset ja erilaiset autonomiset järjestelmät. Samaan aikaan autonomiset järjestelmät muuttavat tuotannon toimintaa. Järjestelmät pystyvät oppimaan ja mukautumaan tilanteisiin, mikä tekee tuotannosta paljon joustavampaa (GrayMatter Robotics, 2025). Lisäksi vastuullisuuden merkitys kasvaa koko ajan. EU:n AI-laki, ISO 42001 ja NIST:n ohjeistukset ja säännökset tuovat uusia vaatimuksia esim. AI:n läpinäkyvyydelle ja sille, miten mahdollisia harhoja pyritään vähentämään (Scrut.io, 2025; Flevy, 2024).

6.1 Digitaalinen kaksonen (Digital Twin)

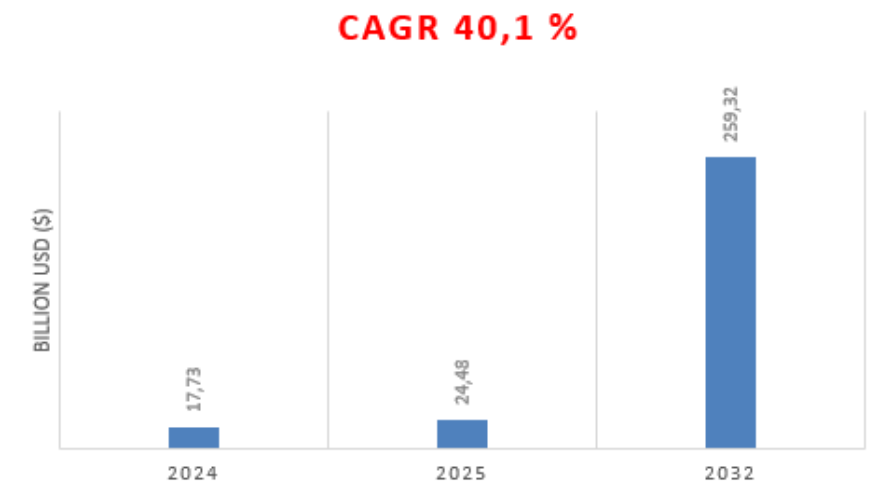
Digitaalinen kaksonen tuo uutta näkökulmaa teollisuuden toimintatapoihin. Sen avulla yhdistetään fyysinen ja virtuaalinen maailma. Digitaalinen kaksonen on päivittyvä malli fyysisestä laitteesta, prosessista tai järjestelmästä, joka saa reaaliaikaista dataa IoT-sensoreista (Simio, 2025). Se ”elää” ympäristönsä mukana, keräten tietoa, hyödyntäen AI:ta, sekä lähettää takaisin ohjaus- ja optimointiehdotuksia.

Hyöty näkyy eniten siinä, että se auttaa vastaamaan keskeisiin tuotannon kysymyksiin. Se mahdollistaa niin sanotun ”entä jos”- periaatteen (Bismart, 2025). Tällä hetkellä mm. Renault kokeilee digitaalisten kaksosten avulla erilaisia tuotemuutoksia, kokoonpanolinjojen optimointia ja testiajojen simulointia ilman fyysisiä prototyyppejä. Electrolux on puolestaan mallintanut materiaalivirtojaan ja löytänyt vastauksia, joiden avulla yritys säästi miljoonien investoinnit (Bismart, 2025).

Digitaaliset kaksoset muuttavat ennakoivaa kunnossapitoa. Sen sijaan, että laitteita huollettaisiin aikataulun tai vikojen perusteella, huolto voidaan ajoittaa todellisen kunnon mukaan. Esim. General Electric valvoo lentokoneiden moottoreita digitaalisten kaksosten avulla ja tunnistaa moottoreiden osien kulumisen ennen vian syntyä (Bismart, 2025).

Digitaalinen kaksonen toimii myös yhteisenä tiedonjakamisen alustana. Tuotanto, suunnittelu ja kunnossapito voivat käyttää samaa näkymää. Tämä vähentää siiloutumista ja nopeuttaa päätöksentekoa.

Markkinakehitys (taulukko 1) osoittaa, että niiden merkitys kasvaa suuresti. Arvioiden mukaan markkina kasvaa n. 17 miljardista (USD) n. 260 miljardiin (USD) vuoteen 2032 mennessä. Valmistavasta teollisuudesta kehittyy yksi nopeimmin kasvavista sovellusalueista (Qubit Labs, 2025). Tulevaisuudessa digitaaliset kaksoset yhdistyvät osaksi teollista metaversea, AR/VR-ympäristöjä ja simulointimoottoreita, vahvistaen fyysisen ja virtuaalisen tuotannon integraatiota (Qubit Labs, 2025; INSIA, 2025).



Taulukko 1 Digitaalisen kaksosen markkinakehitys (lähde: Qubit Labs)

6.2 Autonomiset tuotantojärjestelmät

Autonomisten tuotantojärjestelmien tulevaisuus hahmottuu, kun ymmärtää eron perinteisen automaation ja aidosti autonomisen toiminnan välillä. Perinteinen teollisuusrobotti suorittaa ennalta ohjelmoidun tehtävänsä, mutta hyvin rajallisesti. Autonomiset järjestelmät, kuten autonomiset mobiilirobotit (AMR) ja yhteistyörobotit (Cobotit) toimivat olennaisesti eri tavalla. Ne hyödyntävät tekoälyä ja koneoppimista,

jolloin ne voivat oppia tehtävistään, tehdä päätöksiä itsenäisesti ja sopeutua dynaamiseen tuotantoympäristöön ilman jatkuvaa ihmisen ohjausta (TechNode, 2025; Synox, 2025).

Cobotit eli yhteistyörobotit tuovat myös isoja muutoksia. Ne ovat suunniteltu toimimaan ihmisten rinnalla (TechNode, 2025). Niille voidaan opettaa uusia tehtäviä nopeasti näyttämällä tehtävä ihmisvoimin. Tällöin puhutaan termistä ”learning from demonstration” (BizMasterz, 2025). Näin niistä saadaan paljon joustavampia ja sopivampia ympäristöihin, joissa työtehtävät vaihtuvat usein.

Cobot-markkinan ennustetaan kasvavan noin 20 % vuodessa vuosina 2025–2029 (Robotics 247, 2025). Materiaalinkäsittely ja kokoonpano muodostavat yli puolet cobottien käyttökohteista, mutta myös uusia käyttöalueita tulee koko ajan. Tällaisia ovat mm. hitsaus, testaus ja maatalous (Robotics 247, 2025).

Vaikka teknologia kehittyykin nopeasti, suurin haaste liittyy osaamiseen. Järjestelmät voivat olla asiakkaalle helppoja käyttää, mutta niiden asennus ja huolto vaativat uutta osaamista. Teollisuudessa kärsitään jo nyt osaajapulasta autonomisten järjestelmien suhteen (SACA, 2022). Tulevaisuudessa kyse ei ole pelkästään teknologian käyttöönotosta, vaan myös siitä, miten yritykset kouluttavat työntekijöitä ja kehittävät uusia rooleja, joissa korostuvat valvonta, järjestelmien optimointi ja innovatiivinen ongelmanratkaisu (IFR, 2024).

6.3 Sääntely, standardit ja vastuullisuusnäkökulmat

AIoT:n tulevaisuus teollisuudessa ei riipu pelkästään teknologian kehityksestä, vaan myös siitä, millaisiin sääntely- ja vastuullisuusvaatimuksiin niitä jatkossa sidotaan. Aiemmin sääntely keskittyi turvallisuuteen, mutta nyt se kohdistuu siihen, miten algoritmit tekevät päätöksiä ja kuka niistä lopulta vastaa.

EU:n tekoälylaki, joka astui voimaan elokuussa 2024, on ensimmäinen laaja tekoälyä koskeva lainsäädäntö. Se koskee kaikkia EU:ssa käytettäviä AI- järjestelmiä ja jakaa ne eri riskitasoihin. Riskitasoja ovat mm. kielletty, korkea riski, rajattu riski ja minimaalinen riski (PwC, 2024; Zazoon, 2025). Monet teollisuuden AI- sovellukset, kuten turvallisuuteen ja henkilöstöön liittyvät optimointijärjestelmät kuuluvat korkeaan riskitasoon, jolle asetetaan tiukkoja vaatimuksia, kuten riskiarvioita, dokumentaatiota ja ihmisen valvontaa (SecureFrame, 2025). Lisäksi AI:n parissa työskenteleviltä edellytetään riittävää osaamista helmikuusta 2025 alkaen. Lain rikkomisesta voi seurata jopa kymmenen miljoonien eurojen sakot (Zazoon, 2025).

Lakien rinnalle on tullut myös vapaaehtoinen ISO/IEC 42001-standardi, joka antaa organisaatiolle selkeän kehyksen AI- järjestelmien hallintaan (EY, 2025). Se korostaa turvallisuutta, oikeudenmukaisuutta, läpinäkyvyyttä ja datan laatua. ISO 42001 on käytössä ns. ”elävänä johtamisjärjestelmänä”, jota ylläpidetään jatkuvasti.

Keskeinen vaatimus nykyisessä sääntelyssä on selitettävä tekoäly (XAI). Korkean riskin järjestelmien täytyy pystyä antamaan ymmärrettävät perustelut päätöksilleen, esim. miksi ennakoiva kunnossapito suosittelee tiettyä huoltotoimenpidettä (SecureFrame, 2025; AIGN Global, 2024). Samalla organisaatioiden täytyy määritellä selkeästi, kuka vastaa AI-järjestelmistä. Vastuun pitäisi olla ihmisillä, ei algoritmeilla.

Yritykset joutuvat tasapainoilemaan eri sääntelyiden välillä. Toisaalta täysin läpinäkyvän tekoälyn rakentaminen ei ole edes järkevää (ComplexNexus, 2025). Myös AI-sovellusten riskiluokittelu voi olla haastavaa, koska rajat eivät ole selkeitä. Tästä huolimatta ne yritykset, jotka ottavat vastuullisuuden ja sääntelyn vakavasti, kerryttävät kilpailuetua tulevaisuudessa. Ennakoiva ja läpinäkyvä tapa rakentaa AI-pohjaisia järjestelmiä lisää luottamusta ja helpottaa teknologioiden käyttöönottoa (PwC, 2024; SecureFrame, 2025).

7 Yhteenveto ja johtopäätökset

Tutkielma on tarkastellut, miten teollinen internet (IoT) ja tekoäly (AI) vaikuttavat tuotannon optimointiin. Työn aikana on tullut selväksi, että nämä teknologiat eivät ole enää tulevaisuuden näkökulma, vaan ne ovat osa arkipäivää. Ne muuttavat sitä, miten tuotantoa ohjataan ja miten prosesseja kehitetään.

IoT:n ja AI:n yhdistäminen siirtää teollisuuden reaktiivisesta toiminnasta kohti proaktiivista toimintaa. Reaaliaikainen data ja sen analysointi mahdollistavat tehokkaamman kunnossapidon, laadunvalvonnan ja prosessihallinnan. Konkreettiset esimerkit osoittavat, että hyöty ei ole vain teoreettinen, vaan tulokset näkyvät myös tuotannon tasolla ja mitattavina parannuksina. Lisäksi teknologiat vaikuttavat päätöksentekoon.

Liiketoiminnan näkökulmasta IoT ja AI eivät vain tehosta tuotantoa, vaan myös muuttavat ansaintamalleja. Palvelullistuminen eli digitaalinen servitisaatio mahdollistaa jatkuvat tulovirrat ja läheisemmät asiakassuhteet. Samalla kilpailuetu rakentuu yhä enemmän datan ja analytiikan hyödyntämiseen.

Tutkielmassa nousi esille myös keskeisiä haasteita, kuten tietoturva, investointikustannukset, osaamisvaje, datan laatu ja järjestelmien yhteentoimivuus. Nämä eivät ole vain teknisiä pulmia, vaan strategisia kysymyksiä, jotka on kyettävä ratkaisemaan.

Digitaaliset kaksoset, autonomiset järjestelmät ja AI:n vastuullisuussääntely muodostavat kokonaisuuden, joka muokkaa teollisuuden seuraavaa kehitysvaihetta. EU:n tekoälylaki ja ISO 42001 korostavat, että AI:n täytyy olla läpinäkyvää ja vastuullista, muuten sen käyttö voi vaikeutua tai käytännössä estyä kokonaan.

Johtopäätöksenä voidaan todeta, että AIoT ei ole enää teollisuudelle valinnainen ratkaisu. Se on välttämätön, jos yritys haluaa pysyä kilpailukykyisenä. Todellinen

kilpailuetu syntyy siitä, kuinka hyvin yritys pystyy muuttamaan toimintatapojaan, kehittämään osaamistaan ja ottamaan teknologian käyttöön vastuullisesti. Yritykset, jotka tarttuvat haasteisiin ajoissa, voivat rakentaa pysyvän kilpailuedun.

Lähteet

Abd Wahab, N. H., Ismail, M., Salleh, K. A., & Othman, M. (2024). *Systematic review of predictive maintenance and digital twin technologies challenges, opportunities, and best practices.* Noudettu 27.10.2025 osoitteesta https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38686003/

Ahmmed, M. S., Hossain, M. S., Andersson, K., & Rahman, M. (2024). *Promoting Synergies to Improve Manufacturing Efficiency in Industrial Material Processing: A Systematic Review of Industry 4.0 and AI.* Noudettu 14.10.2025 osoitteesta https://www.mdpi.com/2075-1702/12/10/681

AIGN Global. (2024). *What measures are necessary to promote transparency and accountability in AI development*? Noudettu 17.11.2025 osoitteesta https://aign.global/ai-governance-insights/patrick-upmann/what-measures-are-necessary-to-promote-transparency-and-accountability-in-ai-development/

Amplyfi. (2025). *AI adoption in manufacturing: Strategic intelligence for decision makers*. Noudettu 11.11.2025 osoitteesta https://www.amplyfi.com/reports/ai-adoption-in-manufacturing

Andersson, P., & Tikka, H. (1997). *Mittaus- ja laatutekniikat*. Porvoo: WSOY.

Astrikos AI. (2025*). How AI and IoT Are Driving Hyper – Automation in Manufacturing*. Noudettu 30.10.2025 osoitteesta https://astrikos.ai/how-ai-and-iot-are-driving-hyper-automation-in-manufacturing/

Benhanifia, A., Amirat, A., Benhar, Z., et al. (2025). *Systematic review of predictive maintenance practices in the manufacturing sector*. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. Noudettu 27.10.2025 osoitteesta https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2667305325000274

Bismart. (2025). *The digital twin revolution: Real-time business simulations.* Noudettu 17.11.2025 osoitteesta https://blog.bismart.com/en/digital-twin-revolution

BizMasterz. (2025). *Robotics and automation in the smart factory*. Noudettu 17.11.2025 osoitteesta https://bizmasterz.com/robotics-and-automation-in-the-smart-factory/

ComplexNexus. (2025). *The role of AI governance in ensuring transparency and accountability*. Noudettu 17.11.2025 osoitteesta https://complynexus.com/the-role-of-ai-governance-in-ensuring-transparency-and-accountability/

Datategy. (2025). *How AI drives operational excellence in manufacturing industry*. Noudettu 10.11.2025 osoitteesta https://www.datategy.net/2025/01/07/how-ai-drives-operational-excellence-in-manufacturing-industry/

Dattell. (2025). *Architecting a secure and scalable IoT data pipeline for industry 4.0*. Noudettu 11.11.2025 osoitteesta https://dattell.com/data-architecture-blog/architecting-an-iot-data-pipeline-for-industry/

Delfoi. (2025). *Miksi tuotannon optimointi on tärkeää teollisuudessa*? Noudettu 14.10.2025 osoitteesta https://delfoi.com/fi/artikkelit/miten-optimoida-tuotantoa-teollisuudessa/

Device Authority. (2025). Internet of things and cybersecurity*: Emerging trends, challenges and solutions*. Noudettu 5.11.2025 osoitteesta https://deviceauthority.com/internet-of-things-and-cybersecurity-emerging-trends-challenges-and-solutions/

Ehlhardt, J., Ahmad, A., Wolf, I., & Engell, S. (2023*). Real-time optimization using machine learning models applied to the 4,4'-diphenylmethane diisocyanate production process*. Chemie Ingenieur Technik. Noudettu 27.10.2025 osoitteesta https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/cite.202200244

EY. (2025). *ISO 42001: Understanding the role of ISO 42001 in achieving responsible AI*. Noudettu 17.11.2025 osoitteesta https://www.ey.com/en_us/insights/ai/iso-42001-paving-the-way-for-ethical-ai

Finkova. (2025). *Miten virtausmittarin data integroidaan tehtaan järjestelmiin?* Noudettu 29.10.2025 osoitteesta https://finkova.fi/miten-virtausmittarin-data-integroidaan-tehtaan-jarjestelmiin/

Flevy. (2024). *What role does ethical AI play in Industry 4.0, and how can companies ensure they adhere to ethical guidelines while leveraging AI technologies?* Noudettu 14.11.2025 osoitteesta https://flevy.com/topic/industry-4-0/question/ethical-ais-impact-industry-4-0-compliance-strategies?srsltid=AfmBOoqrC4uZ8Ll_S_nabnkhM0FxPaMPjQenng8a6coYGzJUYSLzyhvg

Frank, A. G., Mendes, G. H. D. S., Ayala, N. F., & Ghezzi, A. (2019). *Servitization and Industry 4.0 convergence in the digital transformation of product firms: A business model innovation perspective*. Noudettu 11.11.2025 osoitteesta https://www.researchgate.net/publication/330493394_Servitization_and_Industry_40_convergence_in_the_digital_transformation_of_product_firms_A_business_model_innovation_perspective

GAO Tek. (2024). *Application of IoT sensors in quality control*. Noudettu 29.10.2025 osoitteesta https://gaotek.com/application-of-iot-sensors-in-quality-control/

GrayMatter Robotics. (2025). *The future of manufacturing: Trends in industrial robotics*. Noudettu 14.11.2025 osoitteesta https://graymatter-robotics.com/the-future-of-manufacturing-trends-in-industrial-robotics/

Grobelna, I. (2023). *Intelligent industrial process control systems*. Noudettu 30.10.2025 osoitteesta https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10422448/

Gupta, P., Dey, N., & Singh, A. K. (2022). *Industrial internet of things in intelligent manufacturing: a review, approaches, opportunities, open challenges, and future directions*. Noudettu 14.10.2025 osoitteesta https://www.researchgate.net/publication/364611802_Industrial_internet_of_things_in_intelligent_manufacturing_a_review_approaches_opportunities_open_challenges_and_future_directions

Hasan, M. ja muut. (2024). *AI-driven quality control in manufacturing and construction: Enhancing Precision and Reducing Human Error*. Noudettu 14.10.2025 osoitteesta https://www.researchgate.net/publication/393766223_AI-Driven_Quality_Control_in_Manufacturing_and_Construction_Enhancing_Precision_and_Reducing_Human_Error

Hector, I., Panjanathan, R., & Galán, J. M. (2024*). Predictive maintenance in Industry 4.0: A survey of planning models and machine learning techniques*. PeerJ Computer Science. Noudettu 27.10.2025 osoitteesta https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11157603/

Herrmann, J. P., Tackenberg, S., Padoano, E., & Gamber, T. (2022*). Approaches of production planning and control under Industry 4.0: A literature review*. Noudettu 11.11.2025 osoitteesta https://doi.org/10.3926/jiem.3582

HiveMQ. (2025). *Industrial IoT data streaming: What it is and how to get started*. Noudettu 11.11.2025 osoitteesta https://www.hivemq.com/blog/industrial-iot-data-streaming-what-it-is-how-to-get-started/

Hu, Y., Zhang, Y., Li, Y., & Xu, X. (2023). *Industrial Internet of Things intelligence empowering smart manufacturing: A Literature Review*. Noudettu 14.10.2025 osoitteesta 10.1109/JIOT.2024.3367692

Hurja.fi. (2025). *Tekoälyn mahdollisuudet teollisuudelle – tehoa, tarkkuutta ja säästöjä tuotantoprosesseihin*. Noudettu 15.10.2025 osoitteesta https://hurja.fi/blogi/tekoalyn-mahdollisuudet-teollisuudelle-tehoa-tarkkuutta-ja-saastoja/

IBM. (2024). *10 ways artificial intelligence is transforming operations management*. Noudettu 11.11.2025 osoitteesta https://www.ibm.com/think/topics/ai-in-operations-management

IFR (International Federation of Robotics). (2024). *The autonomous way to Industry 4.0*. Noudettu 17.11.2025 osoitteesta https://ifr.org/news/the-autonomous-way-to-industry-4.0/

INSIA. (2025). *How digital twins enhance predictive maintenance in manufacturing*? Noudettu 17.11.2025 osoitteesta https://www.insia.ai/blog-posts/digital-twins-enhance-predictive-maintenance-manufacturing

IoT for All. (2024). *10 ways IoT improves quality control in manufacturing*. Noudettu 29.10.2025 osoitteesta https://www.iotforall.com/10-ways-iot-improves-quality-control-in-manufacturing

Zertia.AI. (2025). *What Is ISO/IEC 42001:2023 and What Is This Certification For?* Noudettu 17.11.2025 osoitteesta https://zertia.ai/iso-iec-420012023-comprehensive-guide-for-ethical-ai-management-and-certification/

Jidoka Technologies. (2025). *Top AI trends in quality control automation for 2025*. Noudettu 29.10.2025 osoitteesta https://www.jidoka-tech.ai/blogs/quality-control-automation-trends

Kagermann, H., Wahlster, W., & Helbig, J. (2013*). Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0: Final report of the Industrie 4.0 working group*. Acatech – National Academy of Science and Engineering. Noudettu 14.10.2025 osoitteesta https://en.acatech.de/publication/recommendations-for-implementing-the-strategic-initiative-industrie-4-0-final-report-of-the-industrie-4-0-working-group/

Kodumuru, R., Al-Otaibi, S., Almulhim, A., & Alanazi, S. (2025). *Artificial Intelligence and Internet of Things Integration in Pharmaceutical Manufacturing: A Smart Synergy*. Noudettu 14.10.2025 osoitteesta https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11944607/

Kohtamäki, M., Parida, V., Oghazi, P., Gebauer, H., & Baines, T. (2019). *Digital servitization business models in ecosystems and platforms: A theory of the firm*. Journal of Business Research. Noudettu 11.11.2025 osoitteesta https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.06.027

Küfner, T., Schönig, S., Jasinski, R., & Ermer, A. (2021). *Vertical data continuity with lean edge analytics for industry 4.0 production*. Computers in Industry. https://doi.org/10.1016/j.compind.2020.103480

Lecklin, O. (2006). *Laatu yrityksen menestystekijänä*. Helsinki: Talentum Media Oy.

Mallioris, P., Chatzinikolaou, I., & Patrikakis, C. (2024*). Predictive maintenance in Industry 4.0: A systematic multi-sector mapping*. Noudettu 27.10.2025 osoitteesta https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1755581724000221

McKinsey & Company. (2024). *Digital twins: The next frontier of factory optimization*. Noudettu 17.11.2025 osoitteesta https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/digital-twins-the-next-frontier-of-factory-optimization

Microsoft. (2025). *AI in process manufacturing: From operational gains to strategic advantage*. Noudettu 11.11.2025 osoitteesta https://www.microsoft.com/en-us/industry/blog/manufacturing-and-mobility/manufacturing/2025/05/28/ai-in-process-manufacturing-from-operational-gains-to-strategic-advantage/

Monostori, L., Kádár, B., Bauernhansl, T., Kondoh, S., Kumara, S., Reinhart, G., Sauer, O., Schuh, G., Sihn, W., & Ueda, K. (2016). *Cyber-physical systems in manufacturing*. Noudettu 11.11.2025 osoitteesta https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.06.005

OECD. (2023). *Skill needs and policies in the age of artificial intelligence*. Noudettu 5.11.2025 osoitteesta https://www.oecd.org/en/publications/oecd-employment-outlook-2023_08785bba-en/full-report/skill-needs-and-policies-in-the-age-of-artificial-intelligence_fe530fbf.html

Okuyelu, O. & Adaji, O. (2024). *AI-driven real-time quality monitoring and process optimization for enhanced manufacturing performance*. Journal of Advances in Mathematics and Computer Science. Noudettu 27.10.2025 osoitteesta https://doi.org/10.9734/jamcs/2024/v39i41883

Peerbits. (2025). *IoT in manufacturing: Predictive maintenance and quality control*. Noudettu 29.10.2025 osoitteesta https://www.peerbits.com/blog/iot-in-manufacturing-predictive-maintenance-and-quality-control.html

Ahmed, S. F., Alam, M. S., Hinojosa-Palafox, E., León, A. L., Alqahtani, A. S., Farooqi, M. A., Khan, M. A., & Saeed, M. (2023). *Industrial Internet of Things enabled technologies, challenges, and future directions*. Computers & Electrical Engineering. Noudettu 14.10.2025 osoitteesta https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2023.108847

Pinja. (2022). *Mitä on tuotannon optimointi ja mitä sillä voi saavuttaa*? Noudettu 14.10.2025 osoitteesta https://blog.pinja.com/fi/mita-on-tuotannon-optimointi-ja-mita-silla-voi-saavuttaa

Plathottam, S. J., Krishnan, K. R., & Venugopal, R. (2023). *A review of artificial intelligence applications in manufacturing operations.* AIChE Journal. Noudettu 14.10.2025 osoitteesta https://aiche.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/amp2.10159

PwC. (2024). *What the new AI law means for you*. Noudettu 17.11.2025 osoitteesta https://www.pwc.nl/en/services/artificial-intelligence/responsible-ai/eu-ai-act.html

Quality Magazine. (2025). *AI in manufacturing: Reshaping quality control and efficiency*. Noudettu 29.10.2025 osoitteesta https://www.qualitymag.com/articles/98588-ai-in-manufacturing-reshaping-quality-control-and-efficiency

Qubit Labs. (2025). *Digital twin in manufacturing: A complete guide*. Noudettu 17.11.2025 osoitteesta https://qubit-labs.com/digital-twin-in-manufacturing-guide/

Raj, R., Kolhe, K., Gutte, V., & Kathare, L. (2024*). IoT-based predictive maintenance using AI/ML: A systematic review*. AIP Conference Proceedings. Noudettu 27.10.2025 osoitteesta https://pubs.aip.org/aip/acp/article/3028/1/020035/3302345/IoT-based-predictive-maintenance-using-AI-ML-A

RELEX Solutions. (2025). *Why production line optimization is a manufacturing must in 2025*. Noudettu 30.10.2025 osoitteesta https://www.relexsolutions.com/resources/production-line-optimization/

Reminet. (2023). *Tuotannon mallinnus: Tuotantoprosessin optimointi modernin teknologian avulla*. Noudettu 15.10.2025 osoitteesta https://reminet.fi/artikkeli/tuotannon-optimointi-takaa-tehokkaan/

Robotics 247. (2025). *Report: Collaborative robots' market poised for new growth cycle*. Noudettu 17.11.2025 osoitteesta https://www.robotics247.com/article/report_collaborative_robots_market_poised_for_new_growth_cycle

SACA. (2022). *Autonomous Mobile Robots on the Rise.* Noudettu 17.11.2025 osoitteesta https://www.saca.org/2022/07/15/autonomous-mobile-robots-on-the-rise/

SecureIT World. (2025). *Key Security Challenges and Solutions for Ensuring Data Privacy on Internet of Things (IoT*). Noudettu 5.11.2025 osoitteesta https://www.secureitworld.com/blog/key-security-challenges-and-solutions-for-ensuring-data-privacy-on-internet-of-things-iot/

SecureFrame. (2025). *How to Achieve EU AI Act Compliance and Build Trustworthy AI*. Noudettu 17.11.2025 osoitteesta https://secureframe.com/blog/eu-ai-act-compliance

Shanmugam, S. (2024). *Integrating IoT and AI for real-time quality monitoring*. Noudettu 29.10.2025 osoitteesta https://www.linkedin.com/pulse/integrating-iot-ai-real-time-quality-monitoring-subramanian-shanmugam-cjhtc/

Siemens Digital Industries Software. (2025). *Statistical process control.* Noudettu 29.10.2025 osoitteesta https://www.sw.siemens.com/en-US/technology/statistical-process-control-spc/

Simio. (2025). *Role of digital twin technology in Industry 4.0*. Noudettu 17.11.2025 osoitteesta https://www.simio.com/role-of-digital-twin-technology-in-industry-4-0/

Singh, R. K. B. ja muut. (2025). *Edge-AI empowered cyber-physical systems: A comprehensive review on performance analysis*. ScienceDirect. Noudettu 14.10.2025 osoitteesta https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1574013725000450

Soori, M., Arezoo, B., Dastres, R., & Ratnayake, R. C. (2023). *Internet of Things for smart factories in Industry 4.0, a review.* Noudettu 14.10.2025 osoitteesta https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2667345223000275

Spenhoff, P. (2022). *EPEC 4.0: an Industry 4.0-supported lean production control concept for the semi-process industry*. International Journal of Production Research. Noudettu 15.10.2025 osoitteesta https://doi.org/10.1080/09537287.2020.1864496

Scrut.io. (2025). *AI compliance: Meaning, regulations, challenges*. Noudettu 14.11.2025 osoitteesta https://www.scrut.io/post/ai-compliance

SupplyChainBrain. (2025*). Overcoming barriers to AI adoption in manufacturing: A roadmap for transformation*. Noudettu 5.11.2025 osoitteesta https://www.supplychainbrain.com/blogs/1-think-tank/post/40959-overcoming-barriers-to-ai-adoption-in-manufacturing-a-roadmap-for-transformation

Synox. (2025). *Automation and autonomous systems in Factory 4.0: towards self-directed production.* Noudettu 17.11.2025 osoitteesta https://www.synox.io/en/industry-4-0/automation-and-autonomous-systems-in-factory-4-0-towards-self-directed-production/

Kestävän kehityksen edistäminen. n.d. *Taloudellinen kestävä kehitys*. Noudettu 15.10.2025 osoitteesta https://keke.bc.fi/Kestava-kehitys/suomi/taloudellinen/

TechNode. (2025). *The rise of collaborative machines in intelligent manufacturing*. Noudettu 17.11.2025 osoitteesta https://technode.global/2025/10/23/the-rise-of-collaborative-machines-in-intelligent-manufacturing/

Teng, B. (2025). *An intelligent manufacturing system based on a recursive control structure.* Frontiers in Mechanical Engineering. Noudettu 30.10.2025 osoitteesta https://www.frontiersin.org/journals/mechanical-engineering/articles/10.3389/fmech.2024.1437198/full

Teradata. (2025). *Quality control with real-time statistical process control (SPC).* Noudettu 29.10.2025 osoitteesta https://www.teradata.com/insights/data-architecture/quality-control-with-real-time-spc

Tripathi, V., Prakash, C., & Singh, S. (2022). *Development of a data-driven decision-making system using lean and smart manufacturing concept in Industry 4.0: A case study.* Advances in Industrial Automation and Smart Manufacturing. Noudettu 2.12.2025 osoitteesta https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2022/3012215

Varalakshmi, P., & Kumar, P. (2025*). Optimized predictive maintenance for streaming data in industrial IoT networks using deep reinforcement learning and ensemble techniques.* Scientific Reports. Noudettu 27.10.2025 osoitteesta https://www.nature.com/articles/s41598-025-10268-8

World Economic Forum. (2023). *6 ways to help the manufacturing sector embrace AI*. Noudettu 5.11.2025 osoitteesta https://www.weforum.org/stories/2023/01/ai-manufacturing-sector-barriers-to-adoption/

Wolniak, R., & Grebski, W. E. (2024). *The usage of statistical process control spc in industry 4.0 conditions*. Noudettu 29.10.2025 osoitteesta https://managementpapers.polsl.pl/wp-content/uploads/2024/02/190-Wolniak-Grebski-3.pdf

Xu, H., Yu, W., Griffith, D., & Golmie, N. (2018). *A survey on industrial Internet of Things: A cyber-physical systems perspective*. IEEE Access. Noudettu 14.10.2025 osoitteesta https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2884906

Zazoon. (2025). *New EU AI requirements 2025: What companies must know*. Noudettu 17.11.2025 osoitteesta https://zazoon.com/new-eu-ai-requirements-2025-what-companies-must-know-now/