



Vaasan yliopisto
UNIVERSITY OF VAASA

Valtteri Kaukoranta

Teollinen IoT tuotantoprosessien valvonnan ja optimoinnin tukena

Tekniikan ja innovaatiojohtamisen
akateeminen yksikkö
Kandidaatin tutkielma
Automaatio ja tietotekniikka

Vaasa 2026

VAASAN YLIOPISTO
Tekniikan ja innovaatiojohtamisen akateeminen yksikkö

Tekijä:	Valtteri Kaukoranta		
Tutkielman nimi:	Teollinen IoT tuotantoprosessien valvonnan ja optimoinnin tukena		
Tutkinto:	Tekniikan kandidaatti		
Koulutusohjelma:	Automaatio ja tietotekniikka		
Opintosuunta:	Automaatiotekniikka		
Työn ohjaaja:	Timo Mantere		
Valmistumisvuosi:	2026	Sivumäärä:	40

TIIVISTELMÄ:

Tässä kandidaatintyössä tarkastellaan teollisen IoT:n eli teollisen esineiden internetin roolia tuotantoprosessien valvonnan ja optimoinnin tukena. Aihetta lähestytään teollisuuden digitalisaation ja Teollisuus 4.0 -kehityksen näkökulmasta, joissa verkottuneet järjestelmät, reaaliaikainen tiedonkeruu ja datan analysointi ovat nousseet keskeisiksi tuotannon kehittämisen välineiksi. Työn lähtökohtana on havainto siitä, että tuotantoympäristöissä syntyy jatkuvasti suuria määriä tietoa, jonka hyödyntäminen voi parantaa tuotannon hallintaa, laatua, tehokkuutta ja kunnossapitoa. Tarkastelun kohteena on erityisesti se, miten teollisen IoT:n avulla voidaan muodostaa ajantasainen tilannekuva tuotantoprosesseista ja käyttää tätä tietoa tuotannon ohjaamisen ja kehittämisen tukena.

Työn tavoitteena on selvittää, miten teollista IoT:tä hyödynnetään tuotantoprosessien reaaliaikaisessa valvonnassa, millä tavoin se tukee tuotannon optimointia ja ennakoivaa kunnossapitoa sekä mitä keskeisiä hyötyjä ja haasteita sen käyttöön liittyy teollisissa ympäristöissä. Työssä on tarkasteltu myös automaation kehitystä kohti verkottuneita tuotantojärjestelmiä, teollisen IoT:n suhdetta Teollisuus 4.0 -ajatteluun sekä ISA-95-mallia tuotantojärjestelmien rakenteellisena viitekehityksenä.

Työ on toteutettu kirjallisuuskatsauksena. Aineiston avulla on muodostettu kokonaiskuva niistä teknologioista, järjestelmärakenteista ja sovellusalueista, joihin teollisen IoT:n hyödyntäminen tuotannossa perustuu. Tarkastelussa on keskitytty erityisesti antureihin, tiedonkeruuseen, datavirtoihin, valvontajärjestelmiin, data-analytiikkaan, digitaalisiin kaksosiin, laadunvalvontaan sekä kunnossapidon ratkaisuihin.

Työn perusteella on havaittu, että teollinen IoT tukee tuotantoprosessien valvontaa mahdollistamalla jatkuvan tiedonkeruun, poikkeamien varhaisen havaitsemisen ja tuotannon tilan reaaliaikaisen seurannan. Samalla se tukee tuotannon optimointia tarjoamalla ajantasaista dataa päätöksenteon, resurssien käytön, laadun kehittämisen ja kunnossapidon suunnittelun tueksi. Erityisen merkittäväksi on osoittautunut tuotannosta kerätyn datan rooli ennakoivassa kunnossapidossa, kunnonvalvonnassa ja tuotannon suorituskyvyn analysoinnissa. Tarkastelun perusteella on kuitenkin todettu, että teollisen IoT:n käyttöönottoon liittyy myös merkittäviä haasteita. Näitä ovat erityisesti tietoturva, järjestelmien integraatio ja yhteensopivuus sekä käyttöönoton kustannukset ja osaamisvaatimukset.

Johtopäätöksenä voidaan todeta, että teollinen IoT muodostaa keskeisen osan modernia ja verkottunutta tuotantoa. Sen merkitys ei rajoitu pelkästään tuotannon valvontaan, vaan se luo perustan myös datalähtöiselle optimoinnille, ennakoinnille ja tuotantojärjestelmien jatkuvalla kehittämiselle.

AVAINSANAT: esineiden internet, valvonta, optimointi, kunnonvalvonta, digitaalinen kaksoinen, teollisuus

Sisällys

1	Johdanto	5
2	Automaation ja IoT:n perusteet	7
2.1	Automaation kehitys	7
2.2	Esineiden internet	8
2.3	Teollinen IoT	8
2.4	Teollisuus 4.0 ja sen keskeiset teknologiat	9
3	Tuotannon järjestelmäarkkitehtuuri	12
3.1	ISA-95 osana tuotantojärjestelmien arkkitehtuuria	12
3.2	ISA-95-mallin tasot	13
3.3	ISA-95 ja teollinen IoT	15
4	IIoT tuotantoprosessien valvonnassa	17
4.1	Valvonnan tavoitteet	17
4.2	Anturit ja tiedonkeruu	18
4.3	Datavirta kentältä järjestelmiin	19
4.4	Valvontajärjestelmät	21
5	IIoT tuotannon optimoinnin tukena	23
5.1	Tuotantoprosessien optimointi ja datalähtöinen päätöksenteko	23
5.2	Digitaalinen kaksonen tuotannon optimoinnin tukena	25
5.3	Tehokkuuden ja laadun parantaminen	26
5.4	Ennakoiva kunnossapito ja kunnon valvonta	27
5.5	Kirjallisuudessa esitetyjä sovellusesimerkkejä	28
6	IIoT:n haasteet teollisessa käytössä	30
6.1	Tietoturva	30
6.2	Järjestelmien integrointi	32
6.3	Käyttöönoton kustannukset ja osaamisvaatimukset	33
7	Johtopäätökset ja yhteenveto	36
	Lähteet	38

Kuvat

Kuva 1. ISA-95-mallin tasot (ISA, n.d.).	13
Kuva 2. Reaaliaikainen datavirta.	19

Taulukot

Taulukko 1. Perinteisen ja IIoT-pohjaisen tuotantoympäristön vertailu.	15
Taulukko 2. Reunalaskennan ja pilvilaskennan vertailu	20
Taulukko 3. Valvonnan ja optimoinnin vertailu.	24
Taulukko 4. IIoT:n hyödyt ja haasteet.	35

Lyhenteet

ERP	Enterprise Resource Planning, toiminnanohjausjärjestelmä
HMI	Human Machine Interface, ihmisen ja koneen välinen käyttöliittymä
ICS	Industrial Control Systems, teolliset ohjausjärjestelmät
IIoT	Industrial Internet of Things, teollinen esineiden internet / teollinen IoT
IoT	Internet of Things, esineiden internet
ISA-95	ANSI/ISA-95 Enterprise-Control System Integration, yritys- ja ohjausjärjestelmien integraatiota koskeva standardi
IT	Information Technology, tietotekniikka
MES	Manufacturing Execution System, tuotannon toteutusjärjestelmä
MOM	Manufacturing Operations Management, tuotannon operatiivisen johtamisen järjestelmä
OT	Operational Technology, operatiivinen teknologia / tuotantoteknologia
PLC	Programmable Logic Controller, ohjelmoitava logiikkaohjain
RAMI 4.0	Reference Architectural Model Industry 4.0, Teollisuus 4.0:n viitearkkitehtuurimalli
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition, valvonta- ja tiedonkeruujärjestelmä

1 Johdanto

Teollinen tuotanto on viimeisten vuosikymmenten aikana muuttunut merkittävästi, kun perinteisistä, erillisistä automaatiojärjestelmistä on siirrytty kohti verkottuneempia ja digitaalisempia toimintaympäristöjä. Kehitystä on vauhdittanut erityisesti neljäs teollinen vallankumous, jonka yhteydessä tuotantolaitteiden, tietojärjestelmien ja liiketoimintaprosessien välinen tiedonvaihto on lisääntynyt huomattavasti. Tämän muutoksen keskeisenä mahdollistajana toimii teollinen esineiden internet eli Industrial Internet of Things (IIoT), jonka avulla tuotantoympäristön laitteet, anturit ja ohjausjärjestelmät voidaan liittää osaksi laajempaa tietoverkkoa.

Teollinen IoT mahdollistaa tuotantoprosesseista syntyvän tiedon jatkuvan keräämisen, siirtämisen ja hyödyntämisen. Reaaliaikaisen tuotantodatan avulla voidaan muodostaa ajantasainen kuva prosessin tilasta, havaita poikkeamia, tukea laadunvalvontaa sekä kehittää tuotannon tehokkuutta. Samalla datan rooli tuotannon ohjauksessa ja kehittämisessä on vahvistunut, sillä päätöksenteko perustuu yhä useammin mitattuun, analysoituun ja järjestelmällisesti hyödynnettyyn tietoon. Teollisen IoT:n tarkastelu ei siten rajoitu yksittäisten laitteiden verkottamiseen, vaan se liittyy laajemmin tuotantojärjestelmien hallittavuuteen, läpinäkyvyyteen ja kehittämiseen.

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on tarkastella, miten teollinen IoT tukee tuotantoprosessien valvontaa ja optimointia teollisessa toimintaympäristössä. Työssä selvitetään, millaisia teknologioita ja arkkitehtuuriratkaisuja teollisen IoT:n hyödyntäminen edellyttää sekä miten IIoT sijoittuu osaksi perinteisiä automaatio- ja tuotantojärjestelmiä. Tässä työssä ISA-95 on valittu tuotantojärjestelmien tarkastelun keskeiseksi viitekehikseksi, koska se tarjoaa selkeän ja laajasti käytetyn mallin yritystason järjestelmien, tuotannonhallinnan, valvontajärjestelmien ja kenttätason välisten suhteiden jäsentämiseen. Valinta perustuu siihen, että työn näkökulma kohdistuu erityisesti tuotantoprosessien valvontaan, optimointiin ja järjestelmäintegraatioon, joita ISA-95 kuvaa rakenteellisesti hyvin. Vaikka myös muita Teollisuus 4.0 -ympäristöön liittyviä viitemalleja, kuten RAMI 4.0, on olemassa, niitä ei tässä työssä käsitellä yhtä laajasti, koska työn tavoitteena ei ole

vertailla eri viitearkkitehtuureja vaan tarkastella teollisen IoT:n sijoittumista osaksi tuotantojärjestelmien kokonaisuutta.

Työ toteutetaan kirjallisuuskatsauksena, jossa hyödynnetään tieteellisiä julkaisuja, standardeihin liittyviä lähteitä sekä teollisuuden toimijoiden tuottamaa asiantuntijamateriaalia. Tarkastelu rajataan teollisiin tuotantoympäristöihin, eikä kuluttaja-IoT-ratkaisuja käsitellä. Työssä ei myöskään pyritä yksityiskohtaiseen toimialakohtaiseen vertailuun, vaan tavoitteena on muodostaa yleinen ja jäsenneily kokonaiskuva teollisen IoT:n roolia tuotantoprosessien valvonnassa ja optimoinnissa.

Työ on suunnattu erityisesti niille lukijoille, jotka haluavat muodostaa jäsenneilyn kokonais kuvan teollisen IoT:n merkityksestä tuotantoprosessien valvonnassa ja optimoinnissa. Työstä voi olla hyötyä esimerkiksi automaation, tuotantotekniikan ja tietotekniikan opiskelijoille sekä tuotannon kehittämisen, kunnossapidon ja teollisten tietojärjestelmien parissa toimiville henkilöille.

Työssä pyritään vastaamaan seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

- Miten teollista IoT:tä hyödynnetään tuotantoprosessien reaaliaikaisessa valvonnassa?
- Millä tavoin teollinen IoT tukee tuotantoprosessien optimointia ja ennakoivaa kunnossapitoa?
- Mitkä ovat teollisen IoT:n keskeiset hyödyt ja haasteet tuotantoprosessien valvonnassa ja optimoinnissa?

Tutkielma etenee siten, että aluksi tarkastellaan automaation kehitystä, teollisen IoT:n peruskäsitteitä sekä tuotantojärjestelmien arkkitehtuuria. Tämän jälkeen analysoidaan teollisen IoT:n roolia tuotantoprosessien valvonnassa ja optimoinnissa. Lopuksi tarkastellaan teollisen IoT:n käyttöönottoon liittyviä keskeisiä haasteita sekä esitetään työn yhteenveto ja johtopäätökset.

2 Automaation ja IoT:n perusteet

Tässä luvussa tarkastellaan teollisen automaation kehitystä perinteisestä tehdasautomaatiosta kohti verkottuneita ja digitaalisia tuotantojärjestelmiä. Luvussa kuvataan erityisesti neljännen teollisen vallankumouksen merkitys automaation näkökulmasta sekä esitellään työn kannalta keskeiset käsitteet, kuten esineiden internet (IoT), teollinen internet (IIoT), pilvilaskenta, reunalaskenta, tekoäly ja digitaalinen kaksonen. Tarkoituksena on muodostaa teoreettinen perusta, jonka varaan myöhemmät luvut rakentuvat.

2.1 Automaation kehitys

Teollinen automaatio on kehittynyt vaiheittain teknologian, tuotantomenetelmien ja tietojärjestelmien muuttuessa. Kehitystä voidaan tarkastella teollisuuden neljän vallankumouksen kautta, joista erityisesti kolmas ja neljäs teollinen vallankumous ovat olleet merkittäviä automaation näkökulmasta (SAP, 2026). Kolmannen teollisen vallankumouksen aikana tuotantoon tulivat tietokoneet, ohjelmoitavat logiikkaohjaimet ja sähköiset automaatiojärjestelmät, mikä loi perustan digitaalisen tuotannon kehitykselle (SAP, 2026). Neljännessä teollisessa vallankumouksessa tuotantojärjestelmät ovat edelleen verkottuneet ja muuttuneet datalähtöisemmiksi (IBM, n.d.; SAP, 2026).

Neljäs teollinen vallankumous, jota kutsutaan myös nimellä Teollisuus 4.0, edustaa siirtymää kohti entistä joustavampia ja verkottuneempia tuotantojärjestelmiä (IBM, n.d.; SAP, 2026). Teollisuus 4.0:lle on ominaista, että tuotantolaitteet, automaatiojärjestelmät ja tietojärjestelmät vaihtavat tietoa reaaliaikaisesti ja tukevat toisiaan koko arvoketjussa (IBM, n.d.; SAP, 2026). Tämän kehityksen myötä tuotannon tehokkuutta, läpinäkyvyyttä ja reagointikykyä voidaan parantaa aiempaa systemaattisemmin datan avulla (IBM, n.d.; SAP, 2026).

Automaation kehitys ei siten tarkoita pelkästään yksittäisten laitteiden automatisointia, vaan laajempaa muutosta kohti verkottuneita tuotantoympäristöjä. Tällaisessa

ympäristössä tiedonkeruu, analysointi ja järjestelmien välinen integraatio muodostavat keskeisen perustan tuotannon valvonnalle ja kehittämiselle (IBM, n.d.; SAP, 2026). Tämä kehitys luo taustan myös esineiden internetin ja teollisen esineiden internetin hyödyntämiselle teollisuudessa (IBM, n.d.; SAP, 2026).

2.2 Esineiden internet

Esineiden internet, eli Internet of Things (IoT), tarkoittaa fyysisten laitteiden liittämistä tietoverkkoon siten, että ne voivat kerätä, siirtää ja hyödyntää dataa. IoT-laitteet voivat olla esimerkiksi kuluttajalaitteita, ajoneuvoja, mittalaitteita tai muita fyysisiä objekteja, jotka on varustettu antureilla, ohjelmistoilla ja verkkoyhteyksillä (IBM, n.d.). IoT:n perusajatuksena on, että fyysiset laitteet eivät toimi enää täysin erillisinä yksikköinä, vaan osana laajempaa digitaalista verkkoa, jossa tieto liikkuu laitteiden, järjestelmien ja käyttäjien välillä (IBM, n.d.).

IoT:n avulla voidaan kerätä tietoa esimerkiksi ympäristöolosuhteista, energiankulutuksesta, liikenteestä tai laitteiden toiminnasta (IBM, n.d.). Kerättyä dataa voidaan tarkastella reaaliaikaisesti tai hyödyntää myöhemmin analytiikassa ja päätöksenteossa (IBM, n.d.). Tämän vuoksi IoT:tä hyödynnetään laajasti eri toimialoilla, kuten liikenteessä, terveydenhuollossa, maataloudessa ja teollisuudessa (IBM, n.d.). Vaikka IoT:n sovelluskohdeet voivat vaihdella suuresti, sen perusperiaate säilyy samana: fyysisestä ympäristöstä kerätään dataa, joka voidaan muuntaa digitaalseksi tiedoksi ja hyödyntää toiminnan kehittämisessä (IBM, n.d.). Teollisessa ympäristössä tämä periaate laajenee teollisen esineiden internetin muodossa.

2.3 Teollinen IoT

Teollinen esineiden internet, eli Industrial Internet of Things (IIoT), viittaa verkottuneisiin antureihin, ohjaimiin ja muihin teollisiin laitteisiin, jotka keräävät, siirtävät ja

hyödyntävät dataa tuotanto- ja liiketoimintaprosessien tueksi (Griffin, 2022; IBM, n.d.). IIoT painottuu erityisesti koneiden väliseen viestintään, tiedon käsittelyyn sekä koneopimisen hyödyntämiseen teollisissa sovelluksissa (Griffin, 2022). Sen tavoitteena on parantaa teollisten järjestelmien tehokkuutta, luotettavuutta ja suorituskykyä reaaliaikaiseen dataan pohjautuvan päätöksenteon avulla (Griffin, 2022; IBM, n.d.).

Yleiseen IoT:hen verrattuna IIoT keskittyy ensisijaisesti yritysten ja teollisten toimijoiden välisiin ratkaisuihin, kun taas IoT liitetään usein kuluttajasovelluksiin (Griffin, 2022; IBM, n.d.). IIoT-järjestelmiltä vaaditaan huomattavasti suurempaa tarkkuutta, yhteentoimivuutta ja toimintavarmuutta, koska niitä käytetään kriittisissä tuotanto- ja infrastruktuuriprosesseissa (Griffin, 2022). Tämän vuoksi IIoT:n yhteydessä korostuvat myös tietoturva, luotettavuus ja järjestelmien jatkuva saatavuus.

Teollisissa ympäristöissä IIoT-dataa hyödynnetään esimerkiksi tuotantoprosessien valvonnassa, kunnossapidossa, laadunhallinnassa ja tuotannon optimoinnissa. Tuotantolaitteista kerättyä dataa voidaan analysoida reaaliaikaisesti, jolloin järjestelmä pystyy tukemaan poikkeamien havaitsemista, kunnonvalvontaa ja tuotannon ohjausta aiempaa tarkemmin (IBM, n.d.; Griffin, 2022). Näin IIoT toimii siltana fyysisen tuotantoympäristön ja digitaalisten analytiikkajärjestelmien välillä.

2.4 Teollisuus 4.0 ja sen keskeiset teknologiat

Teollisuus 4.0 perustuu teollisten tuotantojärjestelmien laajamittaiseen digitalisaatioon, verkottumiseen ja älykkääseen tiedon hyödyntämiseen. Sen tavoitteena on tehdä tuotantoprosesseista joustavia, läpinäkyviä ja pitkälti dataan perustuvia. Teollinen IoT muodostaa keskeisen teknologisen perustan tälle kehitykselle, sillä se mahdollistaa tuotantolaitteiden liittämisen verkkoon sekä reaaliaikaisen tiedon keräämisen ja hyödyntämisen tuotantoympäristössä (IBM, n.d.).

IBM:n (n.d.) mukaan Teollisuus 4.0 -kehitystä ajavat IoT:n lisäksi useat keskeiset teknologiat, jotka yhdessä mahdollistavat älykkäiden ja verkottuneiden tuotantojärjestelmien toteuttamisen. Näihin kuuluvat pilvilaskenta, tekoäly ja koneoppiminen, reunalaskenta, kyberturvallisuus sekä digitaalinen kaksonen.

Pilvilaskenta.

Pilvilaskenta mahdollistaa suurten tietomäärien tallennuksen, käsittelyn ja analysoinnin kustannustehokkaasti ja skaalautuvasti. Pilvipalveluiden avulla tuotannon, kunnossapidon, logistiikan ja liiketoiminnan tiedot voidaan yhdistää, mikä tukee kokonaisvaltaista päätöksentekoa ja järjestelmien yhteentoimivuutta. Lisäksi pilvilaskenta madaltaa uusien digitaalisten ratkaisujen käyttöönoton kynnyksiä erityisesti pienille ja keskisuurille yrityksille (IBM, n.d.).

Tekoäly ja koneoppiminen.

Tekoäly ja koneoppiminen mahdollistavat tuotantoympäristöissä syntyvän suuren tietomäärän tehokkaan hyödyntämisen. Näiden teknologioiden avulla voidaan tunnistaa poikkeamia, ennustaa laitteiden vikaantumista ja tukea tuotantoprosessien kehittämistä. Koneoppimismallit voivat analysoida sensoridataa ja tuottaa tietoon perustuvia suosituksia tuotannon ohjauksen tueksi (IBM, n.d.).

Reunalaskenta.

Reunalaskenta täydentää pilvilaskentaa mahdollistamalla datan käsittelyn lähellä sen syntypaikkaa, kuten tuotantolaitteiden tai automaatiojärjestelmien yhteydessä. Tämä on erityisen tärkeää reaaliaikaisissa sovelluksissa, joissa viiveet on minimoitava, esimerkiksi turvallisuus- ja laatuvalvonnassa. Reunalaskenta voi myös parantaa järjestelmän luotettavuutta ja vähentää riippuvuutta ulkoisista verkoista (IBM, n.d.).

Kyberturvallisuus.

Tuotantojärjestelmien lisääntyvä verkottuminen tekee kyberturvallisuudesta keskeisen osan Teollisuus 4.0 -kehitystä. Sekä IT- että OT-järjestelmien suojaaminen on

välttämätöntä, jotta tuotantoprosessit pysyvät luotettavina ja turvallisina. Kyberturvallisuuden merkitys korostuu erityisesti silloin, kun häiriöt tai hyökkäykset voivat vaikuttaa suoraan tuotannon jatkuvuuteen ja turvallisuuteen (IBM, n.d.).

Digitaalinen kaksonen.

Digitaalinen kaksonen on fyysisen laitteen, prosessin tai tuotantoympäristön virtuaalinen malli, joka perustuu reaaliaikaiseen tuotantodataan. Digitaalisten kaksosten avulla voidaan simuloida tuotantoprosesseja, testata muutoksia ja arvioida niiden vaikutuksia ilman riskejä fyysisessä ympäristössä. Näin ne tukevat tuotannon ymmärtämistä, mallintamista ja kehittämistä (IBM, n.d.; Koskinen, 2018).

Yhdessä nämä teknologiat muodostavat Teollisuus 4.0:n teknologisen perustan ja mahdollistavat verkottuneiden, älykkäiden ja datalähtöisten tuotantojärjestelmien toteuttamisen. Teollinen IoT toimii tässä kokonaisuudessa keskeisenä yhdistävänä tekijänä, koska sen avulla fyysisestä tuotantoympäristöstä saatava data voidaan tuoda osaksi laajempaa digitaalista ja analytiikkaan perustuvaa järjestelmää (IBM, n.d.).

3 Tuotannon järjestelmäarkkitehtuuri

Tässä luvussa tarkastellaan tuotantojärjestelmien rakenteellista jäsentämistä ja järjestelmäintegraatiota ISA-95-viitekehysten avulla. Luvussa esitellään ISA-95-standardin tausta ja merkitys sekä kuvataan tuotantojärjestelmän eri tasot fyysisestä prosessista liiketoiminnan suunnitteluun. Lisäksi tarkastellaan, miten ISA-95 jäsentää tiedonvaihtoa yritystason järjestelmien, tuotannonhallinnan, valvontajärjestelmien ja kenttälaitteiden välillä. Luvun tavoitteena on osoittaa, miten teollinen IoT voidaan sijoittaa osaksi olemassa olevaa automaatio- ja tuotannonhallinta-arkkitehtuuria.

3.1 ISA-95 osana tuotantojärjestelmien arkkitehtuuria

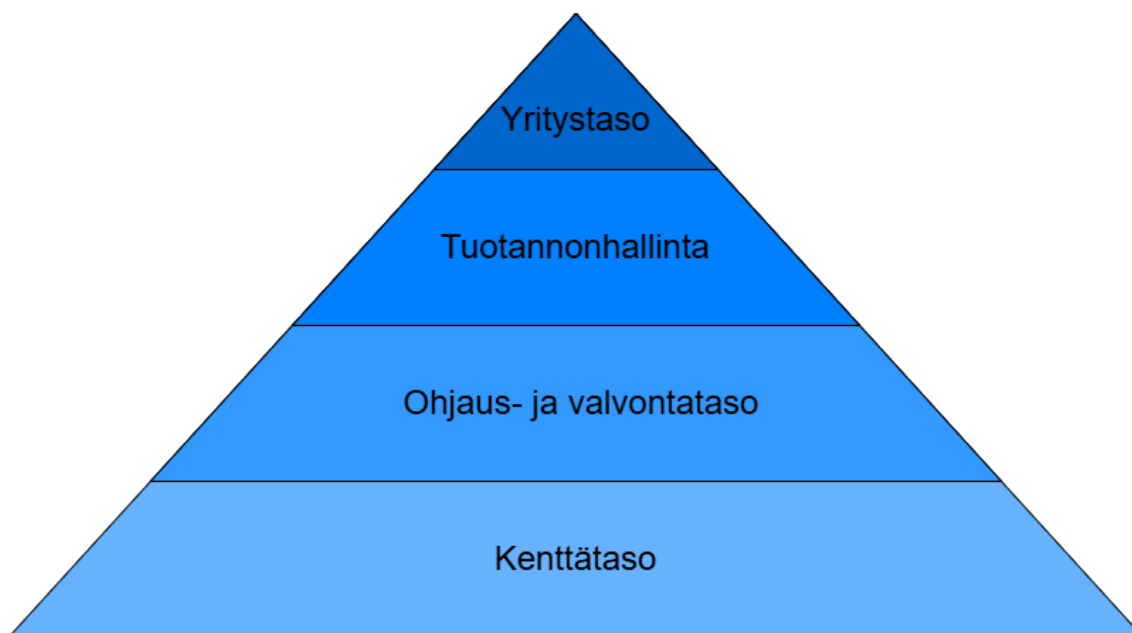
ISA-95 on kansainvälinen standardikokonaisuus, jonka tavoitteena on integroida yritystason järjestelmät ja tuotannon ohjausjärjestelmät yhtenäiseksi kokonaisuudeksi (ISA, n.d.). Standardin virallinen nimi on ANSI/ISA-95 Enterprise-Control System Integration, ja se tunnetaan kansainvälisesti myös nimellä IEC/ISO 62264 (ISA, n.d.; Siemens, n.d.). ISA-95 määrittelee yhteiset mallit ja terminologian, joiden avulla esimerkiksi toiminnanohjausjärjestelmät voidaan liittää tuotannon valvonta-, ohjaus- ja toteutusjärjestelmiin hallitusti ja yhdenmukaisesti (ISA, n.d.; Siemens, n.d.).

Standardi perustuu Purdue Reference Model -viitemalliin, jonka mukaisesti tuotantojärjestelmä jaennetaan hierarkkisiin tasoihin (ISA, n.d.). Tämän arkkitehtuurin avulla voidaan erottaa toisistaan fyysinen prosessi, kenttä- ja valvontataso, tuotannonhallinta sekä liiketoimintatason toiminnot, mutta samalla määritellä niiden väliset tiedonvaihtotarpeet (ISA, n.d.). Siemensin mukaan ISA-95:n keskeinen arvo on sen kyvyssä tarjota yritystason kokonaisnäkyä järjestelmäintegraatioon, jossa suuri määrä yksittäisiä toimintoja ja datapisteitä voidaan jäsentää ymmärrettäväksi rakenteeksi päätöksenteon ja tiedonkulun tueksi (Siemens, n.d.).

ISA-95 määrittelee rajapinnan esimerkiksi toiminnanohjausjärjestelmien (ERP, Enterprise Resource Planning), tuotannon toteutusjärjestelmien (MES, Manufacturing Execution System) sekä tuotannon operatiivisen johtamisen ratkaisujen (MOM, Manufacturing Operations Management) välillä (ISA, n.d.; Siemens, n.d.). Lisäksi standardi huomioi valvonta- ja ohjausjärjestelmät sekä kenttätason laitteet, kuten anturit, toimilaitteet ja loogikkaohjaimet (ISA, n.d.; Siemens, n.d.). Tämän vuoksi ISA-95 toimii edelleen keskeisenä viitekehyksenä tuotantojärjestelmien rakenteen ja integraation tarkastelussa myös modernissa teollisessa ympäristössä (ISA, n.d.; Siemens, n.d.).

3.2 ISA-95-mallin tasot

Kuvassa 1 on esitetty ISA-95-mallin keskeiset järjestelmätasot. Tässä työssä mallin tarkasteluun on lisätty myös taso 0, jolla viitataan varsinaiseen fyysiseen tuotantoprosessiin Purdue-viitemallin mukaisesti. Tasojen tarkoituksena on kuvata fyysisen prosessin, kentälaitteiden, valvontajärjestelmien, tuotannonhallinnan ja liiketoimintatason välistä rakennetta sekä niiden välistä tiedonkulkua.



Kuva 1. ISA-95-mallin tasot (ISA, n.d.).

Taso 0 – Fyysinen prosessi.

Taso 0 kuvaa varsinaista fyysistä tuotantoprosessia, jossa materiaalit, energia ja koneet muodostavat tuotannon perustan. Tällä tasolla tapahtuvat esimerkiksi mekaaninen käsittely, kemialliset reaktiot, materiaalin siirto ja muut fysikaaliset prosessit, joita teollisessa tuotannossa hallitaan ja seurataan (ISA, n.d.; Russem, 2023). Fyysisen prosessin tilaa ei vielä käsitellä tietojärjestelmissä, vaan tieto prosessin toiminnasta siirtyy ylemmille tasoille vasta antureiden ja mittalaitteiden avulla (Russem, 2023).

Taso 1 – Kenttätaso.

Tasolla 1 toimivat anturit, mittalaitteet, toimilaitteet ja tuotantoprosessia ohjaavat loogiikkaohjaimet, joiden tehtävänä on mitata prosessin tilaa ja reagoida siihen automaattisesti (ISA, n.d.; Russem, 2023). Tällä tasolla fyysisestä prosessista saatu mittausdata luetaan ja muutetaan digitaaliseksi tiedoksi, jota voidaan hyödyntää ohjauksessa ja valvonnassa (Russem, 2023). Kenttä- ja laitetaso muodostaa siten yhteyden fyysisen prosessin ja ylempien automaatiojärjestelmätasojen välille (ISA, n.d.).

Taso 2 – Ohjaus- ja valvontataso.

Tasolla 2 tuotantoprosesseja valvotaan ja ohjataan reaaliaikaisesti valvonta- ja käyttöliittymäjärjestelmien avulla (ISA, n.d.; Russem, 2023). Tälle tasolle sijoittuvat esimerkiksi SCADA-järjestelmät ja muut prosessin valvontaratkaisut, jotka keräävät prosessidataa, visualisoivat tuotannon tilaa ja mahdollistavat nopean reagoinnin poikkeamiin (ISA, n.d.; Russem, 2023). Tason 2 tehtävänä on muodostaa operatiivinen tilannekuva tuotannosta ja tukea prosessin hallintaa lyhyellä aikavälillä (Russem, 2023).

Taso 3 – Tuotannonhallinta.

Taso 3 muodostaa rajapinnan liiketoiminnan ja varsinaisen tuotannon välille (ISA, n.d.). Tällä tasolla sijaitsevat MES- ja MOM-järjestelmät, jotka vastaavat tuotannon toteutuksen ohjauksesta, aikataulutuksesta, laadunhallinnasta, kunnossapidosta ja suorituskyvyn seurannasta (ISA, n.d.; Russem, 2023). Liiketoiminnan suunnitelmat muunnetaan tällä

tasolla konkreettiseksi tuotantotoimenpiteiksi, minkä vuoksi taso 3 on keskeinen tuotantoprosessin koordinoinnin näkökulmasta (Russem, 2023).

Taso 4 – Yritystaso.

Yritystasolla käsitellään liiketoimintaan liittyviä toimintoja, kuten tuotannon suunnittelua, taloushallintoa, myyntiä ja logistiikkaa (ISA, n.d.; Russem, 2023). Tällä tasolla toimivat tyypillisesti ERP-järjestelmät, jotka vastaavat pitkän aikavälin suunnittelusta, resursien hallinnasta ja koko yrityksen operatiivisen toiminnan koordinoinnista (ISA, n.d.; Russem, 2023). Yritystaso kytkee tuotannon osaksi laajempaa liiketoiminnan suunnittelua ja päätöksentekoa (Russem, 2023).

3.3 ISA-95 ja teollinen IoT

Teollisen IoT:n yleistyessä ISA-95-mallin tasot eivät enää näy täysin erillisinä, vaan tiedonvaihto niiden välillä on entistä tiiviimpää ja osittain reaaliaikaista (ISA, n.d.; Brandl & Johnsson, n.d.). Tämän vuoksi perinteinen hierarkkinen pyramidimalli ei yksin riitä kuvaamaan nykyaikaisen tuotantojärjestelmän rakennetta, jossa järjestelmät ja laitteet voivat kommunikoida keskenään aiempaa joustavammin (Brandl & Johnsson, n.d.). Älykkäissä ja vahvasti verkottuneissa tuotantoympäristöissä arkkitehtuuri onkin siirtymässä kohti verkkomaisempaa rakennetta, jossa tiedonkulku ei rajoitu vain viereisten tasojen väliseen yhteyteen (Brandl & Johnsson, n.d.). Taulukkoon 1 on tiivistetty perinteisen automaation ja IIoT-pohjaisen tuotantoympäristön erot.

Taulukko 1. Perinteisen ja IIoT-pohjaisen tuotantoympäristön vertailu.

	Perinteinen	IIoT-pohjainen
Järjestelmäarkkitehtuuri	Hierarkkinen ja suljettumpi	Verkottunut ja joustavampi
Päätöksenteko	Enemmän sääntöpohjaista ja paikallista	Datalähtöistä, osin automatisoitua ja hajautettua

Tiedon kulku	Rajattua, usein järjestelmäkohtaista	Laajaa ja useiden järjestelmätasojen välistä
Teknologiat	PLC, SCADA	IIoT, pilvi, reunalaskenta, tekoäly, digitaalinen kaksonen
Vahvuus	Vakaa ja luotettava prosessinohjaus	Läpinäkyvyys, joustavuus ja datan laaja hyödyntäminen

ISA-95-standardin peruseriaatteet ovat kuitenkin sovellettavissa myös Teollisuus 4.0 -ympäristöissä, vaikka tuotantojärjestelmien tekninen toteutus muuttuu yhä verkottuneemmaksi. Standardin määrittelemä toimintomalli kuvaa tuotanto-organisaation keskeiset toiminnot ja prosessit ilman, että se sitoo niitä tiettyihin järjestelmiin tai teknologioihin (Brandl & Johnsson, n.d.). Tämän vuoksi ISA-95:n kuvaamat tuotannonhallinnan toiminnot, kuten resurssien hallinta, tuotannon ohjaus ja laadunvalvonta, säilyvät relevantteina myös älykkäissä valmistusympäristöissä (Brandl & Johnsson, n.d.).

Teollisuus 4.0 -kehitystä tukevat lisäksi erilaiset viitemallit, kuten RAMI 4.0, jotka hyödyntävät ISA-95-standardin käsitteitä ja täydentävät niitä kuvaamalla älykkään valmistuksen keskeisiä elementtejä ja niiden välisiä suhteita (Brandl & Johnsson, n.d.). RAMI 4.0 tarkastelee valmistusta kolmiulotteisena viitekehystenä, jossa huomioidaan esimerkiksi elinkaari, hierarkiatasot ja arkkitehtuurikerrokset, ja se laajentaa näin perinteistä järjestelmähierarkian tarkastelua (Brandl & Johnsson, n.d.).

Teollisen IoT:n näkökulmasta ISA-95 auttaa sijoittamaan uudet datankeruu-, valvonta- ja analytiikkaratkaisut osaksi olemassa olevaa järjestelmäkokonaisuutta. Vaikka käytännön toteutus voi muuttua, standardi tarjoaa edelleen rakenteellisen pohjan, jonka avulla voidaan ymmärtää eri järjestelmätasojen roolit, vastuut ja tietovirrat myös nykyaikaisessa tuotantoympäristössä (ISA, n.d.; Brandl & Johnsson, n.d.).

4 IloT tuotantoprosessien valvonnassa

Tässä luvussa tarkastellaan, miten teollista IoT:tä hyödynnetään tuotantoprosessien reaaliaikaisessa valvonnassa. Luvussa käsitellään anturiteknologiaa, tiedon keruuta, valvontajärjestelmiä sekä datan siirtoa ja käsittelyä tuotantoympäristössä. Lisäksi analysoidaan, miten verkottuneet laitteet ja järjestelmät parantavat tuotannon läpinäkyvyyttä, reagointikykyä ja poikkeamien hallintaa. Tarkastelu keskittyy erityisesti tiedon rooliin operatiivisessa päätöksenteossa.

4.1 Valvonnan tavoitteet

Tuotantoprosessien valvonnan keskeisenä tavoitteena on varmistaa tuotannon tehokkuus, laatu ja luotettavuus seuraamalla prosessin toimintaa ja havaitsemalla poikkeamat mahdollisimman varhaisessa vaiheessa (Czerwińska & Pacana, 2022). Jatkuvan valvonnan avulla voidaan havaita häiriöitä, estää virheiden etenemistä sekä varmistaa, että prosessi toimii suunnitellulla tavalla ja tuottaa vaaditun laatutason mukaisia tuotteita (Czerwińska & Pacana, 2022). Valvonnan avulla tuotantoprosessin tilaa voidaan seurata mitausdatan perusteella ennen kuin poikkeamat ehtivät vaikuttaa merkittävästi tuotannon laatuun, turvallisuuteen tai jatkuvuuteen (Okuyelu ja muut, 2024).

Frankó ja muut (2022) korostavat, että laadunvalvonta on yksi teollisen valvonnan keskeisistä osa-alueista. Heidän mukaansa monet laaduntarkastusprosessit toteutetaan nykyisin automaattisesti koneiden avulla, ja esimerkiksi koneoppimismenetelmät voivat auttaa tunnistamaan virheitä sekä tukemaan laadunvalvontaa tuotantoympäristöissä. Reaaliaikainen tuotantodatan seuranta parantaa samalla reagointikykyä, koska sen avulla tuotannon tilaa voidaan tarkastella jatkuvasti ja mahdollisiin häiriöihin voidaan puuttua nopeasti (Okuyelu ja muut, 2024).

Valvonnan ja ohjauksen välillä voidaan tehdä käsitteellinen ero siten, että valvonta viittaa prosessin tilan seuraamiseen ja poikkeamien tunnistamiseen, kun taas ohjauksella

tarkoitetaan prosessiin vaikuttamista esimerkiksi toimilaitteiden tai säätöjärjestelmien avulla (Inductive Automation, 2026; Maglaras ja muut, 2018). Tuotantoprosessien valvonnassa keskeistä on siis luotettavan tilannekuvan muodostaminen, jonka perusteella prosessia voidaan tarvittaessa ohjata tai siihen voidaan tehdä korjaavia toimenpiteitä (Inductive Automation, 2026).

4.2 Anturit ja tiedonkeruu

Anturit muodostavat perustan teollisen IoT:n valvontasovelluksille, koska niiden avulla tuotantoprosessin fysikaaliset ilmiöt voidaan muuntaa digitaaliseksi tiedoksi automaatio- ja tietojärjestelmien käsiteltäväksi (IBM, n.d.; Noor-A-Rahim ja muut, 2022). Antureilla voidaan mitata esimerkiksi lämpötilaa, painetta, virtausta, värinää, energiankulutusta ja koneiden käyttötilaa, jolloin tuotantoprosessista saadaan ajantasaista tietoa valvontaa varten (IBM, n.d.). Tällainen mittausdata mahdollistaa koneiden toiminnan, prosessiparametrien ja suorituskyvyn jatkuvan seurannan tuotantoympäristössä (Okuyelu ja muut, 2024).

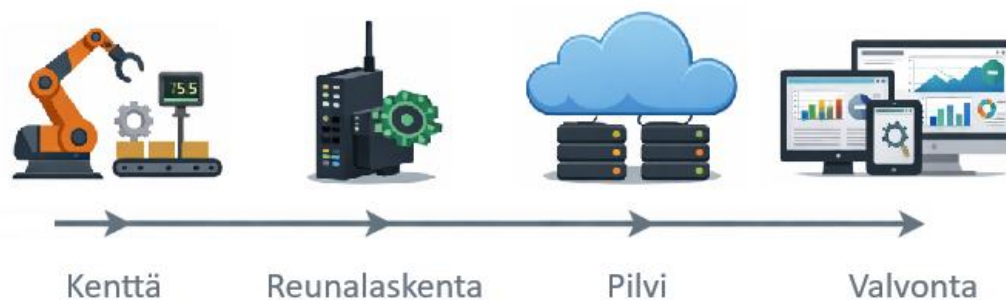
Tiedonkeruun avulla voidaan tunnistaa tuotantoprosessien häiriöitä, arvioida koneiden kuntoa ja tukea poikkeamien varhaista havaitsemista. Anturiteknologiaa voidaan hyödyntää myös tuotteiden ja komponenttien seuraamiseen tuotantoprosessin eri vaiheissa, mikä parantaa tuotannon läpinäkyvyyttä ja jäljitettävyyttä (Azangoo ja muut, 2019). Näin anturit eivät ainoastaan mittaa yksittäisiä prosessisuureita, vaan tuottavat kokonaiskuvaa prosessin etenemisestä ja tilasta (Azangoo ja muut, 2019; Okuyelu ja muut, 2024).

Noor-A-Rahim ja muut (2022) toteavat, että IIoT:n kehittyessä antureiden merkitys tuotantoympäristöissä on kasvanut entisestään. Verkottuneet laitteet mahdollistavat suurten datamäärien keräämisen ja siirtämisen tuotantolaitteista analysointijärjestelmiin, jolloin valvontaa voidaan toteuttaa aiempaa laajemmin ja tarkemmin (Noor-A-Rahim ja muut, 2022). Anturidata voidaan siirtää esimerkiksi automaatiojärjestelmien, tuotannonhallintajärjestelmien tai pilvipohjaisten analytiikkaratkaisujen käyttöön, jolloin

tuotantoprosessia voidaan tarkastella lähes reaaliaikaisesti (IBM, n.d.). Antureilla ja tiedonkeruulla on täten suuri merkitys tuotannon valvonnassa, sillä ilman luotettavaa mitausdataa tuotannon tilasta ei voida muodostaa ajantasaista tilannekuvaa (IBM, n.d.; Okuyelu ja muut, 2024).

4.3 Datavirta kentältä järjestelmiin

Reaaliaikainen datavirta tuotantoympäristöstä tietojärjestelmiin on keskeinen osa modernia teollista automaatiota ja tuotantoprosessien valvontaa (Noor-A-Rahim ja muut, 2022). Kenttätasolla toimivat anturit, toimilaitteet ja muut älykkäät laitteet keräävät jatkuvasti tietoa tuotantoprosessin tilasta ja välittävät sen automaatiojärjestelmille jatkokäsittelyä varten (IBM, n.d.). Tämän tiedon avulla voidaan seurata esimerkiksi koneiden toimintaa, prosessiparametreja sekä tuotannon suorituskykyä lähes reaaliaikaisesti (Okuyelu ja muut, 2024). Kuvassa 2 havainnollistetaan tuotantodatan kulkua kenttä- ja pilvipalveluiden kautta valvonta- ja analytiikkajärjestelmiin.



Kuva 2. Reaaliaikainen datavirta.

Teollisen esineiden internetin kehittyminen on lisännyt merkittävästi reaaliaikaisen datavirran hyödyntämismahdollisuuksia tuotannossa (Noor-A-Rahim ja muut, 2022). Verkottuneiden laitteiden, langattomien verkkojen ja pilvipalveluiden lisäksi reunalaskenta mahdollistaa datan käsittelyn jo lähellä sen syntyä, esimerkiksi tuotantolaitteissa

tai paikallisissa yhdyskäytävissä (IBM, n.d.). Tämä vähentää viivettä tiedon siirrossa ja mahdollistaa nopeamman reagoinnin kriittisissä tilanteissa tuotantoprosessissa (IBM, n.d.). Samalla osa analytiikasta voidaan suorittaa paikallisesti ennen datan siirtämistä eteenpäin, mikä keventää tietoverkkojen kuormitusta ja parantaa järjestelmien toimintavarmuutta (IBM, n.d.). Taulukossa 2 on verrattu reuna- ja pilvilaskennan keskeisiä ominaisuuksia.

Taulukko 2. Reunalaskennan ja pilvilaskennan vertailu

	Reunalaskenta	Pilvilaskenta
Datan käsittelyn sijainti	Lähellä datan syntyä paikkaa	Keskitetysti etäpalvelimilla
Viive	Pieni, noin 1–10 ms paikallisessa käsittelyssä, tai korkeintaan kymmeniä millisekunteja	Suurempi, kymmeniä tai satoja millisekunteja, riippuen verkosta ja etäisyydestä
Tietoturva	Data pysyy lähempänä tuotantoympäristöä	Datan siirto ulkoisiin ympäristöihin lisää suojaustarpeita
Skaalautuvuus	Rajallisempi paikallisten resurssien mukaan	Erittäin hyvä
Laskentakapasiteetti	Rajallisempi	Laaja ja joustava

Datavirran merkitys valvonnassa on mahdollistaa tuotannon tilan tarkastelun useilla järjestelmätasolla lähes samanaikaisesti (ISA, n.d.; Inductive Automation, 2026). Kun tieto siirtyy kenttätasolta valvonta- ja hallintajärjestelmiin ilman merkittävää viivettä, poikkeamat voidaan havaita aikaisemmin ja paikantaa tarkemmin (Okuyelu ja muut, 2024). Reaaliaikainen datavirta toimii näin valvonnan teknisenä perustana, jonka varaan muut valvontajärjestelmät ja sovellukset rakentuvat (Noor-A-Rahim ja muut, 2022; ISA, n.d.).

4.4 Valvontajärjestelmät

Teolliset ohjausjärjestelmät, eli ICS-järjestelmät (Industrial Control Systems), ovat keskeinen osa modernien teollisuusprosessien valvontaa ja ohjausta (Maglaras ja muut, 2018). ICS on yleisnimitys erilaisille automaatiojärjestelmille, joihin kuuluvat esimerkiksi SCADA-järjestelmät (Supervisory Control and Data Acquisition), hajautetut ohjausjärjestelmät sekä ohjelmoitavat logiikat (Maglaras ja muut, 2018). Näiden järjestelmien avulla voidaan ohjata ja valvoa teollisia prosesseja sekä kerätä dataa tuotantolaitteista ja infrastruktuurista (Maglaras ja muut, 2018).

SCADA-järjestelmät ovat yksi keskeinen ICS-järjestelmien osa, ja niitä käytetään erityisesti laajojen teollisten prosessien valvontaan ja ohjaukseen (Inductive Automation, 2026). SCADA-järjestelmät koostuvat ohjelmisto- ja laitteistokomponenteista, joiden avulla voidaan kerätä tuotantoprosessista mittausdataa, käsitellä sitä sekä esittää se operaattoreille helposti tulkittavassa muodossa (Inductive Automation, 2026). Järjestelmät mahdollistavat myös tuotantolaitteiden etävalvonnan ja ohjauksen, mikä parantaa prosessien hallittavuutta ja reagoitinopeutta mahdollisissa häiriötilanteissa (Inductive Automation, 2026).

SCADA-järjestelmät toimivat tyypillisesti yhteistyössä kenttälaitteiden ja automaatiojärjestelmien kanssa, kuten ohjelmoitavien logiikoiden ja etäpäätteiden kanssa (Inductive Automation, 2026). Nämä laitteet keräävät tietoa tuotantoprosessin antureista ja toimilaitteista sekä välittävät sen SCADA-järjestelmälle analysointia ja visualisointia varten (Inductive Automation, 2026). Tieto esitetään käyttäjälle usein HMI-käyttöliittymän (Human Machine Interface) kautta, mikä mahdollistaa prosessin tilan seurannan sekä tarvittavien ohjaustoimenpiteiden tekemisen (Inductive Automation, 2026).

ICS- ja SCADA-järjestelmät mahdollistavat tuotantoprosessien reaaliaikaisen seurannan ja ohjauksen, mikä tukee tuotannon tehokkuutta, turvallisuutta ja luotettavuutta (Maglaras ja muut, 2018; Inductive Automation, 2026). Järjestelmät voivat esimerkiksi hälyttää operaattoria, jos prosessissa havaitaan poikkeamia tai mittausarvot ylittävät ennalta

määritellyt rajat (Inductive Automation, 2026). Lisäksi ICS-järjestelmiä käytetään laajasti erilaisissa kriittisissä infrastruktuureissa ja teollisuudenaloilla, kuten energiantuotannossa, valmistavassa teollisuudessa ja vesihuoltojärjestelmissä (Maglaras ja muut, 2018).

Koska ICS- ja SCADA-järjestelmät ohjaavat usein kriittisiä teollisia prosesseja, niiden luotettavuus ja tietoturva ovat erityisen tärkeitä (Maglaras ja muut, 2018). Mahdolliset häiriöt tai tietoturvahyökkäykset voivat vaikuttaa suoraan tuotantoprosesseihin ja infrastruktuurin toimintaan, minkä vuoksi järjestelmien suojaamiseen kiinnitetään yhä enemmän huomiota teollisessa ympäristössä (Maglaras ja muut, 2018). Valvontajärjestelmien rooli ei siten rajoitu pelkästään datan näyttämiseen, vaan ne muodostavat keskeisen osan tuotantoprosessien turvallista ja hallittua operointia (Maglaras ja muut, 2018; Inductive Automation, 2026).

5 IIoT tuotannon optimoinnin tukena

Tässä luvussa syvennytään teollisen IoT:n rooliin tuotantoprosessien optimoinnissa. Luvussa käsitellään muun muassa ennakoivaa kunnossapitoa, suorituskyvyn analysointia, kapasiteetin optimointia sekä data-analytiikan ja tekoälyn hyödyntämistä tuotannon kehittämisesssä. Lisäksi tarkastellaan digitaalisten kaksosten ja pilvipohjaisten ratkaisujen merkitystä tuotannon simuloinnissa ja kehittämisessä. Tavoitteena on osoittaa, miten kerättyä dataa voidaan hyödyntää tuotannon tehokkuuden ja laadun parantamisessa.

5.1 Tuotantoprosessien optimointi ja datalähtöinen päätöksenteko

Tuotantoprosessien optimoinnilla tarkoitetaan toimintatapojen, resurssien käytön ja prosessiparametrien kehittämistä siten, että tuotanto voidaan toteuttaa mahdollisimman tehokkaasti, laadukkaasti ja joustavasti (T. Bányai & Á. Bányai, 2025). Optimoinnin tavoitteena on samalla pienentää kustannuksia ja parantaa tuotantojärjestelmän suorituskykyä (T. Bányai & Á. Bányai, 2025). Tämän vuoksi optimointi kohdistuu koko tuotantoprosessiin, jossa huomioidaan esimerkiksi materiaalivirrat, koneiden käyttöaste, aika-
taulukus ja resurssien kohdentaminen (T. Bányai & Á. Bányai, 2025).

Wang ja muut (2024) toteavat, että nykyaikaisessa teollisuudessa tuotannon optimointi perustuu yhä enemmän reaaliaikaiseen dataan ja sen analysointiin. Teollisen IoT:n mahdollistama jatkuva datankeruu tarjoaa ajantasaista tietoa prosessin tilasta, minkä ansiosta tuotantoa voidaan ohjata ja säätää aiempaa tarkemmin muuttuvien olosuhteiden mukaan (Wang ja muut, 2024). Tämä erottaa IIoT-pohjaisen optimoinnin perinteisestä optimoinnista, joka on usein perustunut ennalta määriteltyihin sääntöihin ja historiatietoon (Wang ja muut, 2024).

Tuotannosta kerätty data muodostaa perustan datalähtöiselle päätöksenteolle (Wang ja muut, 2024). IIoT-järjestelmien avulla voidaan kerätä tietoa esimerkiksi koneiden toiminnasta, prosessiparametreista, energiankulutuksesta ja tuotannon suorituskyvystä, mikä

mahdollistaa tuotannon tilan tarkemman seurannan ja nopeamman reagoinnin häiriöihin (IBM, n.d.; Wang ja muut, 2024). T. Bányai ja Á. Bányai (2025) korostavat, että datan analysoinnin avulla voidaan tunnistaa tuotannon pullonkauloja, resurssien tehotonta käyttöä ja prosessin vaihtelua, sekä muodostaa päätöksenteon tueksi ennusteita ja suosituksia.

Wang ja muut (2024) tuovat lisäksi esiin, että datan hyödyntäminen mahdollistaa myös päätöksenteon osittaisen automatisoinnin. Älykkäät järjestelmät voivat säätää prosessiparametreja ilman ihmisen välitöntä osallistumista, mikä parantaa tuotannon reagoitukykyä ja vähentää inhimillisten virheiden riskiä (Wang ja muut, 2024). Näin optimointi ei ole enää erillinen jälkikäteinen vaihe, vaan osa tuotantoprosessin jatkuvaa seurantaa, analysointia ja ohjausta. Taulukkoon 3 on koottu tuotantoprosessien valvonnan ja optimoinnin keskeiset erot.

Taulukko 3. Valvonnan ja optimoinnin vertailu.

	Valvonta	Optimointi
Tavoite	Muodostaa reaaliaikainen tilannekuva tuotannosta	Parantaa tuotannon tehokkuutta, laatua ja joustavuutta
Datan rooli	Tuotannon tilan seuranta ja poikkeamien havaitseminen	Päätöksenteon, säätämisen ja kehittämisen tuki
Aikaperspektiivi	Nykytila ja välitön reagointi	Nykytila, ennakointi ja jatkuva parantaminen
Toiminnot	Hälytykset, visualisointi, poikkeamien tunnistus, etävalvonta	Resurssien kohdentaminen, parametrien säätö, laadun parantaminen, kunnossapidon optimointi

5.2 Digitaalinen kaksonen tuotannon optimoinnin tukena

Digitaalinen kaksonen, englanniksi digital twin, tarkoittaa fyysisen kohteen digitaalista vastinetta, joka muodostuu kohdetta kuvaavista tietomalleista (Koskinen, 2018). Tällainen kohde voi olla esimerkiksi tuote, tuotantolaitos, rakennus, työmaa tai muu infrastruktuuri (Koskinen, 2018). Digitaalisen kaksosen tietomallit kuvaavat kohteen rakennetta, toimintaa ja dynamiikkaa valitulla tarkkuudella, jonka tulee olla käyttötarkoitukseen nähden riittävä mutta ei tarpeettoman yksityiskohtainen (Koskinen, 2018). Mallia päivitetään kohteen elinkaaren aikana esimerkiksi rakenteellisten muutosten sekä antureista ja laitteista saatavan mittaus- ja tilatiedon perusteella (Koskinen, 2018).

Kirjallisuudessa digitaalista kaksosta on hyödynnetty erityisesti tuotannon seurannassa, vikojen havaitsemisessa ja ennakoivassa kunnossapidossa. Allahloh ja muut (2025) tuovat esiin, että digitaalinen kaksonen voi toimia tuotantolaitoksen elävänä virtuaalisena mallina, jonka avulla voidaan toteuttaa kunnonvalvontaa, poikkeamien tunnistamista ja ennusteita laitteiden tulevasta käyttäytymisestä. Näin digitaalinen kaksonen tukee tuotannon optimointia tarjoamalla mahdollisuuden arvioida prosessin toimintaa ja tunnistaa kehityskohteita ilman, että muutoksia tarvitsee tehdä suoraan fyysiseen tuotantoympäristöön (Allahloh ja muut, 2025).

Digitaalisen kaksosen rooli optimoinnissa perustuu sen kykyyn yhdistää reaaliaikainen data, mallinnus ja analytiikka yhdeksi kokonaisuudeksi (Allahloh ja muut, 2025). Sen avulla voidaan seurata tuotannon nykytilaa sekä tukea päätöksentekoa ja tuotannon kehittämistä (Allahloh ja muut, 2025). Vaikka kirjallisuudessa digitaalisia kaksosia on tois-
taiseksi hyödynnetty enemmän valvonnassa ja kunnossapidossa kuin varsinaisessa reaaliaikaisessa ohjauksessa, tutkimukset osoittavat, että niillä on merkittävä potentiaali parantaa tuotannon suorituskykyä (Allahloh ja muut, 2025).

5.3 Tehokkuuden ja laadun parantaminen

Teollisessa tuotannossa tehokkuuden ja laadun parantaminen ovat keskeisiä tavoitteita, joita voidaan saavuttaa hyödyntämällä IIoT-teknologioita ja datalähtöisiä analyysimenetelmiä (Frankó ja muut, 2022). Tuotantoprosesseista kerätty data mahdollistaa suorituskyvyn tarkemman seurannan ja analysoinnin, mikä auttaa tunnistamaan tehottomuuksia, vähentämään hukkaa sekä optimoimaan resurssien käyttöä (Frankó ja muut, 2022). Frankó ja muut (2022) korostavat, että IIoT:n ja koneoppimisen avulla voidaan tukea samanaikaisesti tuotannon laatua, turvallisuutta ja kestävyyttä esimerkiksi vähentämällä virheitä, hävikkiä ja energiankulutusta.

T. Bányai ja Á. Bányai (2025) painottavat, että reaaliaikainen kunnossapidon optimointi parantaa järjestelmien luotettavuutta ja tuottavuutta jatkuvan kunnonseurannan, ennakkoivan analytiikan ja dataohjatun päätöksenteon avulla. Tämä näkyy käytännössä esimerkiksi seisokkien vähenemisenä ja käyttöasteen paranemisena, kun kunnossapitotoimet voidaan ajoittaa tarkemmin todellisen kunnon perusteella (T. Bányai & Á. Bányai, 2025). Samalla tuotantojärjestelmän resurssit voidaan kohdentaa tehokkaammin, mikä tukee koko tuotantoprosessin suorituskyvyn paranemista (T. Bányai & Á. Bányai, 2025).

Wang ja muut (2024) raportoivat sähköajoneuvojen älytehdasympäristössä, että heidän IIoT:hen ja syväoppimiseen perustuva mallinsa paransi tuotannon tehokkuutta vähintään neljä prosenttiyksikköä verrattuna kymmeneen vertailumalliin. Heidän tutkimuksensa mukaan reaaliaikainen seuranta ja automaattinen prosessimuunnos tukevat samalla myös resurssien kohdentamista ja tuotannon laadun hallintaa (Wang ja muut, 2024). Tämä osoittaa, että IIoT-pohjaisilla ratkaisuilla voidaan saavuttaa mitattavia parannuksia tuotannon suorituskyvyssä (Wang ja muut, 2024).

Frankó ja muut (2022) tuovat lisäksi esiin, että koneoppimista voidaan hyödyntää erityisesti automatisoidussa laaduntarkastuksessa, jossa tavoitteena on havaita vialliset tuotteet mahdollisimman aikaisessa vaiheessa. Varhainen virheiden tunnistus vähentää korjaustarvetta myöhemmissä tuotantovaiheissa ja pienentää tuotantohävikkiä (Frankó ja

muut, 2022). Näin IIoT:n, analytiikan ja koneoppimisen yhdistelmä voi tukea sekä tehokkuuden että laadun samanaikaista parantamista tuotantoympäristössä (Frankó ja muut, 2022).

5.4 Ennakoiva kunnossapito ja kunnan valvonta

Ennakoiva kunnossapito ja kunnanvalvonta ovat keskeisiä teollisen IoT:n sovellusalueita, sillä niiden avulla voidaan seurata laitteiden toimintaa jatkuvasti ja tunnistaa mahdollisia vikaantumisen merkkejä ennen varsinaista häiriötä (Frankó ja muut, 2022; T. Bányai & Á. Bányai, 2025). Kunnanvalvonta perustuu tuotantolaitteista kerättävään dataan, kuten lämpötila-, värinä-, paine- ja käyttöastetietoihin, joiden avulla voidaan arvioida koneiden kuntoa ja toimintavarmuutta (Frankó ja muut, 2022). IIoT-tekniikat mahdollistavat tämän datan reaaliaikaisen keruun, siirron ja analysoinnin, mikä luo perustan kunnossapidon suunnittelulle todellisen käyttötilanteen perusteella eikä pelkästään ennalta määritettyjen huoltovälien mukaan (Frankó ja muut, 2022; T. Bányai & Á. Bányai, 2025).

Ennakoivan kunnossapidon tavoitteena on vähentää odottamattomia laiterikkoja, minimoida tuotannon keskeytyksiä ja pidentää tuotantojärjestelmien käyttöikää (T. Bányai & Á. Bányai, 2025). T. Bányai ja Á. Bányai (2025) korostavat, että reaaliaikainen kunnossapidon optimointi perustuu jatkuvaan datankeruuseen ja analytiikkaan, joiden avulla huoltotoimenpiteet voidaan ajoittaa oikea-aikaisesti. Tällainen lähestymistapa parantaa tuotantojärjestelmän luotettavuutta ja tukee samalla tehokkaampaa resurssien käyttöä, koska kunnossapitoa ei tehdä liian aikaisin eikä liian myöhään (T. Bányai & Á. Bányai, 2025).

Frankó ja muut (2022) tuovat esiin, että koneoppimisen hyödyntäminen IIoT-ympäristöissä tukee laitteiden kunnan seuranta ja vikojen ennustamista. Kerättyä sensoridataa voidaan analysoida siten, että järjestelmä oppii tunnistamaan poikkeavia toimintamalleja ja varoittamaan mahdollisista ongelmista jo ennen kuin ne vaikuttavat tuotantoon

(Frankó ja muut, 2022). Näin kunnossapidosta tulee aiempaa ennakoivampaa ja datalähtöisempää, mikä vähentää sekä seisokkeja että tuotannon laatupoikkeamia.

Wang ja muut (2024) korostavat lisäksi, että reaaliaikainen tuotantodatan seuranta ei tue ainoastaan prosessien optimointia, vaan myös nopeaa reagointia koneiden ja järjestelmien poikkeavaan toimintaan. Kun dataa analysoidaan automaattisesti ja jatkuvasti, voidaan kunnossapidon päätöksentekoa tukea aiempaa tarkemmin ja integroida se osaksi älykästä tuotannonohjausta (Wang ja muut, 2024). Tämän seurauksena ennakoiva kunnossapito ja kunnonvalvonta muodostavat tärkeän osan modernia, verkottunutta tuotantojärjestelmää, jossa tuotannon luotettavuus, tehokkuus ja laatu kytkeytyvät tiiviisti toisiinsa.

5.5 Kirjallisuudessa esitetyjä sovellusesimerkkejä

Kirjallisuudessa on esitetty useita esimerkkejä siitä, kuinka IIoT:tä hyödynnetään tuotannon optimoinnissa käytännön teollisuusympäristöissä. Wang ja muut (2024) kuvaavat älytehdasympäristöä, jossa IIoT:n, reaaliaikaisen seurannan ja syväoppimisen yhdistäminen mahdollisti tuotannon tehokkuuden mitattavan parantamisen. Tällaisessa ratkaisussa tuotantolinjalta kerätty data yhdistettiin analytiikkaan, jonka avulla prosessin toimintaa voitiin mukauttaa automaattisesti tuotantotilanteen mukaan.

Allahloh ja muut (2025) puolestaan käsittelevät digitaalisten kaksosten käyttöä tuotannon seurannassa, poikkeamien tunnistamisessa ja kunnossapidon tukena. Heidän mukaansa digitaalinen kaksonen toimii reaaliaikaisesti päivittyvänä virtuaalisena mallina, jonka avulla tuotantoprosessin käyttäytymistä voidaan analysoida ja kehittää ilman riskejä fyysisessä ympäristössä. Tämä tekee digitaalisesta kaksosesta käyttökelpoisen työkalun erityisesti silloin, kun tuotannon suorituskykyä halutaan parantaa kokeilematta muutoksia suoraan käytössä olevaan prosessiin.

Frankó ja muut (2022) esittävät lisäksi esimerkkejä koneoppimisen soveltamisesta teollisiin IIoT-ympäristöihin laadunvalvonnan, turvallisuuden ja kunnossapidon yhteydessä. Heidän mukaansa automaattinen virheiden tunnistus ja poikkeamien analysointi voivat tukea sekä laadun parantamista että tuotannon hävikin vähentämistä, kun ongelmiin voidaan puuttua aikaisessa vaiheessa. Näiden esimerkkien perusteella IIoT:n keskeinen vahvuus optimoinnissa on kyky yhdistää tiedonkeruu, analytiikka ja päätöksenteko osaksi jatkuvasti kehittyvää tuotantojärjestelmää.

6 IloT:n haasteet teollisessa käytössä

Vaikka teollinen IoT tarjoaa merkittäviä mahdollisuuksia tuotantoprosessien kehittämiseen, sen käyttöönottoon liittyy myös useita haasteita. Verkottuneiden järjestelmien lisääntyminen kasvattaa tietoturvariskejä, eri järjestelmien ja teknologioiden yhteensovittaminen voi olla monimutkaista, ja uusien ratkaisujen käyttöönotto edellyttää usein huomattavia investointeja sekä uutta osaamista. Tässä luvussa tarkastellaan IloT:n teolliseen käyttöön liittyviä keskeisiä haasteita erityisesti tietoturvan, järjestelmien integroinnin sekä käyttöönoton kustannusten ja osaamisvaatimusten näkökulmista.

6.1 Tietoturva

Tietoturva ja turvallisuus ovat keskeisiä teollisen IoT:n haasteita, koska IloT yhdistää operatiivisen teknologian (OT) ja tietotekniikan (IT) samaan toimintaympäristöön, jolloin myös näihin liittyvät riskit yhdistyvät (Frankó ja muut, 2022). Frankó ja muut (2022) korostavat, että IloT-järjestelmien päätavoitteena voidaan pitää luotettavuutta, eli järjestelmän voidaan odottaa toimivan suunnitellusti myös häiriöiden, inhimillisten virheiden, laitevikojen ja hyökkäysten aikana. Luotettavaan IloT-järjestelmään liittyviä keskeisiä ominaisuuksia ovat tietoturva, yksityisyys, luotettavuus, turvallisuus ja resilienssi eli kyky sietää ja toipua haitallisista tilanteista (Frankó ja muut, 2022).

Frankó ja muut (2022) toteavat, että tietoturvan tehtävänä on suojata järjestelmä luvattomalta pääsylvä, muutoksilta ja tuhoamiselta. Samassa yhteydessä he korostavat, että turvallisuus tarkoittaa sitä, ettei järjestelmän toiminta saa aiheuttaa ihmisille, omaisuu-delle tai ympäristölle kohtuutonta riskiä, kun taas luotettavuus liittyy järjestelmän häiriöttömään toimintaan määritellyn ajan kuluessa (Frankó ja muut, 2022). Resilienssi puolestaan tarkoittaa järjestelmän kykyä välttää haitallisia tilanteita, sietää niitä ja palautua niistä nopeasti, mikä on erityisen tärkeää teollisissa ympäristöissä, joissa käyttökatkokset voivat aiheuttaa merkittäviä tuotanto- ja turvallisuusvaikutuksia (Frankó ja muut, 2022).

IloT-järjestelmien verkottuminen kasvattaa hyökkäyspintaa, minkä vuoksi tietoturva on toteutettava useilla kerroksilla samanaikaisesti (Allahloh ja muut, 2025). Allahloh ja muut (2025) kuvaavat ratkaisua, jossa PLC:n ja digitaalisen kaksosen välinen tiedonsiirto suojataan salauksen, palvelinvarmenteiden ja molemminpuolisen tunnistautumisen avulla. Lisäksi tuotannon ohjausverkko voidaan erottaa yritysverkosta omaksi verkkokseen, ja liikennettä voidaan rajoittaa palomuurilla siten, että vain järjestelmän toiminnan kannalta välttämättömät viestintäprotokollat sallitaan (Allahloh ja muut, 2025).

Allahloh ja muut (2025) osoittavat myös, että tietoturva ei rajoitu pelkkään liikenteen salaamiseen, vaan siihen voidaan yhdistää datan eheystarkastuksia ja fysikaalisen uskottavuuden arviointia. Heidän esimerkissään jokainen reunalaskentalaitteelle saapuva paketti aikaleimataan ja allekirjoitetaan, minkä lisäksi digitaalinen kaksonen tarkistaa sekä liikenteen aitouden että mittausarvojen fysikaalisen uskottavuuden (Allahloh ja muut, 2025). Tällöin väärennetyt tai toistetut mittaukset voidaan hylätä ennen kuin ne ehtivät vaikuttaa prosessin ohjaukseen, mikä parantaa sekä järjestelmän tietoturvaan että toiminnallista turvallisuutta (Allahloh ja muut, 2025).

Frankó ja muut (2022) tuovat esiin, että koneoppimista hyödynnetään IloT-järjestelmissä erityisesti tunkeutumisen havaitsemisessa, poikkeamien tunnistamisessa, tunnistautumisen tukena ja datan eheyden varmistamisessa. Heidän mukaansa valvontalokeihin, verkkoliikenteeseen ja järjestelmän toimintaan perustuvia piirteitä voidaan analysoida esimerkiksi luokittelumenetelmillä tai poikkeavuuksien tunnistamiseen tarkoitetuilla malleilla, jotta luvaton toiminta voidaan havaita mahdollisimman varhain (Frankó ja muut, 2022). Samat tutkimukset korostavat myös palvelunestohyökkäysten, väärän datan syötön ja laskennan ulkoistamiseen liittyvien turvallisuusriskien merkitystä IloT-ympäristöissä, joissa järjestelmien korkea käytettävyys on välttämätöntä (Frankó ja muut, 2022).

Tietoturvan lisäksi IloT-järjestelmissä on huomioitava toimintavarmuus myös viestiyhteyksien häiriötilanteissa (Allahloh ja muut, 2025). Allahloh ja muut (2025) kuvaavat

ratkaisua, jossa ohjaimessa käytetään vahtiajastinta ja paikallisesti välimuistiin tallennettuja ohjausarvoja, jotta suljettu säätöpiiri voi jatkaa toimintaansa myös viestiyhteyden katketessa. Heidän esimerkissään järjestelmään sisältyy lisäksi varayhteys, jonka avulla yhteys voidaan palauttaa nopeasti ensisijaisen linkin vikaantuessa, mikä parantaa järjestelmän käytettävyyttä ja resilienssiä (Allahloh ja muut, 2025).

Näiden lähteiden perusteella IIoT-järjestelmien tietoturva ja turvallisuus eivät ole yksittäisiä teknisiä ominaisuuksia, vaan ne muodostavat laajan kokonaisuuden, joka kattaa verkon suojauksen, tunnistautumisen, datan eheyden, häiriönsietokyvyn ja turvallisen ohjauksen (Frankó ja muut, 2022; Allahloh ja muut, 2025). Tämä tekee tietoturvasta yhden keskeisimmistä haasteista teollisen IoT:n käyttöönotossa ja käytännön soveltamisessa tuotantoympäristöissä (Frankó ja muut, 2022).

6.2 Järjestelmien integrointi

Järjestelmien integraatio ja yhteensopivuus ovat keskeisiä haasteita teollisen IoT:n käyttöönotossa, koska älykkäässä valmistuksessa suuri määrä erilaisia laitteita, ohjelmistoja ja järjestelmätasojia on saatava toimimaan yhdessä. Zeid ja muut (2019) määrittelevät yhteentoimivuuden järjestelmien kykyä vaihtaa tietoa ja käyttää vaihdettua tietoa tehokkaasti. Älykkäässä valmistuksessa yhteentoimivuus voidaan jakaa vertikaaliseen ja horisontaaliseen integraatioon (Zeid ja muut, 2019). Vertikaalinen integraatio viittaa tuotannon eri järjestelmätasojen, kuten kenttälaitteiden, valvontajärjestelmien, tuotannonhallinnan ja yritystason järjestelmien väliseen tiedonkulkuun, kun taas horisontaalinen integraatio liittyy laitteiden, pilvipalvelujen, alustojen ja yritysten väliseen yhteentoimivuuteen tuotantoverkostossa (Zeid ja muut, 2019). IIoT-ympäristöissä haasteita syntyy molemmilla tasoilla, koska tiedon on siirryttävä sekä tuotannon sisällä että eri järjestelmien ja organisaatioiden välillä johdonmukaisesti (Zeid ja muut, 2019).

Yhteentoimivuuden toteuttamista vaikeuttavat muun muassa erilaisten järjestelmien tiedonsiirto, ohjelmistoversioiden yhteensopivuus, terminologian erilaiset tulkinnat sekä

epäyhtenäiset tiedostomuodot ja standardit (Zeid ja muut, 2019). Lisäksi markkinoilla olevien tuotteiden suuri määrä ja heterogeenisyys lisäävät integraatiohaasteita teollisissa ympäristöissä (Zeid ja muut, 2019). Zeid ja muut (2019) jakavat yhteentoimivuuden syntaktiseen ja semanttiseen yhteentoimivuuteen, joista ensimmäinen liittyy datan muotoon ja siirtoon, ja jälkimmäinen datan merkityksen yhteiseen ymmärtämiseen.

Valmistuksen näkökulmasta yhteentoimivuuden puutteella voi olla merkittäviä kustannusvaikutuksia. Zeid ja muut (2019, viitattu teoksessa Brunnemeier & Martin, 1999) mainitsevat tutkimuksen, jonka mukaan pelkästään Yhdysvaltain autoteollisuudessa yhteentoimivuuden puute aiheuttaa vuosittain miljardin dollarin taloudelliset menetykset toimitusverkostossa. Heidän mukaansa tehokkain tapa tukea yhteentoimivuutta on hyödyntää avoimia standardeja ja alustoja, sillä konekohtaiset ratkaisut tai koko toimialan täydellinen standardointi ovat käytännössä vaikeita toteuttaa (Zeid ja muut, 2019).

Pilvipohjaisessa valmistuksessa yhteentoimivuus korostuu entisestään, koska tuotannon resursseja ja palveluja virtualisoidaan IoT:n, pilvilaskennan ja kyber-fyysisten teknologioiden avulla (Zeid ja muut, 2019). Tämän vuoksi järjestelmien integraatio ja yhteensopi vuus muodostavat yhden IIoT:n keskeisimmistä käyttöönottohaasteista, sillä ilman niitä tuotannosta kerättyä dataa ei pystytä siirtämään, tulkitsemaan ja hyödyntämään johdonmukaisesti koko tuotantojärjestelmässä (Zeid ja muut, 2019).

6.3 Käyttöönoton kustannukset ja osaamisvaatimukset

Teollisen IoT:n käyttöönottoa hidastavat erityisesti investointikustannukset ja osaamiseen liittyvät haasteet, jotka korostuvat etenkin pienissä ja keskisuurissa valmistavan teollisuuden yrityksissä (Yarbrough ja muut, 2024; Ghafari ja muut, 2024). Yarbrough ja muut (2024) toteavat, että smart manufacturing -teknologioiden käyttöönottoa arvioitaessa valmistajat nimeävät toistuvasti kustannukset, pääomatarpeet ja työvoimaan liittyvät ongelmat keskeisiksi esteiksi. Ghafari ja muut (2024) puolestaan korostavat, että

IIoT:n käyttöönotto edellyttää korkeita alkuinvestointeja sekä jatkuvaa taloudellista panostusta koko digitaalisen murroksen ajan.

Yarbrough ja muut (2024) raportoivat, että antureiden ja IoT-ratkaisujen käyttöönoton kolme merkittävintä estettä olivat osaamisvaje, tietoisuuden puute ja liiketoimintaperustelujen puute. Heidän tutkimuksessaan osaamisvaje nousi suurimmaksi esteeksi, ja se mainittiin 20 prosentissa vastauksista. Tulokset viittaavat siihen, että teknologian käyttöönoton ongelmat eivät liity pelkästään itse laitteisiin tai ohjelmistoihin, vaan myös siihen, että organisaatioissa ei aina ole riittävää osaamista tai selkeää käsitystä teknologian tuottamasta hyödystä.

Kustannushaasteet näkyvät erityisen selvästi silloin, kun IIoT-ratkaisuja otetaan käyttöön osana laajempaa tuotannon digitalisointia (Ghafari ja muut, 2024). Ghafari ja muut (2024) toteavat, että käyttöönotto ei aiheuta vain alkuvaiheen investointikustannuksia, vaan myös jatkuvia käyttömenoja, kuten ohjelmistopäivityksiä, järjestelmien ylläpitoa ja henkilöstön koulutusta. Heidän mukaansa pienet ja keskisuuret yritykset eivät usein ole varmoja siitä, ylittävätkö IIoT:n taloudelliset hyödyt alkuinvestoinnit, koska takaisinmaksuaika voi olla pitkä ja investoinnin tuotto epävarma (Ghafari ja muut, 2024). Tästä syystä kustannustehokkuuden arviointi ja investointien perustelevuus ovat olennainen osa IIoT:n käyttöönottoa (Ghafari ja muut, 2024).

Yarbrough ja muut (2024) havaitsivat myös, että vastaavat kustannus- ja osaamishaasteet näkyvät laajemmin muissakin smart manufacturing -teknologioissa. Heidän aineistossaan automaation tärkeimmiksi esteiksi nousivat korkea kustannustaso 21 prosentissa vastauksista ja osaamisvaje 20 prosentissa vastauksista, mikä osoittaa, että teknologian käyttöönoton ongelmat eivät rajoitu vain yksittäisiin IIoT-ratkaisuihin (Yarbrough ja muut, 2024). Samalla tutkimus korostaa, että yritykset tarvitsevat paitsi pääomaa myös osaavaa henkilöstöä, joka pystyy ottamaan käyttöön, ylläpitämään ja kehittämään uusia digitaalisia ratkaisuja (Yarbrough ja muut, 2024).

Ghafari ja muut (2024) korostavat, että IIoT:n käyttöönoton taloudellista arviointia ei tulisi rajata vain laitehankintoihin, vaan siinä on huomioitava myös laajemmat kustannuserät, kuten laitteisto, ohjelmistot, laskenta, tiedonsiirto ja tallennus. Heidän mukaansa juuri näiden kustannusten kokonaisuus tekee käyttöönotosta haastavaa erityisesti pk-yrityksille, joilla on rajalliset resurssit toteuttaa laajoja digitaalisia investointeja. Näin ollen IIoT:n käyttöönoton haasteet liittyvät sekä teknologian hintaan että organisaation kykyyn hankkia, soveltaa ja ylläpitää tarvittavaa osaamista. Taulukkoon 4 on tiivistetty IIoT:n keskeisiä hyötyjä ja käyttöönottoon liittyviä haasteita.

Taulukko 4. IIoT:n hyödyt ja haasteet.

	Hyödyt	Haasteet
Tiedon saatavuus	Reaaliaikainen näkyvyys tuotantoon	Suurten datamäärien hallinta ja datan laatu
Järjestelmäarkkitehtuuri	Verkottuneet ja joustavat tuotantojärjestelmät	Järjestelmien yhteensopivuus ja integraatio
Valvonta	Parempi tilannetieto ja valvottavuus	Tietoturvariskit
Optimointi	Mahdollisuus kehittää toimintaa jatkuvasti	Osaamisvaatimukset

7 Johtopäätökset ja yhteenveto

Työn perusteella voidaan todeta, että teollinen IoT muodostaa keskeisen osan modernia tuotantoympäristöä, jossa tuotannon valvonta perustuu yhä enemmän jatkuvaan tiedonkeruuseen, verkottuneisiin laitteisiin ja reaaliaikaiseen tilannekuvaan. Tuotantoprosessien valvonnan näkökulmasta IIoT mahdollistaa poikkeamien aikaisemman havaitsemisen, tuotannon paremman läpinäkyvyyden sekä nopeamman reagoinnin häiriöihin. Anturit, tiedonkeruujärjestelmät, kenttätason datavirrat sekä valvontajärjestelmät, kuten ICS- ja SCADA-ratkaisut, muodostavat yhdessä kokonaisuuden, jonka avulla tuotannon tilaa voidaan seurata useilla järjestelmätasoilla samanaikaisesti.

Työssä myös havaittiin, että teollinen IoT ei rajoitu pelkästään valvontaan, vaan sillä on merkittävä rooli myös tuotantoprosessien optimoinnissa. Reaaliaikaisen datan hyödyntäminen tukee päätöksentekoa, resurssien tehokasta käyttöä, laadun parantamista sekä tuotannon suorituskyvyn kehittämistä. Erityisen merkittäväksi sovellusalueeksi on osoittautunut ennakoiva kunnossapito, jossa laitteiden kuntoa voidaan arvioida jatkuvasti mittausdatan avulla ja huoltotoimenpiteitä voidaan ajoittaa todellisen tarpeen perusteella. Lisäksi digitaalisen kaksosen on todettu tarjoavan lupaavan välineen tuotantoprosessien mallintamiseen, vaikka sen hyödyntäminen onkin kirjallisuuden perusteella toisiksi painottunut enemmän valvontaan ja kunnossapitoon kuin varsinaiseen reaaliaikaiseen ohjaukseen.

Työn perusteella voidaan vastata tutkimuskysymyksiin seuraavasti. Teollista IoT:tä hyödynnetään tuotantoprosessien reaaliaikaisessa valvonnassa keräämällä antureiden ja muiden kenttälaitteiden avulla jatkuvaa mittausdataa tuotannon tilasta, siirtämällä tämä tieto valvonta- ja hallintajärjestelmiin sekä hyödyntämällä sitä prosessin seurannassa, poikkeamien tunnistamisessa ja häiriötilanteisiin reagoinnissa. Tuotantoprosessien optimointia ja ennakoivaa kunnossapitoa se tukee tarjoamalla jatkuvaa ja analysoitavaa tietoa tuotannon tilasta, laitteiden kunnosta sekä prosessin suorituskyvystä. Teollisen IoT:n keskeiset hyödyt liittyvät tuotannon läpinäkyvyyden, laadun, tehokkuuden ja

reagointikyvyn paranemiseen, kun taas merkittävimmät haasteet liittyvät tietoturvaan, järjestelmien integraatioon sekä käyttöönoton kustannuksiin ja osaamisvaatimuksiin.

Työ osoittaa, että teollisen IoT:n käyttöönotto tarjoaa huomattavia mahdollisuuksia tuotannon kehittämiseen, mutta samalla se edellyttää huolellista suunnittelua, järjestelmien yhteensovittamista ja riittävää osaamista. Erityisesti tietoturvan ja yhteentoimivuuden merkitys korostuu verkottuneissa tuotantojärjestelmissä, joissa tieto liikkuu useiden laitteiden, järjestelmien ja organisaatiosojen välillä. Lisäksi käyttöönoton kustannukset ja osaajapula voivat muodostaa merkittäviä esteitä erityisesti pienille ja keski-suurille yrityksille.

Työn rajauksena on ollut kirjallisuuspohjainen tarkastelu, eikä siinä ole toteutettu empiiristä tutkimusta tai tapauskohtaista sovellusanalyysiä. Tämän vuoksi työ tarjoaa lähinnä teoreettisen kokonaiskuvan teollisen IoT:n merkityksestä tuotantoympäristöissä. Jatkok tutkimuksessa olisi hyödyllistä tarkastella IIoT-ratkaisujen käytännön toteutuksia yksittäisissä teollisuusympäristöissä sekä arvioida tarkemmin niiden vaikutuksia esimerkiksi tuotannon tehokkuuteen, kunnossapidon kustannuksiin ja järjestelmien tietoturvaan.

Tulevaisuudessa teollisen IoT:n merkityksen voidaan arvioida edelleen kasvavan osana älykkäiden ja verkottuneiden tuotantojärjestelmien kehitystä. Reaaliaikaisen datan hyödyntäminen, tekoälypohjainen analytiikka, digitaaliset kaksoset ja hajautettu laskenta voivat vahvistaa entisestään tuotannon valvonnan, optimoinnin ja ennakkoinnin mahdollisuuksia. Samalla tuotantojärjestelmien verkottuminen lisää tarvetta huolehtia tietoturvasta, järjestelmien yhteensopivuudesta ja osaamisen kehittämisestä.

Kokonaisuutena voidaan todeta, että teollinen IoT on keskeinen osa Teollisuus 4.0 -kehitystä ja modernia verkottunutta tuotantoa. Sen merkitys ei rajoitu yksittäisiin teknisiin ratkaisuihin, vaan se muodostaa perustan laajemmalle siirtymälle kohti älykkäämpiä, joustavampia ja datalähtöisempiä tuotantojärjestelmiä.

Lähteet

- Allahloh, A. S., Sarfraz, M., Ghaleb, A. M., Dabwan, A., Ahmed, A. A. & Al-Shayea, A. (2025). Integration of Industrial Internet of Things (IIoT) and Digital Twin Technology for Intelligent Multi-Loop Oil-and-Gas Process Control. MDPI. <https://doi.org/10.3390/machines13100940>
- Azangoo, M., Blech, J. O. & Atmojo, U. D. (2020). Towards formal monitoring of workpieces in agile manufacturing. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICIT45562.2020.9067188>
- Bányai, T. & Bányai, Á. (2025). Real-Time Maintenance Optimization with Industrial Internet of Things. MDPI. <https://doi.org/10.3390/app15105640>
- Brandl, D. & Johnsson, C. (n. d.) Beyond the Pyramid: Using ISA95 for Industry 4.0 and Smart Manufacturing. ISA. Noudettu 12.3.2026 osoitteesta <https://www.isa.org/intech-home/2021/october-2021/features/beyond-the-pyramid-using-isa95-for-industry-4-0-an>
- Czerwińska, K. & Pacana, A. (2022). Analysis of the maturity of process monitoring in manufacturing companies. Paradigm. <https://doi.org/10.30657/pea.2022.28.30>
- Frankó, A., Hollósi, G., Ficzer, D. & Varg, P. (2022). Applied Machine Learning for IIoT and Smart Production—Methods to Improve Production Quality, Safety and Sustainability. MDPI. <https://doi.org/10.3390/s22239148>
- Ghafari, F., Shourangiz, E. & Wang, C. (2024). Cost Effectiveness of the Industrial Internet of Things Adoption in the U.S. Manufacturing SMEs. ResearchGate. <https://doi.org/10.35534/ism.2024.10008>
- Griffin, N. (2022). Mikä on teollinen esineiden internet (IIoT)? Fiberroad. Noudettu 8.3.2026 osoitteesta <https://fiberroad.com/fi/resources/articles/industrial-internet-of-things/>
- IBM. (n. d.). What is Industry 4.0? Noudettu 8.3.2026 osoitteesta <https://www.ibm.com/think/topics/industry-4-0>

- Inductive Automation. (2026). SCADA: Supervisory Control and Data Acquisition. Noudettu 9.3.2026 osoitteesta <https://inductiveautomation.com/resources/article/what-is-scada>
- ISA. (n. d.). ISA-95 Series of Standards. Noudettu 10.3.2026 osoitteesta <https://www.isa.org/standards-and-publications/isa-standards/isa-95-standard>
- Koskinen, K. (2018). Automaatio – mitä se on? Automaatioseura. Noudettu 28.3.2026 osoitteesta https://www.automaatioseura.fi/site/assets/files/1380/automaatio_ennen_nyt_ja_tulevaisuudessa_av_artikkelisarja_2018.pdf
- Lee, J., Bagheri, B. & Kao, H. A. (2015). A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. ScienceDirect. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2014.12.001>
- Noor-A-Rahim, John, J., Firyaguna, F., Sherazi, H. H. R., Kushch, S., Vijayan, A., O'Connell, E., Pesch, D., O'Flynn, B., O'Brien, W., Hayes, M. & Armstrong, E. (2023). Wireless Communications for Smart Manufacturing and Industrial IoT: Existing Technologies, 5G and Beyond. MDPI. <https://doi.org/10.3390/s23010073>
- Okuyelu, O., Adaji, O. O., & Doskenov, B. (2024). Advancing Manufacturing Efficiency through Real-time Production Monitoring and Control Systems. Journaljerr. <https://doi.org/10.9734/jerr/2024/v26i41125>
- Russem, S. (2023). What's in a name? MES and ISA-95. Kanoa. Noudettu 10.3.2026 osoitteesta <https://kanoa.ai/kanoa-blog/whats-in-a-name-mes-and-isa-95>
- SAP. (2026). What is Industry 4.0? Noudettu 8.3.2026 osoitteesta <https://www.sap.com/finland/resources/what-is-industry-4-0>
- Siemens. (n. d.). ISA-95 framework and layers. Noudettu 8.3.2026 osoitteesta <https://www.siemens.com/en-us/technology/isa-95-framework-layers/>
- Wang, X., Hu, H., Wang, Y. & Wang, Z. (2024). IoT Real-Time Production Monitoring and Automated Process Transformation in Smart Manufacturing. IGI Global. <https://doi.org/10.4018/JOEUC.336482>

- Yarbrough, A. C., Peters, C. & Harris, G. A. (2024). Smart manufacturing adoption study 2024. Noudettu 4.4.2026 osoitteesta https://www.eng.auburn.edu/icams/ISE--ICAMS-SMART-Report_2024_V5.pdf
- Zeid, A., Sundaram, S., Moghaddam, M., Kamarthi, S. & Marion, T. (2019). Interoperability in Smart Manufacturing: Research Challenges. MDPI. <https://doi.org/10.3390/machines7020021>