

Juuso Kolari

**ESINEIDEN INTERNETIN KEHITYKSEN  
VAIKUTUKSET  
PROSESSITEOLLISUUTEEN**



JYVÄSKYLÄN YLIOPISTO  
INFORMAATIOTEKNOLOGIAN TIEDEKUNTA  
2023

# TIIVISTELMÄ

Kolari, Juuso

Esineiden internetin kehityksen vaikutukset prosessiteollisuuteen

Jyväskylä: Jyväskylän yliopisto, 2023

Tietojärjestelmätiede, kandidaatintutkielma

Ohjaaja(t): Clements, Kati

Tässä kirjallisuuskatsauksena toteutetussa kandidaatintutkielmassa perehdytään esineiden internetin (IoT) tuomiin mahdollisuuksiin prosessiteollisuuden ympäristöihin. Tutkielman tarkoituksena on tuottaa prosessiteollisuuden sektorilla toimiville yrityksille katsaus siitä, millaisia hyötyjä neljännen teollisuuden vallankumouksen IoT-ratkaisuilla on mahdollista saavuttaa. Teollisuus digitalisoituu tällä hetkellä kasvavissa määrin ja näin ollen digitalisaation tuomat hyödyt ja haasteet on tarpeellista tiedostaa alalla toimittaessa. Tutkielmassa käytetään lähdekirjallisuutena tieteellisiä artikkeleja ja julkaisuja sekä laitevalmistajien verkkosivuilta löytyvää informaatiota. Tutkielman tuloksista voidaan havaita, että oikein implementoituna IoT-ratkaisuilla voidaan saavuttaa hyötyjä tuotannon tehostamisessa ja hallittavuudessa, kustannusten säästämässä sekä työturvallisuudessa. IoT-ratkaisuja käyttöönotettaessa tulee kuitenkin ottaa huomioon tietoturvaan ja työntekijöiden turvallisuuteen liittyviä asioita. Tutkielman tuloksia voidaan käyttää hyödyksi pohjatietona prosessiteollisuuden sektorilla toimivan yrityksen digitalisaatiota suunniteltaessa.

Asiasanat: IoT, IIoT, Industrial Internet, Digitalization in Industry, Industry 4.0, Industry 5.0

## **ABSTRACT**

Kolari, Juuso

The effects of development of IoT for process manufacturing

Jyväskylä: University of Jyväskylä, 2023

Information Systems, Bachelor Thesis

Supervisor(s): Clements, Kati

This bachelor's thesis focuses on the study of the Internet of Things (IoT) and the possibilities it brings to the field of process manufacturing industry. The motivation for this study is to conduct a survey for companies working in the process manufacturing field about the benefits that can be achieved by Industry 4.0 and IoT solutions. Industrial companies are increasingly undergoing digitalization, and the benefits and challenges of digitalization should be taken into consideration when operating in the industrial field. Scientific research articles and publications and information found on the websites of IoT product manufacturers were used as sources in this study. It can be seen from the results of this study that when IoT solutions are correctly implemented in a business, they can benefit in production efficiency and management, cost savings, and operating safety. When commissioning IoT solutions, cybersecurity and occupational safety are things that should be taken into consideration. The results of this study can be used as a foundation for planning the digitalization of a company's operations in the process manufacturing industry.

Keywords: IoT, IIoT, Industrial Internet, Digitalization in Industry, Industry 4.0, Industry 5.0

## KUVIOT

KUVIO 1.....	12
KUVIO 2.....	14
KUVIO 3.....	16

## TAULUKOT

TAULUKKO 1.....	7
TAULUKKO 2.....	17

# SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	6
2	ESINEIDEN INTERNET .....	9
2.1	Mikä on Esineiden internet?.....	9
2.1.1	Esineiden internetin toimintaperiaatteet .....	10
2.1.2	Esineiden internetin kehittyminen .....	11
2.1.3	Teollinen Esineiden internet .....	11
2.2	Esineiden Internetin soveltaminen käytäntöön .....	13
2.3	Teollisen esineiden internetin soveltaminen käytäntöön .....	13
3	PROSESSITEOLLISUUS.....	15
3.1	Mitä on prosessiteollisuus? .....	15
3.2	Prosessiteollisuuden kehittyminen .....	16
4	TEOLLISEN ESINEIDEN INTERNETIN SOVELTAMINEN PROSESSITEOLLISUUTEEN.....	17
4.1	Ennakoiva ja älykäs huoltaminen .....	18
4.2	Reaaliaikaisen datan hyödyntäminen.....	18
4.3	Digitaalinen kaksonen.....	19
4.4	Työturvallisuuden parantaminen .....	20
4.5	Kohdattavat haasteet.....	21
5	YHTEENVETO JA POHDINTA .....	22
	LÄHTEET .....	24

# 1 JOHDANTO

Tutkielma liittyy käsillä olevaan teolliseen murrokseen, jossa ollaan siirtymässä edelleen kehittyvästä neljännestä teollisesta vallankumouksesta (Industry 4.0), kohti viidettä teollista vallankumousta (Industry 5.0). Tämän hetken kehityksen keskipisteenä on hyvin vahvasti digitalisaatio ja siihen nojaavat sovellukset. Teollisuuden digitalisoitumisen tavoitteena on kehittää teollista tuotantoa tehokkaammaksi, älykkäämmäksi ja turvallisemmaksi. Digitalisaatio tuo työkaluja sekä teollisuuden toimihenkilöille, että tuotannon parissa työskenteleville työntekijöille. Teollinen ympäristö luo kuitenkin digitalisaatiolle aivan omanlaiset haasteensa, jotka liittyvät vahvasti henkilö- ja tietoturvallisuuteen sekä valtaviin datamääriin. Teollinen ympäristö on erittäin mielenkiintoinen digitalisaation kohde, sillä se on todella monipuolinen kenttä ja uusista ratkaisuista on saavutettavissa hyötyjä monella eri osa-alueella.

Teollisuus on kehittynyt ihmisen olemassaolon ajan aina uusien teknologisten ratkaisujen myötä. Ensimmäinen teollisuuden vallankumous tapahtui, kun siirryttiin manuaalisesta tuotannosta käyttämään koneita ja laitteita, jotka toimivat vesi- tai höyryvoimalla. Toisessa teollisuuden vallankumouksessa, sähkö mahdollisti tehtaiden muuttamisen moderneiksi tuotantolinjoiksi, joka toi mukanaan suuremmat tuotantomäärät ja näin ollen taloudellista kasvua. Kolmanteen teolliseen vallankumoukseen tultaessa tietokoneet tulivat osaksi tehtaiden tuotantoa, joka mahdollisti tuotannon automaation. Neljäs teollinen vallankumous tuo ja on tuonut teollisuuteen IoT-sensoreita ja toimilaitteita, jotka mahdollistavat reaaliaikaisen datan keräämisen ja seurannan, joka luo edellytykset parempaan päätöksentekoon ja toiminnan tehostamiseen. Viidennen teollisen vallankumouksen voisi katsoa kulkevan käsikädessä neljännen teollisen vallankumouksen kanssa. Viides teollinen vallankumous keskittyy kehittämään ihmisten ja robottien, koneiden ja laitteiden välistä yhteistyötä. Yhteistyön kehittämisen lisäksi viides teollinen vallankumous keskittyy myös arvoihin, kuten siihen kuinka teollisuus tukisi kestäväää kehitystä ja olisi ilmastoystävällisempää. Viidenteen teolliseen vallankumoukseen liittyy myös ajatus ihmisen ja laitteiden muodostamasta symbioosista (Xu ym., 2021).

TAULUKKO 1

Teollinen vallankumous	Aikaikkuna	Teknologiat
Ensimmäinen	1800- ja 1900-luku	Mekaaninen tuotanto vesi- ja höyryvoimalla
Toinen	Myöhäinen 1900-luku - 1970-luku	Työnjakoon perustuva massatuotanto sähkövoimalla
Kolmas	1970-luku - tämä päivä	Elektroniikan ja informaatioteknologian ohjaama monimutkaisten tehtävien automaatio
Neljäs	Tämä päivä	Kyberfyysiset järjestelmät
Viides	Tämä päivä - tulevaisuus	Ihmisen ja teknologian saumaton vuorovaikutus

1-4 teollinen vallankumous (Mohamad ym., 2018).

5 teollinen vallankumous (Paschek ym., 2019).

Taulukossa 1 esitetään teollisuuden vallankumousten eri vaiheet ja niiden keskeisimmät teknologiset ajurit. Taulukon avulla on helppo hahmottaa, kuinka asiat ovat kehittyneet historian saatossa ja saada käsitys tulevan kehityksen suuntaviivoista.

Ciscon mukaan vuoteen 2030 mennessä internettiin tulee olemaan yhdistettynä 500 miljardia laitetta (Shafique ym., 2020). Yhdistettyjen laitteiden määrä tulee siis lähivuosina jatkamaan räjähdysmäistä kasvuaan. IoT-laitteiden osuus tästä kasvusta tulee olemaan merkittävä, sillä IoT-ratkaisut koostuvat yleensä suurista laitekokonaisuuksista. Suuri laitteiden määrä mahdollistaa isojen datamäärien keräämisen, jota käsittelemällä on mahdollista saavuttaa luotettavaa informaatiota eri asioista.

Hyvänä motivaationa aiheen tutkimiselle toimii sen tarjoamat tulevaisuuden työmahdollisuudet. IoT-alan on ennustettu kasvavan erittäin voimakkaasti käynnissä olevan vuosikymmenen aikana. Vuoteen 2027 mennessä globaalin IoT markkinan on arvioitu kasvavan 1,5 biljoonaan yhdysvallan dollariin, joka olisi 25 prosentin kasvu vuoteen 2019 verrattuna (*Job Opportunities in the Internet of Things in 2022*, 2021). Ala tulee näin ollen tarvitsemaan paljon erilaisia osaajia, jotta järjestelmiä ja kehitystä eri segmenteille saadaan toteutettua. Lisäksi teollisuuden digitalisaatio luo mielenkiintoisen rajapinnan, jossa monen eri alan ammattilaisen osaamista täytyy yhdistää, jotta lopputuloksesta saadaan toimiva.

Tutkielma keskittyy pääosin tutkimaan aihetta neljättä teollista vallankumousta ja sen tuomaa teknologista kehitystä silmällä pitäen, sillä se on viidennen vallankumouksen rinnalla edelleen ajankohtainen aihe. Tutkielma pyrkii vastaamaan seuraavaan kysymykseen:

## 1. Minkälaisia mahdollisuuksia esineiden internetin kehittyminen tuo prosessiteollisuuteen?

Tutkimuskysymykseen etsitään vastauksia kirjallisuuskatsauksen keinoin. Aiheesta etsitään ajankohtaisia tutkimuksia sekä tietoa erilaisista IoT-järjestelmistä ja niiden valmistajista. Lähteenä käytetyt tutkimukset ovat pääosin haettu Google Scholarin kautta. Tutkielman lähteinä käytetään pääosin vertaisarvioituja tieteellisiä julkaisuja. Tutkielman keskeisimmät käsitteet ovat aiemmin esitellyt teollisuuden vallankumouksen vaiheet 4.0 ja 5.0, lisäksi IoT, IIoT, Industrial Internet ja Digitalization in Industry. IoT (Internet of Things) eli esineiden internet tarkoittaa erilaisista laitteista, asioista ja esineistä muodostuvaa järjestelmää, jonka osat pystyvät kommunikoimaan verkkoyhteyden välityksellä. IIoT (Industrial Internet of Things) eli teollinen esineiden internet tarkoittaa samantyyppistä järjestelmää kuin edellä mainittu IoT-järjestelmä, mutta teollisuuden ympäristössä. Industrial Internet eli teollinen internet tarkoittaa yleisesti teollisuuden ympäristössä käytettävien laitteiden yhdistämistä internettiin. Digitalization in Industry tarkoittaa teollisuuden alan digitalisaatiota, johon ylempänä mainittuja teknologioita voidaan hyödyntää.

Johdannossa taustoitetaan tutkimukseen liittyvät yhteiskunnalliset vaikutukset, kerrotaan tutkimukseen käytetyistä tavoista ja pohjustetaan aiheeseen liittyvät keskeisimmät termit. Tutkielman toinen luku paneutuu esineiden internettiin, sen toimintaan ja siihen vahvasti liittyviin teknologioihin. Kolmas luku pureutuu prosessiteollisuuteen ja sen kehitykseen. Neljäs luku käsittelee esineiden internetin soveltamista prosessiteollisuuteen. Viidennessä luvussa läpikäydään tulokset ja havainnot sekä pohditaan tutkimuksesta heränneitä ajatuksia ja mahdollisia jatkotutkimus kohteita.



## 2 ESINEIDEN INTERNET

Tässä luvussa kerrotaan tarkemmin mitä tutkielman keskeiset käsitteet Esineiden internet (Internet of Things) eli IoT ja Teollinen esineiden internet (Industrial Internet of Things) eli IIoT tarkoittavat. Luvussa tuodaan esiin IoT:n ja IIoT:n tekniset toimintaperiaatteet, kehittyminen sekä esitellään muutaman esimerkin avulla, mitenkä niitä on sovellettu käytäntöön. Esimerkkinä IoT:n soveltamisesta käytetään älykoti (Smart Home) ratkaisua ja IIoT:n soveltamisesta Schaefflerin OPTIME-järjestelmää.

### 2.1 Mikä on Esineiden internet?

Esineiden internet eli IoT ja siihen pohjautuvat ratkaisut ovat nykyisin vahvasti läsnä kaikkialla. Lyhyesti esineiden internet voitaisiin kuvata ”asioista” eli fyysisistä laitteista koostuvasta systeemistä, jossa laitteet voivat lähettää dataa ja kommunikoida keskenään muodostamansa verkon välityksellä (Ding ym., 2020). Esimerkkejä esineiden internettiä soveltavista ratkaisuksista ovat lisätty todellisuus (Augmented Reality), itseohjautuvat autot (Self-driven cars) sekä älykkäät ympäristöt (Smart Environment). Kehittyäkseen teknologiana eteenpäin, esineiden internet vaatii ympärilleen verkkoinfrastruktuurin, joka mahdollistaa suurempien datamäärien käsittelyn, laajemman kaistan käytön, suuremman verkkokapasiteetin, pienemmän latenssin ja korkeamman suorituskyvyn. Esineiden internetin lopullisena tavoitteena on tarjota ”Plug and Play”-tyyppisiä ratkaisuja, jotka ovat helppokäyttöisiä, etäohjattavia sekä helposti konfiguroitavissa. (Shafique ym., 2020). ”Plug and Play”-ratkaisusta esimerkiksi voisi toimia pyykinpesukone, joka saataisiin muutamalla napin painalluksella yhdistettyä kotitalouden langattomaan verkkoon. Verkkoon yhdistämisen jälkeen pyykinpesukonetta voitaisiin hallita ja tarkkailla esimerkiksi älypuhelimien sovelluksen avulla. Näissä ratkaisuissa laitteen käyttäjän ei tarvitsisi omata suurta teknistä osaamista, sillä konfigurointi olisi vaivatonta.

Esineiden internet tarjoaa ratkaisuja sekä yksityishenkilöiden sekä yritysten käyttöön. Yksityishenkilöille esineiden internet mahdollistaa esimerkiksi älykoti (Smart Home), sähköisen terveydenhuollon (E-Health) sekä älykkään opiskelun (Smart Learning) ratkaisut. Yrityspuolelle esineiden internet mahdollistaa ratkaisuja automaatioon, älykkääseen toimitusketjuun, kuljetukseen, etähallintaan ja logistiikkaan (Shafique ym., 2020).

IoT:n alkuperän voidaan katsoa sijoittuvan 1980-luvulle, jossa ajatus kaikkialla olevasta tietojenkäsittelystä syntyi. Tavoitteena oli upottaa teknologia jokapäiväiseen elämään. Terminä esineiden internet juontaa juurensa vuoteen 1999 ja se on alun perin Kevin Ashtonin lanseeraama. IoT terminä pyörii paljon sanan ”älykäs” ympärillä. Puhutaan laitteista ja sensoreista, jotka pystyvät itsenäisesti hankkimaan ja soveltamaan tietoa. IoT-käsitteen alle menee asiat, laitteet ja sensorit, jotka ovat yksittäisesti saatavilla verkossa kommunikointi protokollien määrittämällä tavalla.

Esineiden internetin kehitys kulkee pitkälti käsi kädessä 5G-teknologian kehityksen kanssa, sillä 5G-verkon infrastruktuuri mahdollistaa esineiden internetin ympäristöjen rakentamisen käytännössä (Shafique ym., 2020). 5G-teknologia mahdollistaa IoT-laitteille verkkoinfrastruktuurin, joka täyttää tekniset vaatimukset reaaliaikaiselle viestinnälle.

### 2.1.1 Esineiden internetin toimintaperiaatteet

Esineiden internetin on tarkoitus muodostaa järjestelmäkokonaisuus, jossa erilaiset samaan verkkoon kytketyt laitteet voivat kommunikoida keskenään sekä jakaa ja jalostaa kerättyä dataa järjestelmän käyttäjän hyödynnettäväksi. Esineiden internetin perusarkkitehtuuri muodostuu kolmesta eri komponentista, jotka ovat laitteisto (Hardware), väliohjelmisto (Middle Layer) ja esitystapakerros (Presentation Layer). Laitteisto koostuu sensoreista ja kytkemiseen tarvittavista liitäntäpiireistä. Väliohjelmisto koostuu datan varastointiin, analysointiin ja käsittelyyn tarvittavista resursseista. Esitystapakerros koostuu datan visualisointi työkaluista, jolla kerätty data voidaan esittää loppukäyttäjälle ymmärrettävässä muodossa (Shafique ym., 2020). Esineiden internetin komponenttien välille muodostuvat yhteydet voidaan toteuttaa usealla eri teknologialla. Laitteiden ja komponenttien välisiin yhteyksiin voidaan käyttää sekä langattomia että langallisia yhteyksiä. Pienempien alueiden yhteyksiin voidaan käyttää Bluetooth, ZigBee, Wifi ja Optical Wireless Communication - teknologioita. Laajempiin pidemmän kantaman alueisiin on kehitetty teknologioita, kuten Sigfox ja LoRa (Ding ym., 2020). Yksi tapa järjestelmän sensoreiden yhdistämiseen on Mesh-verkko. Mesh-verkko toimii muodostaen verkkoyhteyksiä suoraan sensorilta toiselle. Esimerkiksi myöhemmin tutkielmassa esiteltävä Schaeffler OPTIME-järjestelmä käyttää Mesh-verkkotekniikkaa (OPTIME, 2021).

### 2.1.2 Esineiden internetin kehittyminen

IoT on terminä verrattain uusi, mutta tietoverkkojen ja tietokoneiden käyttäminen laitteiden ja koneiden tarkkailuun ja ohjaamiseen on ollut konseptina olemassa jo vuosikymmenten ajan. Esimerkiksi jo 1970-luvun lopussa oli kaupallisessa käytössä järjestelmä, jolla voitiin tarkkailla sähköverkon mittareita puhelulinjan kautta. 1990-luvulla langattomien teknologioiden kehittyminen mahdollisti "laitteelta laitteelle" ratkaisujen leviämisen laitteiden tarkkailuun ja ohjaamiseen. Moni näistä varhaisista ratkaisuksista perustui muihin tekniikoihin kuin IP-verkkoihin ja internet standardeihin. Ensimmäinen IP-osoitteella varustettu laite, joka pystyttiin käynnistämään ja sammuttamaan internetin välityksellä esiteltiin vuonna 1990. Aluksi internettiin yhdistetyt laitteet olivat lähinnä hauskoja oivalluksia, kuten leivänpaahdin ja kahvipannu, joita voitiin ohjailta internetin välityksellä. Näistä hassuista alkuvaiheista lähtien vankka tutkimus- ja kehityskenttä "älykkäiden objektien verkottumiseen" auttoi luomaan perustan nykypäivän esineiden internetille (Rose ym., 2015).

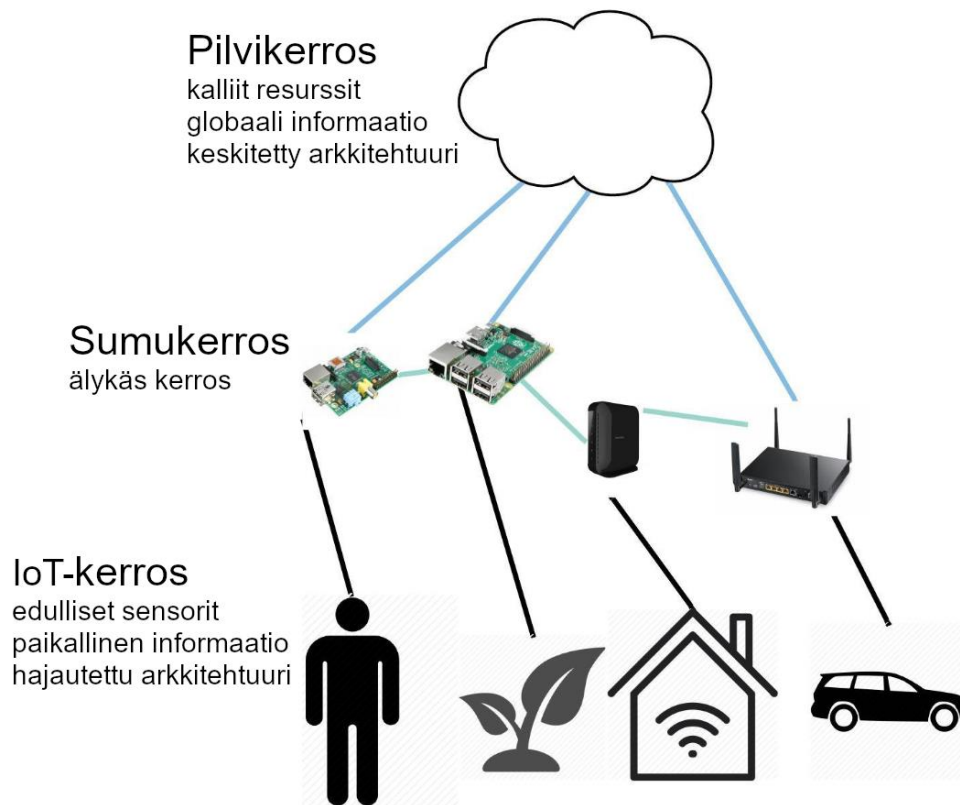
IoT on uusi paradigma, joka on tuonut mukanaan ihmisten ympärille esimerkiksi radiofrekvenssitunnistus tarroja (RFID), antureita, toimilaitteita ja puhelimia, jotka yksilöllisten osoitteiden avulla vuorovaikuttavat toistensa kanssa. IoT-idean päävahvuus on suuri mahdollisuus vaikuttaa erilaisiin jokapäiväisen elämän käyttäytymisen aspekteihin ja potentiaalisten käyttäjien käyttökseen. Nykyinen IoT-Malli koostuu palveluista, jotka ovat hyödykkeitä. Pilvipalvelut tarjoavat virtuaalista infrastruktuuria hyötytietojenkäsittelylle, joka integroi valvontalaitteet, tallennuslaitteet, analytiikkatyökalut, visualisointialustat ja asiakastoimituksen. Nykyinen pilvipalvelujen tarjoama kustannusperusteinen malli mahdollistaa lopullisten palveluiden käytön yrityksille sekä käyttäjille sijainnista riippumatta (Okano, 2017).

### 2.1.3 Teollinen Esineiden internet

Teollisen Esineiden Internetin eli IIoT:n alkuperäinen määritelmä voisi olla tiettyjen IoT-teknologioiden ja tietynlaisten kyberfyysisten järjestelmien älykkäiden objektien käyttö teollisessa ympäristössä teollisuudelle ominaisten tavoitteiden edistämiseksi (Boyes ym., 2018). Siten IIoT-järjestelmät, niiden toimintaperiaatteet ja kehittyminen kulkevat pitkälti käsi kädessä IoT-järjestelmien kanssa. IIoT-järjestelmissä täytyy kuitenkin ottaa huomioon teollisuuden vaatimuksia. Teollisuuden ympäristöön rakennettavissa järjestelmissä laitteiden fyysinen kestävyys sekä tietoturvallisuus ovat isossa roolissa. Järjestelmien täytyy myös monessa tapauksessa olla integroitavissa olemassa olevien laitteistojen ja koneiden rakenteisiin. IIoT:ta kuvaillaan myös jotakuinkin näin: "IIoT-järjestelmä on rakennettu älypuhelimia ja langattomia laitteita isommille laitteille. Sen tavoitteena on yhdistää teollisuuden pääomaa, kuten koneita, sähköverkkoja ja sensoreita pilveen verkon avulla (Boyes ym., 2018).

Weyerin mukaan neljännessä teollisessa vallankumouksessa kenttälaitteet, koneet, tuotantomoduulit ja tuotteet muodostavat Kyberfyysisiä järjestelmiä (Cyber-Physical Systems, CPS), jotka jakavat tietoa, aloittavat toimintoja ja hallitsevat toisiaan autonomisesti (Okano, 2017). Kyberfyysinen järjestelmä yhdistää fyysisen ja virtuaalisen toimintaympäristön. Kyberfyysiset järjestelmät mahdollistavat tiedon saamisen teollisuuden tuotantolinjojen toiminnasta sijainnista riippumatta.

Kuviossa 1 on havainnollistettu kerrokset, josta IIoT-järjestelmä rakentuu. Alin kerros on IoT-kerros, jossa datan kerääminen laitteista ja koneista tapahtuu. Data kerätään paikallisesti tälle kerrokselle, josta se on mahdollista siirtää ylöspäin. Keskimäinen kerros on sumukerros, jossa tehdään raskas datan käsittely. Ylin kerros on pilvikerros, jonka avulla data saadaan globaaliin jakeluun ja tehokkaasti hyödynnettävään muotoon.



KUVIO 1

Kuvan lähde: (Chegini ym., 2021)

## 2.2 Esineiden Internetin soveltaminen käytäntöön

Esimerkkinä IoT:n soveltamisesta käytäntöön esittelen Verisuren hälytysjärjestelmän, joka on älykoti ratkaisu. Älykoti on ollut käsitteenä olemassa jo pitkän aikaa. Vuonna 2004 tehdyssä tutkimuksessa Jiang ja muut esittävät, että älykodin tulee sisältää kolme elementtiä, jotka ovat sisäinen verkko, älykäs ohjaus ja kodin automaatio (Li Jiang ym., 2004). Älykoti ratkaisut ovat monesti laitekonaisuuksia, joita keskitetysti hallitsemalla voidaan helpottaa arkea. Älykoti järjestelmän jokaisella laitteella on kohtuulliset laskenta- ja viestintäominaisuudet. Järjestelmän laitteet viestivät ”kotikeskukselle” (Home Hub), jolla on jonkin verran tallennuskapasiteettia ja, joka voi viestiä paikallisesti järjestelmässä tai järjestelmän ulkopuolelle (Risteska Stojkoska & Trivodaliev, 2017).

Verisuren hälytysjärjestelmä on kodinturvaratkaisu, johon voi myös lisätä älykodin viihteellisiä ja arkea helpottavia ominaisuuksia. Järjestelmä koostuu yksittäisistä sensoreista, kuten murto- ja palohälyttimistä sekä keskusyksiköstä, jonka kautta verkkoliikenne kulkee. Järjestelmään voidaan turvalaitteiden lisäksi liittää esimerkiksi älykkäitä pistorasioita, ilmalämpöpumpun ohjain sekä älylukko. Näin ollen samalla järjestelmällä voidaan suojata kotia sekä lisätä sen mukavuutta. Järjestelmää voidaan hallita ja tarkkailla älypuhelin sovelluksen kautta tai selainpohjaisella käyttöliittymällä (Koti, 2020).

## 2.3 Teollisen esineiden internetin soveltaminen käytäntöön

Esimerkkinä IIoT:n soveltamisesta käytäntöön otetaan Schaefflerin OPTIME-järjestelmän. Se on teollisuuden koneiden ja laitteiden kunnonvalvontaan tarkoitettu järjestelmä. Se rakentuu antureista, jotka pystyvät mittaamaan laitteiden lämpötilaa ja värähtelyä. Näistä arvoista johdetaan koneen toimintaa kuvaavia tunnuslukuja. Järjestelmän anturit muodostavat Mesh-verkon, jonka välityksellä ne voivat olla yhteydessä toisiinsa sekä tukiasemaan, jonne kaikki arvot siirtyvät. Tukiasema välittää arvot sisältävän datan eteenpäin OPTIMEn palvelimelle, jonka kautta dataa voidaan tarkastella järjestelmään kuuluvien käyttöliittymien avulla (OPTIME, 2021).

Järjestelmän avulla yritykset voivat suorittaa tehokkaampaa ja ennakoivaa kunnonvalvontaa ja reagoida mahdollisiin häiriöihin aikaisessa vaiheessa. Hyvissä ajoin huomattu vika laitteen toiminnassa voidaan parhaimmillaan korjata pienellä huollolla ja näin ollen välttyä isommalta vahingolta. Järjestelmän käyttö voi tuottaa huomattavia taloudellisia säästöjä, kun vältetään koneiden hajoamisilta ja tuotannon keskeytyksiltä. Järjestelmä mahdollistaa laitteiden kunnonvalvonnan etänä, jolloin aikaa ei kulu fyysiseen siirtymiseen laitteelta laitteelle.

Kuviossa 2 näkyy OPTIME-järjestelmän antureita, tukiasema sekä mobiilikäyttöliittymä. Järjestelmässä anturit muodostavat IoT-kerroksen, tukiasema muodostaa sumukerroksen ja OPTIME palvelin sekä käyttöliittymät pilvikerroksen. Järjestelmä voitti "Red Dot Design Award" -palkinnon vuonna 2021 (OPTIME, 2021).



KUVIO 2

Kuvan lähde: (OPTIME, 2021).

## 3 PROSESSITEOLLISUUS

Tässä luvussa selitetään mitä prosessiteollisuus tarkoittaa ja kuvataan lyhyesti, kuinka se on kehittynyt teollisten vallankumousten myötä.

### 3.1 Mitä on prosessiteollisuus?

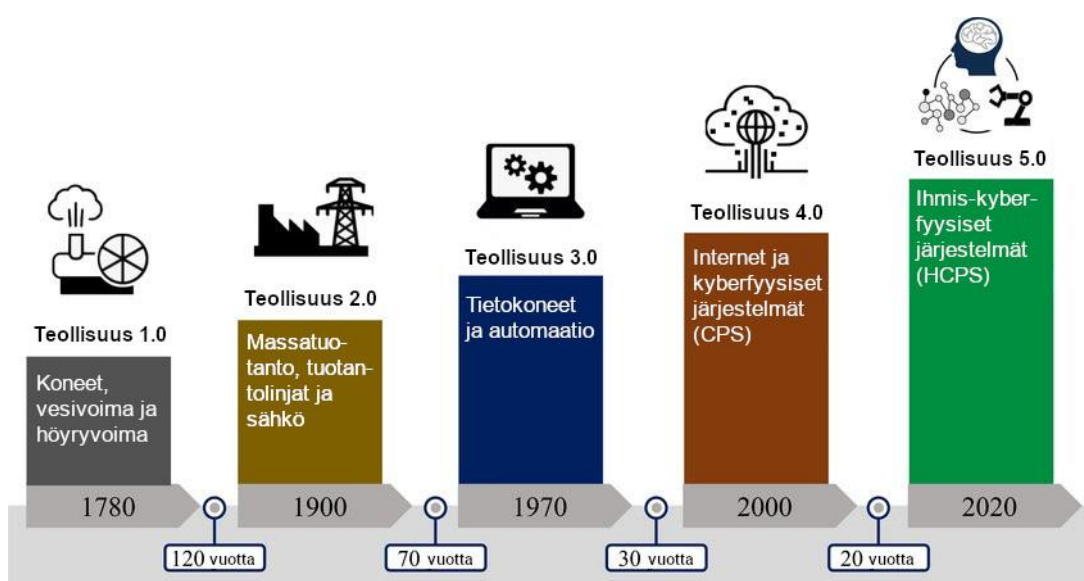
Prosessiteollisuus on teollisuuden haara, jossa hyödykkeitä valmistetaan yhdistelemällä erilaisia ainesosia ja raaka-aineita käyttämällä kaavoja tai reseptejä. Prosessiteollisuutta käytetään hyväksi esimerkiksi ruoan, juomien, öljyn, polttoaineiden, lääkkeiden, kemikaalien ja muovien valmistukseen (*What Is Process Manufacturing?*, 2020). Prosessiteollisuudella on suuri rooli globaalin talouskasvun edistämisessä ja sosiaalietuuksien turvaamisessa. Tämä voidaan osoittaa siten, että maailman 500 suurimman yrityksen listalla on useita prosessiteollisuusyrityksiä, kuten Sinopec, Shell ja ExxonMobil. Kemian tekniikan, laitteiden valmistuksen ja tietotekniikan kehittyessä modernissa prosessiteollisuudessa tuotantoprosessien tilallinen mittakaava ja toiminnallinen monimutkaisuus kasvavat nopeasti (Shang ym., 2019).

Prosessiteollisuuden muotoja ovat esimerkiksi metsäteollisuus, kemianteollisuus, kaivosteollisuus, terästeollisuus, öljynjalostus sekä elintarviketeollisuus. Kaikkia näitä yhdistää se, että lopulliset hyödykkeet valmistetaan eri vaiheissa erilaisten prosessien kautta.

Oluen valmistus on yksi esimerkki prosessiteollisuudesta elintarviketeollisuudessa. Pääraaka-aineet oluen tekoon ovat vilja, mallas, humala, hiiva ja sokeri. Ensiksi viljat liotetaan kiehuvaan vedessä, seuraavaksi seokseen lisätään mallas, humalat ja sokeri. Tästä seoksesta syntyy vierre eli neste, joka sisältää sokerit, jotka hiiva käyttää alkoholin valmistukseen. Kun vierre on tehty, se jätetään käymään. Kun käyminen on valmis, olut voidaan pullottaa ja valmista tuotetta ei voida enää rikkoa sen alkuperäisiin ainesosiin (*What Is Process Manufacturing?*, 2020).

### 3.2 Prosessiteollisuuden kehittyminen

Prosessiteollisuus on kehittynyt jo aiemmin johdannossa esiteltyjen teollisuuden vallankumousten myötä. Ensin siirryttiin vesi- ja höyryvoimalla toimivaan tuotantoon (Teollisuus 1.0). Toinen suuri kehitysaskel oli massatuotanto (Teollisuus 2.0). Massatuotantoa saatiin tehostettua huomattavasti, kun tietokoneet tulivat teollisuuteen kolmannessa murroksessa (Teollisuus 3.0). Neljännen ja viidennen eli käsillä olevien vaiheiden tunnuspiirteitä ovat internetin, kyberfyysisten järjestelmien sekä ihmis-kyberfyysisten järjestelmien ilmaantuminen teollisuuteen (Teollisuus 4.0, Teollisuus 5.0) (Chen ym., 2021). Kuviossa 3 näkyy nämä kyseiset teollisuuden vallankumoukset ja niiden aiheuttamat muutokset.



KUVIO 3

Kuvan lähde: (Chen ym., 2021)

Nykyään prosessiteollisuutta kehitetään voimakkaasti älykkään tuotannon suuntaan (Smart Manufacturing) ja siinä keskeisenä ajurina on teollisuuden digitalisaatio (Digitalization in Industry). Neljäs teollinen vallankumous on mahdollistanut valtavien data määrien saamisen teollisuuden prosesseista, koneista ja laitteista ja sitä on alettu hyödyntämään kohdattavien ongelmien ratkaisemiseksi.

Prosessin turvallisuus ja riskienhallinta ovat edelleen merkittäviä haasteita prosessi- ja tuotantoteollisuudessa (Lee ym., 2019). Näihin haasteisiin pystytään kuitenkin pureutumaan neljännen ja viidennen teollisen vallankumouksen mahdollistamien keinojen avulla.



## 4 TEOLLISEN ESINEIDEN INTERNETIN SOVELTAMINEN PROSESSITEOLLISUUTEEN

Tässä luvussa käsitellään mahdollisuuksia, joita IIoT-järjestelmät tuovat prosessiteollisuuteen. Kappaleessa esitellään koko tutkielman keskeisimmät löydökset. Taulukossa 2 listataan tutkielman tuloksena löydetyt esineiden internetin tuomat mahdollisuudet prosessiteollisuuteen. Nämä mahdollisuudet esitellään myös tarkemmin yksittäin luvun aikana. Lopuksi käsitellään haasteet, jotka tulee ottaa huomioon.

TAULUKKO 2

Esineiden internetin tuomat mahdollisuudet prosessiteollisuuteen	Lähde
Ennakoiva ja älykäs huoltaminen	Lundgren ym., 2021 Bokrantz ym., 2020 <i>OPTIME</i> , 2021
Reaaliaikaisen datan hyödyntäminen	Peres ym., 2018 Khatibisepehr ym., 2013 Y. Zhang ym., 2015 Boyes ym., 2018
Digitaalinen kaksonen	Definition of Digital Twin - Gartner Information Technology Glossary, 2021 Vachálek ym., 2017 Chen ym., 2021
Työturvallisuuden parantaminen	Milijić ym., 2019 Adriaensen ym., 2019

## 4.1 Ennakoiva ja älykäs huoltaminen

Yksi potentiaalisimmista IIoT:n mahdollistamista asioista prosessiteollisuuden ympäristöön on ennakoiva huoltaminen. Ennakoivasta eli älykkästä huoltamisesta ja kunnossapidosta (Smart Maintenance) on toistaiseksi tehty melko vähän empiiristä tutkimusta ja aiheeseen liittyvistä artikkeleista vain murto-osasta löytyy reaali maailmaan tilanteisiin perustuvaa todistusaineistoa (Bokrantz ym., 2020). Ennakoivan huoltamisen käyttöönotto on hidas prosessi, sillä sen implementaatio vaiheessa kohdataan usein paljon haasteita. Ennakoivan huoltamisen prosessit täytyy räätälöidä toimipaikka kohtaisesti, sillä kaikilla toimipaikoilla on käytössään erilaiset rakenteet, resurssit, toiminnot ja kapasiteetit. Implementaatio on myös kallista (Bokrantz ym., 2020). Älykäs huoltaminen koostuu neljästä taustalla olevasta ulottuvuudesta, jotka ovat dataan perustuva päätöksenteko, inhimillisen pääoman resurssit, sisäinen integraatio sekä ulkoinen integraatio (Lundgren ym., 2021). Dataan perustuvan päätöksen teon avulla huoltopäätökset voidaan kasvavissa määrin tehdä koneista ja laitteista saadun datan perusteella huoltotyöntekijöiden kokemuksen ja intuition sijaan, joka voi parantaa huomattavasti oikeiden päätösten määrää. Inhimillisen pääoman resurssit liittyvät huoltotyöntekijöiden ammatillisten vaatimusten muuttumiseen. Teknologisen kehityksen myötä heiltä odotetaan aiempaa parempia yleistaitoja, kuten viestintä- yhteistyötaitot sekä enemmän erityistaitoja kuten datan analysointitaito. Sisäinen integraatio tarkoittaa, että huoltamisesta tulee laajemmin osa koko organisaation toimintaa ja on näin ollen useamman toimijan kentällä. Yhteistyö huoltamiseen liittyen laajenee. Ulkoinen integraatio tarkoittaa huoltamiseen liittyvän datan liikuttelua organisaation ulkopuolisille sidosryhmille, joka mahdollistaa esimerkiksi koneoppimisen skaalaukset sekä tietopääoman konsolidoinnin (Lundgren ym., 2021).

Älykkään huollon järjestelmänä toimii aiemmin toisessa luvussa esimerkkinä esitelty Schaefflerin OPTIME-järjestelmä. Järjestelmän avulla tehtaiden laitteista ja koneista saadaan vaivattomasti tärkeää huoltamiseen liittyvää informaatiota (OPTIME, 2021).

## 4.2 Reaaliaikaisen datan hyödyntäminen

Teollisuuden laitteista kerättävät datamäärät ovat jatkuvassa kasvussa ja perinteisillä algoritmeilla dataa ei saada enää käsiteltyä tarpeeksi hyvin ja nopeasti. Isojen datamäärien käsittelyyn tarvitaan koneoppimis-algoritmeja. Niiden avulla voidaan ennustaa järjestelmien käytöstä, parantaa sen koko suorituskykyä, mahdollistaa dataa analysoivien työkalujen kehitys sekä huomata taustalla ole-

via trendejä ja korrelaatioita. Siten koneoppimista hyödyntävillä ratkaisulla voidaan ennustaa normaalista poikkeavia tapahtumia, luoda varoituksia ja ohjeistaa järjestelmän käyttäjää minkälaisia toimia järjestelmälle tulisi tehdä. Reaaliaikaisen datan aidot hyödyt ovat riippuvaisia datan saatavuudesta, volyymin sekä laadusta (Peres ym., 2018).

Monissa teollisuuden sovelluksissa onnistunut toteutus, kehittyneet seuranta- ja ohjaustekniikat ovat suuresti riippuvaisia tunnistettujen prosessimallien edustavuudesta, tarkkuudesta sekä mittausten luotettavuudesta. Erityisesti keskeisten suoritusindikaattoreiden reaaliaikainen analyysi on olennainen edellytys edistykselliselle prosessien tarkkailulle ja hallitsemiselle. Prosessin laatuominaisuuksien reaaliaikaista seurantaakin usein rajoittaa mittaustekniikoiden riittämättömyys tai mittauslaitteiden alhainen luotettavuus (Khatibisepehr ym., 2013).

Tällä hetkellä tuotantovaiheesta on todella vaikeaa tunnistaa ajonaikaisia tuotantopoikkeamia ja tehdä dynaamisia päätöksiä, johtuen reaaliaikaisen tilannetiedon puutteellisesta saannista tuotannon resursseista. IoT-tekniikoiden soveltaminen teolliseen tuotantoon voi mahdollistaa hajautettujen tuotannollisten asioiden ja laitteiden reaaliaikaisen tilannetiedon jakamisen internetin välityksellä ja tarjota näin ollen erittäin tärkeää informaatiota tuotannosta, ylemmän tason reaaliaikaisten päätösten tueksi tuotantojärjestelmän läpi (Y. Zhang ym., 2015).

### 4.3 Digitaalinen kaksonen

Digitaalinen kaksonen on digitaalinen esitys reaali maailman entiteetistä tai järjestelmästä. Digitaalisen kaksosen toteutus on eristetty ohjelmisto-objekti tai malli, joka heijastaa ainutlaatuisia fyysisiä objekteja, prosessia, organisaatiota, henkilöä tai muita abstraktioita. Useiden digitaalisten kaksosten tiedot voidaan yhdistää näkymäksi useista reaali maailman entiteeteistä, kuten voimalaitoksesta tai kaupungista ja niihin liittyvistä prosesseista (*Definition of Digital Twin - Gartner Information Technology Glossary, 2021*) Digitaaliset kaksokset ovat erittäin hyödyllisiä teollisuudenaloilla, kuten teollisuuden automaatiossa, energiateollisuudessa ja terveydenhuollossa, ja niitä käytetään usein suunnittelun, kehityksen, testauksen ja koulutuksen välineenä. Ne auttavat parantamaan järjestelmien ja prosessien tehokkuutta ja turvallisuutta, vähentämään virheitä ja lisäämään luotettavuutta ennen käytännön toteuttamista.

Vachálekkin ja muiden tutkimuksessa selviää, kuinka digitaalinen kaksonen voidaan toteuttaa reaali maailman laitteesta ottamalla sen fyysiset osat ja tekniset arvot digitaaliseen järjestelmään. Tällä tavoin voidaan digitaalisessa ympäristössä esimerkiksi testata minkälaisilla arvoilla laitetta olisi turvallisinta tai tuotannon kannalta tehokkainta käyttää. Testaamalla asioita ensin digitaali-

nessa ympäristössä voidaan reaaliaikaisen tuotannon saavuttaa kustannussäästöjä ja kohentaa tuotannon turvallisuutta (Vachálek ym., 2017).

#### 4.4 Työturvallisuuden parantaminen

IIoT:n tuomat älykkäät järjestelmät ja reaaliaikainen tiedon keruu ja analysointi parantavat teollisuuden työturvallisuutta. Järjestelmät antavat teollisuuden johdolle tarkempaa tietoa, joka mahdollistaa paremman ennakkoinnin, suunnittelun ja reagoitakyvyn onnettomuuksien varalta. IoT-laitteiden avulla voidaan myös valvoa ja hallita laitteiden ja prosessien toimintaa etänä, mikä vähentää tarvetta fyysisesti läsnä olemiselle vaarallisilla alueilla ja parantaa siten työturvallisuutta. Esineiden internet lisää teollisuuden työturvallisuutta myös parantamalla tietoturvaa ja mahdollistamalla paremman varautumisen ja reagoitakyvyn onnettomuuksien varalle.

Adriaensenin ja muiden tutkimuksen mukaan kaiken kaikkiaan työturvallisuuden parantamiseen ei ole olemassa yhtä ainoaa ratkaisua ja riskien hallinnan ei tulisi olla erillinen eristetty toiminto tai ratkaisu, vaan integroitu toimintamalli järjestelmien parantamiseen. Prosessiteollisuus yhä tiiviimmin kytkeytyvällä toimivuudellaan ja verkostomaisella käyttäytymisellään hyötyy monimutkaisuusajattelun menetelmistä, joita nykyään vielä pääosin sovelletaan ainoastaan akateemisissa kontekstissa. Monimutkaisia turvallisuushaasteita on arvioitava joko järjestelmien vuorovaikutusten avoimuuden tekemiseksi tai erityisten huolenaiheiden tarkastelemiseksi, joita voidaan hallita kohtuullisilla resursseilla. Näille menetelmille tulisi mielellään löytää sovelluksensa jo suunnitteluvaiheessa (Adriaensen ym., 2019).

Milijićin ja muiden mukaan IIoT:n ja Industry 4.0 tuoma työturvallisuuden parantaminen on vielä avoin kysymys. Tällä hetkellä käytössä olevat turvallisuusmenettelyt ja -käytännöt, turvallisuuskoulutukset ja turvallisuuselementit sopivat edelleen paremmin Industry 3.0 teolliseen ympäristöön. Työturvallisuuden parantaminen voi jäädä voiton tavoittelun jalkoihin toissijaiseksi kehityskohteeksi, sillä se kehittää liiketoiminnan tuottoja vain välillisesti (Milijić ym., 2019).

## 4.5 Kohdattavat haasteet

IIoT-järjestelmien kyberturvallisuus on haasteellista, sillä laitteet, joita järjestelmiin liitetään ovat heterogeenisiä ja näin ollen poikkeavat toisistaan paljon, tällaiseen järjestelmään on vaikea luoda standardoituja toimintamalleja kyberturvallisuudelle. IIoT-järjestelmien kautta on mahdollista tehdä haittaa yhteiskunnalle kriittisille toiminoille, kuten lämmön- ja energiantuotannolle, ja siten ne ovat kiinnostavia kyberhyökkäysten kohteita. Näin ollen tietoturvaan täytyy panostaa, jotta hyökkäyksiä pystytään estämään sekä torjumaan. Perinteiset turvamekanismit, kuten palomuurit, tunkeutumisten havaitsemis- ja estojärjestelmät, on asennettu Internetin reunalle. Näitä mekanismeja käytetään suojelemaan verkkoa ulkoisilta hyökkäyksiltä. Nämä mekanismit eivät enää riitä turvaamaan seuraavan sukupolven Internetiä. IoT:n rajattoman arkkitehtuurin aiheuttaa lisähuolia verkon pääsyvalvonnasta ja ohjelmiston todennuksesta (Olivier ym., 2015).

Toinen haasteita tuova tekijä on järjestelmien monimutkaisuus. Järjestelmät koostuvat useista eri palikoista ja niiden yhdistäminen yhteisten protokollien ja sääntöjen alle on haasteellista (Z.-K. Zhang ym., 2014).

## 5 YHTEENVETO JA POHDINTA

Tässä kirjallisuuskatsauksena tuotetussa kandidaatin tutkielmassa haluttiin selvittää, miten IoT:n kehitys vaikuttaa prosessiteollisuuteen. Tutkielman tutkimuskysymys oli:

1. Minkälaisia mahdollisuuksia esineiden internetin kehittyminen tuo prosessiteollisuuteen?

Tärkeimmät mahdollisuudet ovat ennakoiva ja älykäs huoltaminen, reaaliaikaisen datan hyödyntäminen, digitaaliset kaksoiset sekä työturvallisuuden parantaminen. Tutkielman tulokset nähdään myös Taulukosta 2.

Aiheen tutkiminen auttaa hahmottamaan, kuinka suuria muutoksia neljännen ja viidennen teollisuuden vallankumouksen tuomilla kehitysaskelilla voidaan saavuttaa prosessiteollisuuden ympäristössä. Järjestelmien käyttöönotto ja kehittäminen tulee vaikuttamaan kaikkien prosessiteollisuuden alalla työskentelevien henkilöiden arkisiin tehtäviin. Nähtävästi jokaisesta työtehtävästä tulee lähitulevaisuudessa entistä enemmän teknologia orientoitunutta, jolloin digitaalisen osaamisen merkitys tulee kasvamaan. Ensimmäiset hyödyt nähdään luultavasti ennakoivan huollon kehityksessä, työturvallisuuden parantumisessa sekä automatisoitavien rutiinitehtävien vähentymisessä, joka johtaa kokonaisvaltaisesti kustannustehokkuuden parantumiseen. Ennakoivaan huoltoon pureutumalla, yritykset voivat ennustaa huoltotarpeitaan ennen näkemättömällä tavalla. Ennakoivaa huoltoa kehittämällä pystytään myös mahdollisesti parantamaan prosesseja siihen suuntaan, että ongelmallisesti kuluvia laitteita voidaan tunnistaa ja niiden käyttöä voidaan kehittää kestävämpään suuntaan. Työturvallisuuden parantumista tulee tapahtumaan, kun aiemmin ihmisten suorittamia vaarallisia tehtäviä voidaan kasvavissa määrin siirtää IIoT-järjestelmään liitettävien robottien hoidettavaksi. Tästä esimerkkinä on jo tänä päivänä käytössä olevat soodakattilan sulakourujen puhdistusrobotit, jotka

ottavat hoitaakseen aiemmin ihmisten tekemän vaarallisessa ympäristössä tapahtuvan huoltotoimenpiteen. Rutiinitehtävien automatisointi hyödyttää työntekijöitä kohdistamaan resurssejaan rutiinitehtävistä johonkin muuhun kehitävämpään. Sekä toimistossa- että kentällä tapahtuvia rutiinitehtäviä voidaan automatisoida. Nähtävästi kustannustehokkuus tulee parantumaan kaikkien aiemmin lueteltujen tekijöiden summana. Parhaimmillaan kehityksestä muotoutuu itseään eteenpäin vievä jatkumo.

Yhtenä prosessiteollisuuden ympäristön digitalisaation haasteena voi olla teknologia vastarinta. Prosessiteollisuuden ympäristöt ovat usein vakiintuneita toimimaan tietyillä totutuilla malleilla ja toimintatavoilla, joista irti päästäminen voi olla vastenmielistä ja haastavaa. Näin ollen uudet järjestelmät, systeemit, laitteet ja muut vastaavat voivat aiheuttaa alan työntekijöissä ihmetystä ja vastarintaa. Teollisuuden digitalisaatio on ollut ja tulee myös nähtävästi jatkossa olemaan hitaampaa, kuin muilla verrokitoimialoilla. Viestinnällä ja vuorovaikutuksella voidaan kuitenkin merkittävästi vaikuttaa kyseiseen ongelmaan, sillä mitä enemmän koko organisaatio on yhteisen tavoitteen toteuttamisen ja digitalisaation kehittämisen kannalla sitä paremmin ja tehokkaammin asioita saadaan vietyä eteenpäin. Näin myös saavutettavissa olevat hyödyt ovat paremmin realisoitavissa.

Olisi todella hedelmällistä, jos prosessiteollisuuden prosessien parissa työskentelevien henkilöiden mielipiteitä ja kokemuksen tuomaa hiljaista tietoa otettaisiin huomioon IIoT-ratkaisuja suunniteltaessa, sillä suunnittelijoiden ja käyttäjien yhteisellä kommunikaatiolla ratkaisuihin pystyttäisiin saamaan irti paras mahdollinen hyöty. Ylipäätään kokonaisten järjestelmien kehityksessä tarvitaan erittäin laajaa yhteistyötä eri sektoreiden ammattilaisten kanssa, sillä toimintaympäristön laajuuden ja moniulotteisuuden takia huomioitavien asioiden määrä on erittäin suuri. Järjestelmiä kehitettäessä hyödyllistä olisi, jos kehittäjillä olisi osaamista rinnakkain toimialan eri osa-alueilta, jolloin vuorovaikutus muiden kehitystiimin jäsenien kanssa olisi vaivattomampaa ja yhteisymmärrystä olisi helpompi saavuttaa.

Tämän tutkielman tuloksia voidaan käyttää hyödyksi pohjatietona prosessiteollisuuden sektorilla toimivan yrityksen digitalisaatiota suunniteltaessa. Tutkielmassa käydään läpi keskeisimmät aiheeseen liittyvät käsitteet ja teknologiat. Hyviä jatkotutkimusaiheita voisi olla esimerkiksi reaaliaikaisen datan valjastaminen hyötykäyttöön, Digitaalisten kaksosten hyödyntäminen prosessiteollisuudessa ja ennakoivan huoltamisen käyttöönoton tuomat kustannussäästöt.

## LÄHTEET

- Adriaensen, A., Decré, W., & Pintelon, L. (2019). Can Complexity-Thinking Methods Contribute to Improving Occupational Safety in Industry 4.0? A Review of Safety Analysis Methods and Their Concepts. *Safety*, 5(4), Art. 4. <https://doi.org/10.3390/safety5040065>
- Boyes, H., Hallaq, B., Cunningham, J., & Watson, T. (2018). The industrial internet of things (IIoT): An analysis framework. *Computers in Industry*, 101, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2018.04.015>
- Chegini, H., Naha, R. K., Mahanti, A., & Thulasiraman, P. (2021). Process Automation in an IoT-Fog-Cloud Ecosystem: A Survey and Taxonomy. *IoT*, 2(1), Art. 1. <https://doi.org/10.3390/iot2010006>
- Chen, X., Eder, M., Shihavuddin, A., & Zheng, D. (2021). A Human-Cyber-Physical System toward Intelligent Wind Turbine Operation and Maintenance. *Sustainability*, 13, 561. <https://doi.org/10.3390/su13020561>
- Data Analytics and Machine Learning for Smart Process Manufacturing: Recent Advances and Perspectives in the Big Data Era | Elsevier Enhanced Reader.* (eipvm.-b). <https://doi.org/10.1016/j.eng.2019.01.019>



*Definition of Digital Twin – Gartner Information Technology Glossary.* (ei pvm.).

Gartner. Noudettu 30. tammikuuta 2023, osoitteesta  
<https://www.gartner.com/en/information-technology/glossary/digital-twin>

Ding, J., Nemati, M., Ranaweera, C., & Choi, J. (2020). IoT Connectivity Technologies and Applications: A Survey. *IEEE Access*, 8, 67646–67673.  
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2985932>

*Job Opportunities in the Internet of Things in 2022.* (2021, joulukuuta 7). James Cook University. <https://online.jcu.edu.au/blog/job-opportunities-internet-things>

Khatibisepehr, S., Huang, B., & Khare, S. (2013). Design of inferential sensors in the process industry: A review of Bayesian methods. *Journal of Process Control*, 23(10), 1575–1596.  
<https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2013.05.007>

*Koti.* (2020, kesäkuuta 22). <https://www.verisure.fi/halytysjarjestelmat/kodin-halytysjarjestelmat>

Lee, J., Cameron, I., & Hassall, M. (2019). Improving process safety: What roles for Digitalization and Industry 4.0? *Process Safety and Environmental Protection*, 132, 325–339. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.10.021>

Li Jiang, Da-You Liu, & Bo Yang. (2004). Smart home research. *Proceedings of 2004 International Conference on Machine Learning and Cybernetics (IEEE Cat. No.04EX826)*, 2, 659–663.  
<https://doi.org/10.1109/ICMLC.2004.1382266>

- Lundgren, C., Bokrantz, J., & Skoogh, A. (2021). Performance indicators for measuring the effects of Smart Maintenance. *International Journal of Productivity and Performance Management*, 70(6), 1291–1316. <https://doi.org/10.1108/IJPPM-03-2019-0129>
- Milijić, N., Bogdanović, D., & Nikolić, I. (2019). *Projects in Industry 4.0 framework and its effects on occupational safety*. 92–97. <https://doi.org/10.2991/senet-19.2019.16>
- Mohamad, E., Sukarma, L., Mohamad, N. A., Salleh, M. R., Rahman, M. A. A., Rahman, A. A. A., & Sulaiman, M. A. (2018). Review on Implementation of Industry 4.0 Globally and Preparing Malaysia for Fourth Industrial Revolution. *The Proceedings of Design & Systems Conference*, 2018.28(0), 2203. <https://doi.org/10.1299/jsmedsd.2018.28.2203>
- Okano, M. T. (2017). *IOT and Industry 4.0: The Industrial New Revolution*. 9.
- Olivier, F., Carlos, G., & Florent, N. (2015). New Security Architecture for IoT Network. *Procedia Computer Science*, 52, 1028–1033. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.05.099>
- OPTIME. (ei pvm.). Noudettu 29. elokuuta 2022, osoitteesta [https://www.schaeffler.fi/fi/products-and-solutions/industrial/product-portfolio/maintenance\\_products/optime/](https://www.schaeffler.fi/fi/products-and-solutions/industrial/product-portfolio/maintenance_products/optime/)
- Peres, R. S., Dionisio Rocha, A., Leitao, P., & Barata, J. (2018). IDARTS – Towards intelligent data analysis and real-time supervision for industry 4.0. *Computers in Industry*, 101, 138–146. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2018.07.004>

- Risteska Stojkoska, B. L., & Trivodaliev, K. V. (2017). A review of Internet of Things for smart home: Challenges and solutions. *Journal of Cleaner Production*, 140, 1454–1464. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.006>
- Rose, K., Eldridge, S., & Chapin, L. (ei pvm.). *The Internet of Things: An Overview*.
- Shafique, K., Khawaja, B. A., Sabir, F., Qazi, S., & Mustaqim, M. (2020). Internet of Things (IoT) for Next-Generation Smart Systems: A Review of Current Challenges, Future Trends and Prospects for Emerging 5G-IoT Scenarios. *IEEE Access*, 8, 23022–23040. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2970118>
- Smart Maintenance: A research agenda for industrial maintenance management* | Elsevier Enhanced Reader. (ei pvm.). <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.107547>
- Vachálek, J., Bartalsky, L., Morhác, M., Lokšík, M., Rovný, O., & Šišmišová, D. (ei pvm.). *The Digital Twin of an Industrial Production Line within the Industry 4.0 Concept*.
- What is Process Manufacturing? Definition and Examples*. (ei pvm.). SearchERP. Noudettu 29. kesäkuuta 2022, osoitteesta <https://www.techtarget.com/searcherp/definition/process-manufacturing>
- Xu, X., Lu, Y., Vogel-Heuser, B., & Wang, L. (2021). Industry 4.0 and Industry 5.0—Inception, conception and perception. *Journal of Manufacturing Systems*, 61, 530–535. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.10.006>

Zhang, Y., Zhang, G., Wang, J., Sun, S., Si, S., & Yang, T. (2015). Real-time information capturing and integration framework of the internet of manufacturing things. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 28(8), 811–822. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2014.900874>

Zhang, Z.-K., Cho, M. C. Y., Wang, C.-W., Hsu, C.-W., Chen, C.-K., & Shieh, S. (2014). IoT Security: Ongoing Challenges and Research Opportunities. *2014 IEEE 7th International Conference on Service-Oriented Computing and Applications*, 230–234. <https://doi.org/10.1109/SOCA.2014.58>