

# **Teollisuus 4.0 ja teollisuus 5.0: Integraatio ja uusi työnjaon malli**

Konetekniikka  
Kone- ja materiaalitekniikan laitos, teknillinen tiedekunta  
Kandidaatintutkielma

Laatija:  
Mikko Kuusisto

27.4.2025  
Turku

## Kandidaatintutkielma

**Oppiaine:** Konetekniikka

**Tekijä:** Mikko Kuusisto

**Otsikko:** Teollisuus 4.0 ja teollisuus 5.0: Integraatio ja uusi työnjaon malli

**Ohjaaja:** PhD Jussi Kantola

**Sivumäärä:** 23 sivua

**Päivämäärä:** 27.4.2025

Tässä tutkielmassa tarkastellaan siirtymää teollisuus 4.0:sta kohti teollisuus 5.0:aa, erityisesti ihmisen ja teknologian välisen työnjaon näkökulmasta. Teollisuus 4.0:n aikakausi keskittyi automaatioon, digitalisaatioon, datan tehokkaaseen hyödyntämiseen ja älykkäisiin järjestelmiin. Näiden innovaatioiden avulla tuotantoa oli mahdollista kehittää entistä tehokkaammaksi. Teollisuus 4.0:n teknologiat, kuten robotiikka, IoT, tekoäly, kyberfyysiset järjestelmät ja digitaalinen kaksonen toimivat tämän kehityksen mahdollistajina. Kuitenkin teknologian kehityksen seurauksena ihmisen rooli tuotannossa alkoi menettää merkittävyyttään, mikä nosti esille tarpeen uudelle inhimillisemmälle lähestymistavalle.

Teollisuus 5.0 pyrkii vastaamaan näihin haasteisiin palauttamalla ihmisen takaisin teollisuuden keskiöön. Teollisuus 5.0 korostaa ihmiskeskeisyyttä, kestäväyyttä ja ihminen-teknologia-yhteistyötä. Tutkielmassa esitellään teollisuus 5.0:n keskeisiä mahdollistavia teknologioita, kuten yhteistyörobotit, XR-teknologiat ja neuroteknologia. Näiden teknologioiden avulla voidaan rakentaa tuotantojärjestelmiä, joissa teknologia tukee ihmisen päätöksentekoa, luovuutta ja hyvinvointia.

Tutkielman tuloksena esitellään uusi työnjaon malli, jossa ihmisen ja teknologian tehtävät sekä vastuut jaetaan kolmeen tasoon: autonominen teknologia, ihminen-teknologia-yhteistyö ja inhimillinen päätöksenteko. Malli tarjoaa rakenteellisen perustan, jonka avulla on mahdollista suunnitella tulevaisuuden työympäristöjä, joissa yhdistyvät tehokkuus, inhimillisyys ja teknologian edistyminen.

**Avainsanat:** *teollisuus 4.0, teollisuus 5.0, robotiikka, yhteistyörobotit (cobots), esineiden internet (IoT ja IIoT), tekoäly (AI), koneoppiminen (ML), digitaalinen kaksonen (DT), laajennettu todellisuus (XR), lisätty todellisuus (AR), virtuaalitodellisuus (VR), neuroteknologia, työnjako, työnjaon malli, ihminen-teknologia-yhteistyö*

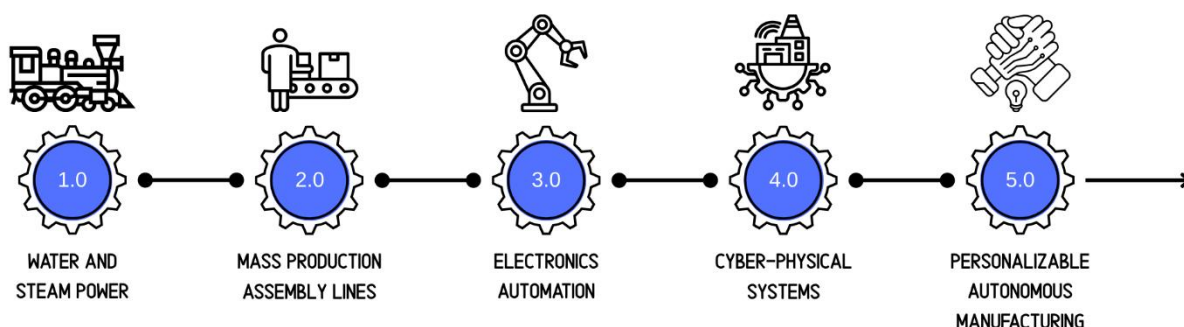
# Sisällysluettelo

<b>1</b>	<b>Johdanto</b>	<b>4</b>
1.1	Tutkielman taustaa	4
1.2	Tutkielman tavoitteet ja tutkimuskysymykset	5
1.3	Tutkimusmenetelmät ja tutkimusote	5
<b>2</b>	<b>Teollisuus 4.0</b>	<b>6</b>
2.1	Teollisuus 4.0 teknologiat ja työkalut	7
2.1.1	Robotiikka ja yhteistyörobotit	7
2.1.2	Esineiden internet ja teollinen esineiden internet	7
2.1.3	Kyberfysiset järjestelmät	8
2.1.4	Massadata ja analytiikka	9
2.1.5	Tekoäly ja koneoppiminen	9
2.1.6	Digitaalinen kaksonen	10
2.2	Teollisuus 4.0 vaikutukset ja epäkohdat	11
<b>3</b>	<b>Teollisuus 5.0</b>	<b>12</b>
3.1	Teollisuus 5.0 teknologiat ja työkalut	13
3.1.1	Yhteistyörobotiikka ja ihmiskeskeinen automaatio	13
3.1.2	Ihmiskeskeinen tekoäly ja koneoppiminen	14
3.1.3	Laajennettu todellisuus, lisätty todellisuus ja virtuaalitodellisuus	14
3.1.4	Neuroteknologia ja aivo-tietokone-rajapinnat	15
<b>4</b>	<b>Työnjaon Malli</b>	<b>17</b>
4.1	Mallin rakentaminen	17
4.2	Mallin kuvaus	18
<b>5</b>	<b>Yhteenveto</b>	<b>20</b>
	<b>Lähteet</b>	<b>22</b>

# 1 Johdanto

## 1.1 Tutkielman taustaa

Teollisuus on muuttunut historian myötä merkittävästi uusien teknologisten innovaatioiden seurauksena. Teollisuuden vallankumoukset ovat muuttaneet ja muovanneet työnteon organisointia sekä tuotantomenetelmiä merkittävästi. Ensimmäisiä kertoja koneet alkoivat korvata ihmisen tekemää käsityötä jo 1700-luvun loppupuolella ensimmäisen teollisen vallankumouksen myötä, tuoden mukanaan mekaaniset tuotantoprosessit, sekä vesi- ja höyryvoiman hyödyntämisen teollisuudessa [1]. Toinen teollinen vallankumous 1800-luvun lopulla keskittyi massatuotantoon ja sähkön käyttämiseen teollisuudessa. 1900-luvulla ihmiskunta koki jo kolmannen teollisen vallankumouksen, joka toi mukanaan elektroniikan ja automaation teollisuuteen sekä tuotantoon [2]. Neljäs teollinen vallankumous, jonka katsotaan alkaneen 2000-luvulla, yhdisti digitaalisen teknologian, tekoälyn sekä automaation tuotannonohjaukseen ja prosessien hallintaan teollisuudessa [3]. Käymme läpi jo viidettä teollista vallankumousta, teollisuus 5.0:aa. Sen tärkeimpänä ulottuvuutena on keskittyä tasapainottamaan ihmisen ja teknologian välistä työsuhdetta, edistää kestäväää kehitystä sekä parantaa työntekijöiden hyvinvointia ja tehokkuutta. Teollisuus 5.0:n tärkeimpänä päämääränä on saavuttaa symbioosi teknologian ja ihmisen roolien sekä työtehtävien välillä [4].



Kuva 1. Teolliset vallankumoukset. Pohja kovalle: [5]

Tämä tutkielma pureutuu teollisuus 4.0:n ja 5.0:n aikaansaamaan murrokseen teollisuudessa. Tutkielma esittelee, kuinka teollisuus 4.0 ja sen teknologiat loivat pohjan tälle kehitykselle, ja miten teollisuus 5.0 teknologioineen pyrkii rakentamaan tuotantoympäristöstä entistä inhimillisemmän.

## 1.2 Tutkielman tavoitteet ja tutkimuskysymykset

Tutkielman päätavoitteena on hahmottaa teknologian kehityksen tuomia muutoksia työn rakenteeseen ja määrittää, miten työnjaon periaatteet muuttuvat teollisuus 4.0:sta teollisuus 5.0:aan siirryttäessä. Tutkielmassa vastataan kolmeen seuraavaan tutkimuskysymyksen:

1. Mitkä ovat keskeisimmät teknologiat teollisuus 4.0:ssa ja 5.0:ssa?
2. Kuinka uudet teknologiat vaikuttavat työn rakenteeseen ja työntekijän rooliin?
3. Millainen työnjaon malli palvelee parhaiten inhimillistä ja teknologisesti tehokasta tuotantoympäristöä?

Tutkielmassa esitetään lopuksi vaihtoehto uudelle työnjaon mallille, jossa ihmisen ja teknologian vahvuudet ja roolit jäsennellään kolmeen eri tasoon. Mallin keskeisimpänä tavoitteena on edistää työn tehokkuutta, turvallisuutta ja mielekkyyttä, sekä lisäksi tukea teknologian ja ihmisen välistä yhteistyötä.

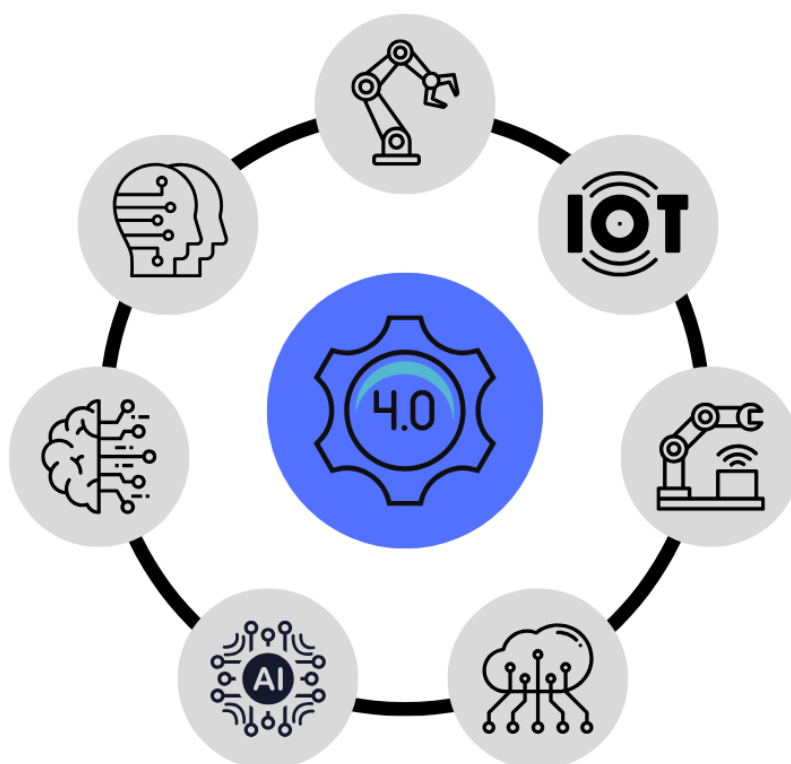
## 1.3 Tutkimusmenetelmät ja tutkimusote

Tutkielma on laadullinen kirjallisuuskatsaus, jonka aineistona on käytetty tieteellisiä julkaisuja aiheesta. Julkaisuiden tuli olla vertaisarvioituja ja vapaasti saatavilla olevia. Aineisto on etsitty käyttäen esimerkiksi ScienceDirect ja UtuVolter -tietokantoja ja käytetyt lähteet on julkaistu vuosina 2019–2024. Näin ollen tieto on mahdollisimman ajantasaista ja luotettavaa.

Tutkielmassa ei ainoastaan tarkastella olemassa olevaa tietoa, vaan esitetään uusi työnjaon malli vastaamaan teollisuus 5.0:n tarpeita. Työnajon malli on rakennettu ja luotu tutkielmassa käsiteltyjen aiheiden (teollisuus 4.0 ja teollisuus 5.0) pohjalta. Malli kuvaa ihmisen ja teknologian välistä työnjakoa tulevaisuuden teollisuusympäristöissä. Mallin rakentamisessa pyrittiin yhdistämään teknologinen tehokkuus ja inhimilliset arvot.

## 2 Teollisuus 4.0

Teollisuuden neljäs vallankumous, teollisuus 4.0, oli valmistusteollisuuden murros, joka mahdollisti digitaalisten teknologioiden hyödyntämisen. Teollisuus 4.0 pyrki mahdollisimman tehokkaihin ja älykkäisiin valmistusprosesseihin sekä tuotantomenetelmiin. Digitaalinen vallankumous perustui edistyneisiin teknologioihin, jotka mahdollistivat esimerkiksi automaation, data-analytiikan ja verkostoituneen tuotannon. Teollisuus 4.0:n tärkeimpiä teknologioita ja työkaluja esitellään tutkielman luvussa *2.1 Teollisuus 4.0 teknologiat ja työkalut*.



Kuva 2: Teollisuus 4.0 tärkeimmät teknologiat

Teollisuus 4.0 syntyi tarpeesta vastata globalisoituneen talouden haasteisiin ja parantaa teollisuuden kilpailukykyä. Tuotannon digitalisointi mahdollisti ennennäkemättömän automaation, jossa älykkäät järjestelmät pystyivät keräämään, analysoimaan ja hyödyntämään valtavia määriä tietoa parantaakseen valmistuksen laatua sekä vähentämään resurssien hukkaa [6]. Neljäs teollinen vallankumous toi mukanaan merkittäviä ja radikaaleja muutoksia perinteisiin valmistusmenetelmiin. Älykäs automaatio ja robotiikka yhdessä mahdollistivat jatkuvan tuotannon ja paransivat tehokkuutta erityisesti suurivolyymisessä valmistuksessa, kun taas tekoälyä ja koneoppimista hyödynnettiin havaitsemaan tuotannon poikkeamia ja

säätämään tuotantoprosesseja itsenäisesti [5]. Keskenään verkottuneet digitaaliset järjestelmät mahdollistivat myös ennakoivan kunnossapidon, älykkään toimitusketjun hallinnan ja asiakaskohtaisesti erikseen räätälöidyt tuotteet. Yritykset, jotka kykenivät hyödyntämään näitä teknologioita tehokkaasti, saivat merkittävän edun kilpailussa globaaleilla markkinoilla. Teollisuus 4.0:n vaikutukset ja teknologiat näkyvät edelleen laajasti teollisuudessa ja yhteiskunnassa [3], [4]. Teollisuus 4.0 toi mukanaan myös haasteita, joita käsitellään tutkielman luvussa *2.2 Teollisuus 4.0 vaikutukset ja epäkohdat*.

## **2.1 Teollisuus 4.0 teknologiat ja työkalut**

### **2.1.1 Robottiikka ja yhteistyörobotit**

Robottiikka on olennainen osa teollisuus 4.0-ympäristöä. Sen kehitys on mahdollistanut monimutkaisten ja tarkkojen tehtävien automatisoinnin. Perinteisten teollisuusrobottien rinnalle ovat tulleet yhteistyörobotit (engl. cobots), jotka työskentelevät turvallisesti ihmisten rinnalla. Yhteistyörobotit hyödyntävät kehittyneitä antureita ja koneoppimista, minkä ansiosta ne voivat tunnistaa ihmisten liikkeitä ja mukautua työympäristöön ilman riskiä [4].

Yhteistyörobotit tarjoavat erityisiä etuja pienissä ja keskisuurissa yrityksissä, joissa tuotantoprosessien joustavuus on tärkeää. Ne voidaan helposti ohjelmoida uudelleen suorittamaan erilaisia tehtäviä, mikä lisää tuotannon skaalautuvuutta ja tehokkuutta [7].

Robottiikka parantaa osaltaan myös työturvallisuutta vähentämällä työntekijöiden altistumista vaarallisille ja raskaille työolosuhteille. Yhteistyörobotit hoitavat raskaat ja toistuvat tehtävät, kun taas ihmiset keskittyvät vaativampiin ja luovuutta vaativiin tehtäviin. Tämä on kuitenkin enemmän jo osa teollisuus 5.0 -konseptia. [8]

### **2.1.2 Esineiden internet ja teollinen esineiden internet**

Esineiden internet (engl. internet of things, IoT) ja teollinen esineiden internet (engl. industrial internet of things, IIoT) ovat teollisuus 4.0:n keskeisiä teknologioita. Ne mahdollistavat reaaliaikaisen tiedonkeruun sekä analyysin tuotantoympäristöissä. IoT viittaa yleisesti fyysisten laitteiden ja järjestelmien yhdistämiseen internetiin, kun taas puolestaan IIoT keskittyy enemmän teollisiin sovelluksiin, esimerkiksi valmistusprosessien, tuotantolinjojen ja toimitusketjujen optimointiin. [9]

IIoT:n avulla erilaiset tuotantolaitteet ja sensorit pystyvät keräämään ja jakamaan tietoa reaaliajassa, mikä mahdollistaa ennakoivan kunnossapidon, resurssien optimoinnin ja

tehokkuuden parantamisen. Erilaisilla sensoreilla voidaan seurata esimerkiksi tuotantokoneiden lämpötilaa, tärinää ja liikettä sekä energiankulutusta. Sensoreilta saadut tiedot siirretään pilvipalveluihin analysoitaviksi [10]. Sensoreiden ja niistä reaaliajassa saatujen tietojen ansiosta myös ennakoiva kunnossapito on suuri IIoT:n mahdollistama etu. Laitteiden kuluminen ja poikkeamat toiminnassa huomataan parhaassa tapauksessa ennen vikaantumista, mikä taas vähentää katkoksia tuotannossa ja pienentää huoltokustannuksia [11]. IIoT tukee osaltaan myös digitaalisten kaksosten kehittämistä, joissa fyysisten laitteiden virtuaaliset mallit mahdollistavat tuotantoprosessien simuloinnin ja optimoinnin ilman fyysisiä muutoksia laitteissa, mikä parantaa tuotannon laatua ja vähentää suunnitteluvirheitä [10].

Vaikka IoT ja IIoT tarjoavat runsaasti merkittäviä etuja teollisuudessa, niiden käyttöönottoon liittyy haasteita. Tietoturvariskit, laitteiden yhteensopivuusongelmat ja suurten datamäärien hallinta ovat esimerkkejä kompastuskivistä [3]. Pitää kuitenkin muistaa, että tulevaisuudessa IoT ja IIoT -teknologiat kehittyvät entistä älykkäämmiksi ja tehokkaammiksi, mikä mahdollistaa vielä tehokkaamman tiedon analysoinnin ja päätöksenteon tuotantoympäristöissä [12].

### 2.1.3 Kyberfyysiset järjestelmät

Kyberfyysiset järjestelmät (engl. cyber-physical systems, CPS) toimivat siltana fyysisten laitteiden ja digitaalisten järjestelmien välillä, luomalla verkottuneen toimintaympäristön, jossa koneet, sensorit ja ohjelmistot toimivat saumattomasti yhdessä. Reaaliaikainen tiedonkeruu, prosessien seuranta ja ohjaus on mahdollista CPS-järjestelmien avulla, mikä tehostaa tuotantoprosesseja ja parantaa niiden joustavuutta. [9] Toisin sanoen kyberfyysiset järjestelmät mahdollistavat siis itseohjautuvien prosessien kehittämisen. Tuotantolinjat pystyvät säätelemään toimintaansa muuttuvien olosuhteiden mukaisesti ilman ihmisen väliintuloa ja tarvetta, mikä parantaa luonnollisesti samalla tehokkuutta, pienentää virheherkkyyttä ja lisää tuotannon joustavuutta. Verkottuneiden järjestelmien avulla voidaan toteuttaa hajautettua päätöksentekoa, jolloin eri tuotantovaiheet pystyvät reagoimaan muutoksiin itsenäisesti. IoT-laitteiden ja sensorien tuottamaa dataa analysoidaan reaaliajassa, jolloin mahdolliset poikkeamat havaitaan ja niihin voidaan reagoida välittömästi. [13], [14]

CPS-järjestelmissä on merkittäviä etuja, mutta ne tuovat mukanaan myös haasteita.

Suurimmat haasteet CPS-järjestelmien käyttöönotossa ovat tietoturva, yhteensopivuus ja massiivisten datamäärien hallinta [2].

## 2.1.4 Massadata ja analytiikka

Massadata (engl. big data) tarkoittaa suuria, monimuotoisia ja nopeasti kasvavia tietomassoja, joita kerätään muun muassa IoT-laitteista ja erilaisista sensoreista tuotannossa. Massadatan tehokas analysointi mahdollistaa tuotantoprosessien tehostamisen, laadun parantamisen ja resurssien optimaalisen käytön [9]. Teollisuus 4.0:ssa massadata -analytiikka yhdistetään usein pilvipalveluihin, jotka puolestaan tarjoavat skaalautuvan infrastruktuurin tietojen tallentamiseen ja käsittelemiseen. Analytiikan avulla pystytään tunnistamaan tuotantoprosessien pullonkauloja, optimoimaan materiaalivirtoja ja yleisesti parantamaan kokonaistuotannon tehokkuutta [13]. Massadata -analytiikka mahdollistaa tuotantolaitteiden ennakoivan kunnossapidon sensorien kerätessä tietoa laitteiden suorituskyvystä ja analytiikan tunnistessa mahdolliset poikkeamat tai viat, ennen kuin niistä koituu tuotantokatkoksia tai massiivisempia seurauksia. Ennakoiva kunnossapito alentaa huoltokustannuksia ja pidentää koneiden käyttöikää. [11] Laadunvalvonta ja tuotantoprosessien poikkeavuuksien havainnointi sekä niiden pohjalta tapahtuva parametrien säätäminen on myös osaltaan massadatan ansiota. Analysoitu tieto auttaa uusien tuotteiden kehityksessä ja olemassa olevien prosessien parantamisessa sekä tehostamisessa [10].

Massadatan ja analytiikan keskeisin huolenaihe on tietoturva. Suuret tietomassat sisältävät mahdollisesti arkaluontoista tietoa, joka tulisi suojata asianmukaisesti. Saadun datan laatu ja yhteensopivuus eri järjestelmien kanssa aiheuttaa myös toisinaan haasteita. [3]

## 2.1.5 Tekoäly ja koneoppiminen

Tekoäly (engl. artificial intelligence, AI) ja koneoppiminen (engl. machine learning, ML) ovat teollisuus 4.0:n keskeisiä teknologioita. Yhdessä ne mahdollistavat tuotantoprosessien automatisoinnin ja älykkään päätöksenteon. Tekoäly tarkoittaa karkeasti järjestelmiä, jotka kykenevät suorittamaan inhimillistä älykkyyttä, oppimista, päättelyä ja ongelmanratkaisua vaativia tehtäviä. Koneoppiminen taas on tekoälyn osa-alue, jossa algoritmit kykenevät oppimaan ja parantamaan suorituskykyään ilman erillistä ohjelmointia. [9] Teollisuus 4.0:ssa tekoäly ja koneoppiminen integroidaan usein osaksi tuotantoprosesseja, joissa niiden tehtäviin lukeutuvat esimerkiksi suurien datamassojen analysointi reaaliajassa ja niiden pohjalta ennakoivien päätösten tekeminen. Tekoälyalgoritmien keräämän ja analysoiman datan pohjalta voidaan automaattisesti optimoida ja säädellä tuotantoprosesseja tai niiden vaiheita samalla tehokkuutta parantaen ja hävikkiä vähentäen. [13]

Tekoäly ja koneoppiminen tukevat laadunvalvontaa ja ennakoivaa kunnossapitoa. Esimerkiksi kuvatunnistukseen perustuvat tekoälypohjaiset järjestelmät kykenevät tarkastamaan ja tunnistamaan tuotteiden laadun nopeammin ja tarkemmin, mikä vähentää inhimillisiä virheitä sekä parantaa laatua. Tekoälyalgoritmit pystyvät tunnistamaan koneiden ja laitteiden muutoksia suorituskyvyssä ja ennakoimaan mahdollisia vikoja tai katkoksia. [10], [11] Yksi mainitsemisen arvoinen tekoälyn sovellusalue on toimitusketjujen optimointi mahdollisimman tehokkaiksi. Tekoäly pystyy analysoimaan ja tunnistamaan markkinatrendejä, asiakaskysyntää ja logistiikkadataa ja siltä pohjalta ennustamaan tarpeita sekä säätelemään varastotasoa [5].

Tekoälyllä ja koneoppimisella on omat ongelmakohtansa, esimerkiksi datan luotettavuuden varmistaminen ja yksinkertaisesti sen saatavuus. Algoritmit saattavat myös olla läpinäkyviä tai niiden ymmärrys on puutteellista. Tekoälyjärjestelmien tehokas hyödyntäminen pitkäjaksoisesti vaatii myös jatkuvaa järjestelmien ylläpitoa, joka puolestaan lisää kustannuksia. [3]

#### 2.1.6 Digitaalinen kaksonen

Digitaalinen kaksonen (engl. digital twin, DT) tarjoaa reaaliaikaisen virtuaalisen vastineen fyysisille laitteille, järjestelmille ja prosesseille. Digitaalinen kaksonen mahdollistaa tuotannon optimoinnin, huollon ennakoinnin ja koko linkaaren kattavan analytiikan. Tämä kaikki saavutetaan yhdistämällä sensoridataa, simulointeja ja koneoppimismalleja. DT-teknologia tehostaa päätöksentekoa ja mahdollistaa virtuaalisten testien suorittamisen ennen fyysisiä muutoksia. [14] Teollisuus 4.0:ssa digitaaliset kaksoset auttavat ennakoimaan laitteiden kunnossapitotarpeita ja optimoimaan tuotantoprosesseja. Sensorien reaaliajassa keräämä data syötetään digitaaliseen malliin, joka taas ennustaa laitteiden suorituskykyä ja mahdollisia vikoja, mahdollistaen ennakoivan huollon. Digitaalisten kaksosten merkittävin etu on kyky analysoida sekä mallintaa fyysisten laitteiden tai järjestelmien käyttäytymistä eri skenaarioissa ilman, että tuotantoon tarvitsee tehdä muutoksia, joka puolestaan mahdollistaa minimoimaan suunnitteluvirheet ja riskit ennen uusien järjestelmien käyttöönottoa. Lisäksi, digitaalinen kaksonen mahdollistaa koko tuotannon simuloinnin ja skaalautuvuuden, soveltuen siis myös joustavaan valmistukseen ja massaräätälöintiin. [10], [11] DT-teknologian hyödyntäminen ei myöskään rajoitu vain ja ainoastaan yksittäisiin koneisiin tai laitteisiin, parhaimmillaan se voi kattaa kokonaisia tuotantolinjoja tai jopa tehtaita. Näin voidaan optimoida ja säätää sekä testata kokonainen tuotantoprosessi alusta loppuun. [3]

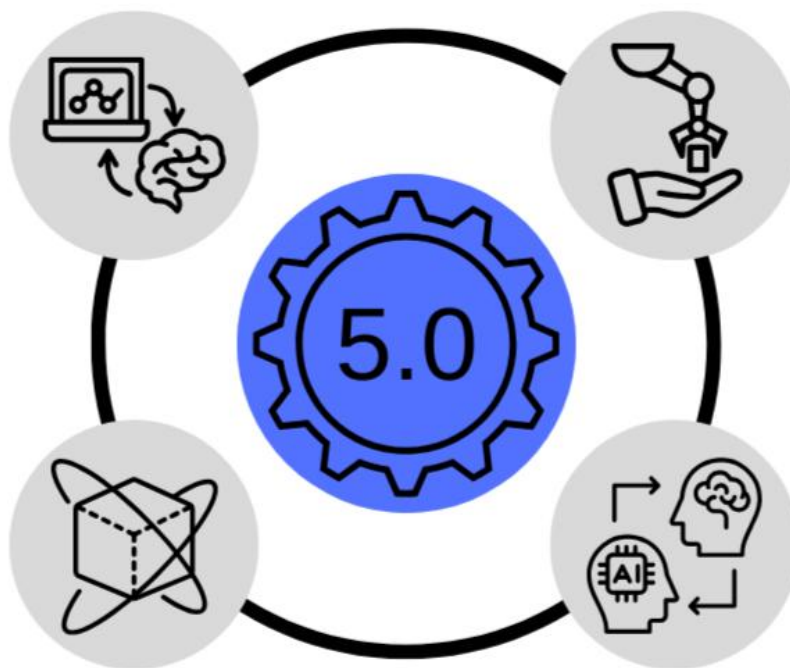
Digitaalisten kaksosten käyttö ja suosio teollisuudessa on kasvanut ja tulee kasvamaan entisestään. Tulevaisuudessa entistäkin kehittyneemmät algoritmit ja koneoppimismallit parantavat digitaalisten kaksosten kykyä mukautua muuttuviin tuotantoympäristöihin. DT-teknologian yhdistäminen muihin teollisuus 4.0:n teknologioihin, kuten esimerkiksi IoT:hen mahdollistaa entistä tarkemmat ja realistisemmat simulaatiot ja prosessienhallintaratkaisut. [12]

## **2.2 Teollisuus 4.0 vaikutukset ja epäkohdat**

Teollisuus 4.0:n ytimessä olivat automaatio, robotiikka ja dataohjattu päätöksenteko, joiden tavoitteena oli parantaa tuotantoprosessien tehokkuutta sekä optimoida resurssien käyttöä. Digitalisaatio ja älykkäät tuotantojärjestelmät mahdollistivat joustavan tuotannon, entistä lyhyemmät läpimenoajat ja korkeammat laatuvaatimukset. [9] Teollisuus 4.0 teknologioineen toi valtavia edistysaskelia ja taloudellisia hyötyjä, mutta sillä oli myös negatiivisia vaikutuksia. Automaatio ja robotiikka korvasivat monia perinteisiä työtehtäviä, joita työntekijät aiemmin suorittivat. Tämä johti osittain työpaikkojen katoamiseen ja kasvavaan huoleen siitä, miten teknologia vaikuttaa työn tulevaisuuteen. Teollisuus 4.0:n keskittyminen suoraviivaisesti tehokkuuteen ja automaatioon jätti inhimillisen näkökulman varjoonsa, jolloin ihmisen ja koneen välinen vuorovaikutus jäi toissijaiseksi. [5], [13] Monet yritykset kokivat myös haasteita teollisuus 4.0:n kokonaisvaltaisessa hyödyntämisessä. Järjestelmien monimutkaisuus ja integrointivaikeudet aiheuttivat teknillisiä ja taloudellisia esteitä [3]. Tältä pohjalta kehittyi tarve uudelle, tasapainoisemmalle lähestymistavalle.

### 3 Teollisuus 5.0

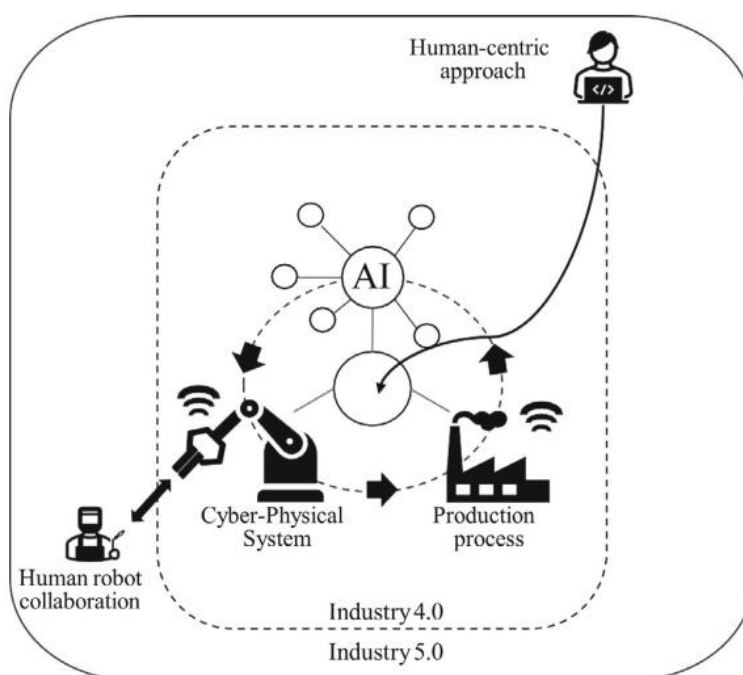
Viides teollinen vallankumous, teollisuus 5.0, syntyi tarpeesta korjata teollisuus 4.0:n aiheuttamat epäkohdat, tavoitteena palauttaa ihminen takaisin teollisuuden keskiöön. Teollisuus 5.0 ei ole pelkästään teknologinen kehitysaskel, vaan myös merkittävä filosofinen muutos, joka yhdistää teknologian ja ihmisen yhteistyön, kestävän kehityksen ja joustavan tuotantoympäristön [4]. Teollisuus 5.0:ssa painopiste siirtyy pelkstä automatisoinnista ja tehokkuuden ”sokeasta” maksimoinnista kohti ihmiskeskeistä, kestäväää ja joustavaa tuotantoympäristöä. Teollisuus 5.0:n ytimessä on ajatus siitä, että teknologia ei ole ainoastaan tuotannon tehostamisen väline, vaan sen tulisi tukea myös ihmisen luovuutta, hyvinvointia ja työtyytyväisyyttä. Ihmiskeskeisyys näkyy selkeimmin siinä, että koneet eivät enää korvaa arvokasta ihmistyötä, vaan toimivat ihmisen rinnalla tukemassa sekä täydentämässä työntekijän taitoja. [5] Teollisuus 5.0 toi mukanaan paljon uusia teknologioita ja päivityksiä jo tunnettuihin teknologioihin, osa niistä esitellään tutkielman luvussa *3.1 Teollisuus 5.0 teknologiat ja työkalut*.



Kuva 3. Teollisuus 5.0:n mahdollistavat teknologiat [15]

Teollisuus 5.0:n taustalla on myös kasvava tarve kestäväälle kehitykselle. Vastuullisuus, energiatehokkuus ja resurssien käytön säätely ovat keskeisiä teollisuus 5.0:n tavoitteita. Teollisuuden on vastattava ilmastonmuutoksen ja ympäristön kuormituksen asettamiin haasteisiin; vähentämään jätteitä, optimoimaan energiankulutusta ja kehittämään

kiertotalouteen perustuvia liiketoimintamalleja. [3] Teollisuus 5.0 on myös vastaus muuttuviin työmarkkinoihin ja demografisiin haasteisiin. Väestön ikääntymisen ja työvoiman monimuotoisuuden takia teknologian on sopeuduttava erilaisten työntekijöiden tarpeisiin. Tulevaisuuden älykkäät työympäristöt, joissa teknologia mukautuu yksilöllisiin kykyihin ja rajoituksiin, mahdollistavat inkluusiivisen ja kaikille turvallisen työpaikan. [5] Teollisuus 5.0 pyrkii vastaamaan kriittisiin kysymyksiin siitä, miten teknologia voi palvella ihmiskuntaa ja teollisuutta parhaalla mahdollisella tavalla eikä vain maksimoida tuottavuutta. Vallitsevassa teollisuuden kehitysvaiheessa ei ainoastaan seurata teknologista kehitystä, sen sijaan sitä ohjataan aktiivisesti kohti inhimillisempää ja vastuullisempaa suuntaa. [4]



Kuva 4. Teollisuus 5.0 ihmiskeskeisten arvojen ja yhteiskunnallisten tavoitteiden yhdistäminen Teollisuus 4.0 -konseptiin. [16]

### 3.1 Teollisuus 5.0 teknologiat ja työkalut

#### 3.1.1 Yhteistyörobotiikka ja ihmiskeskeinen automaatio

Yhteistyörobotiikka on kehittynyt teollisuus 5.0 myötä. Se ei ole enää vain kehittyntä automaatiota, vaan tavoitteena on luonnollinen ja turvallinen yhteistoiminta ihmisen kanssa. Teollisuus 5.0:ssa yhteistyörobotit tukevat ihmisten toimintaa inhimillisemmällä tavalla. Yhteistyörobotit eivät hoida ainoastaan toistuvia ja raskaita tehtäviä, vaan sopeutuvat ihmisen yksilöllisiin työskentelytapoihin, eleisiin ja toimintamalleihin. [5], [17] Yhteistyörobottien kehitys sensorien ja tietojenkäsittelyominaisuuksien osalta mahdollistaa entistä tarkemman

vuorovaikutuksen ihmisten kanssa. Yhteistyörobotit voivat avustaa työntekijöitä esimerkiksi hienomotorisissa kokoonpanotehtävissä, joissa tarvitaan robotin tarkkuutta ja ihmisen päättelykykyä. Samalla yhteistyörobotit tarjoavat osaltaan ratkaisun työergonomian parantamiseen vähentämällä fyysistä kuormitusta ja pienentämällä työn aiheuttamaa räsitystä työntekijöille. Yhteistyörobotiikan kehitys vie teollisen työnjaon kohti ihmiskeskeisempää ja dynaamisempaa mallia, jossa teknologia mukautuu ihmisen tarpeisiin eikä päinvastoin. [4],[5]

### 3.1.2 Ihmiskeskeinen tekoäly ja koneoppiminen

Teollisuus 5.0:ssa tekoäly ja koneoppiminen eivät ainoastaan automatisoi prosesseja, ne tukevat työntekijän päätöksentekoa, oppimista ja turvallisuutta. Tekoäly muuttuu teollisuus 5.0:ssa passiivisesta analysoijasta aktiiviseksi yhteistyökumppaniksi, joka toimii rinnakkain ihmisen kanssa ja mukautuu käyttäjän tarpeisiin. [17] Ihmiskeskeinen tekoäly on suunniteltu tukemaan työntekijää, ei korvaamaan sitä. Koneoppimismallit voivat analysoida työntekijöiden toimintatapoja ja tarjota suosituksia esimerkiksi laitteiden käyttöön, vianmääritykseen ja laadunvalvontaan. Tämä ominaisuus mahdollistaa entistä mukautuvammat ja turvallisemmat työskentelyolosuhteet sekä vähentää inhimillisten virheiden riskiä. [9]

Tekoälyn kehitys teollisuus 5.0:ssa liittyy keskeisesti myös yhteistyörobotiikkaan. Tekoäly mahdollistaa intuitiivisen ja turvallisen vuorovaikutuksen ihmisen ja robotin välillä. Robotit pystyvät ennakoimaan ihmisen tarpeita ja toimimaan entistä tehokkaammin, mikä tekee työympäristöstä sekä joustavamman että ergonomisemman. [3]

### 3.1.3 Laajennettu todellisuus, lisätty todellisuus ja virtuaalitodellisuus

Laajennettu todellisuus (engl. extended reality, XR) lisätty todellisuus (engl. augmented reality, AR) ja virtuaalitodellisuus (engl. virtual reality, VR) avaavat uusia mahdollisuuksia teollisuudessa. Laajennettu todellisuus on kattotermi, joka sisältää sekä lisätyn todellisuuden että virtuaalitodellisuuden. AR-teknologia sulauttaa digitaaliset elementit reaali maailmaan, kun taas VR luo täysin immerstiivisen keinotekoisesti ympäristön. [10]

AR ja VR tarjoavat uusia keinoja koulutukseen, etätöihin ja päätöksentekoon. AR:n avulla työntekijät voivat nähdä reaaliaikaista tietoa laitteista ja prosesseista suoraan näkökentässään älylasien tai mobiililaitteiden välityksellä [14]. Myös asiantuntijat voivat osallistua työtehtäviin etänä ja silti ohjata työntekijöitä reaaliajassa lisätyn todellisuuden kautta, mikä

vähentää matkustustarvetta ja ympäristövaikutuksia sekä mahdollistaa nopean avun esimerkiksi vikatilanteissa [18]. VR mahdollistaa työntekijöiden koulutuksen ja harjoittelun monimutkaisiin työtehtäviin turvallisessa ja riskittömässä ympäristössä ennen niiden suorittamista fyysisesti [3].

XR-tekniikkaan voidaan yhdistää muitakin teknologioita. Esimerkiksi digitaalisten kaksosten ja XR-tekniikan tapauksessa työntekijät voivat tarkastella ja analysoida tuotantoprosesseja reaaliajassa virtuaalisesti, samalla mahdollistaen tuotantoprosessien muutoksien suunnittelun ja testauksen ennen fyysisiä muutoksia järjestelmiin [9]. XR-tekniikat edistävät siis työergonomiaa ja työn mukauttamista työntekijöiden yksilöllisiin tarpeisiin. Työtilat voidaan räätälöidä täysin käyttäjän mukavuuden ja tehokkuuden parantamiseksi, mikä osaltaan edistää työhyvinvointia sekä vähentää riskiä fyysisille rasitusvammoille [6]. XR, VR ja AR eivät siis ainoastaan paranna työn tehokkuutta ja turvallisuutta. Ne tukevat suurissa määrin ihmisen ja tekniikan välistä vuorovaikutusta, minkä takia aukeaa uusia mahdollisuuksia älykkäimmille ja intuitiivisemmille ratkaisuille, joissa tekniikka mukautuu käyttäjän tarpeisiin [2].

#### 3.1.4 Neuroteknologia ja aivo-tietokone-rajapinnat

Neuroteknologia ja aivo-tietokone-rajapinnat (engl. brain-computer interface, BCI) edustavat merkittävää edistysaskelta ihmisen ja tekniikan välisen integraation kehityksessä. BCI mahdollistaa suoran yhteyden ihmisaivojen ja tietokonejärjestelmien välillä. Käyttäjä pystyy ohjaamaan koneita tai ohjelmistoja ajatuksen voimalla ilman perinteisiä ohjausvälineitä. Inhimillinen ajattelu, tuntemus ja päätöksenteko yhdistyvät saumattomasti, mikä avaa uudenlaisia mahdollisuuksia teollisuudelle ja työympäristöille. [19]

Neuroteknologia perustuu ihmisaivojen sähköisten signaalien tulkitsemiseen ja niiden muuntamiseen tietokoneen ymmärrettäväksi. BCI-järjestelmät jaetaan invasiivisiin ja ei-invasiivisiin järjestelmiin. Invasiiviset järjestelmät vaativat kirurgisen implantin suoraan ihmisen aivoihin, kun taas ei-invasiiviset hyödyntävät menetelmiä, jotka eivät vaadi rajuja lääketieteellisiä toimenpiteitä. Ei-invasiiviset järjestelmät perustuvat esimerkiksi aivokäyrätutkimuksiin (engl. electroencephalography, EEG), jotka mittaavat aivojen sähköistä toimintaa ja havaitsevat signaaleja. Teollisuuden kehityksen kannalta ei-invasiivisten järjestelmien kehitys on tärkeämpää, koska niiden avulla on mahdollista parantaa työtehokkuutta ilman tarvetta suurille lääketieteellisille toimenpiteille. [5]

Teollisuusympäristöissä ja työelämässä BCI-teknologiaa on mahdollista hyödyntää erityisesti automatisoinnissa ja työergonomian parantamisessa. Työntekijät pystyvät esimerkiksi käyttämään ajatuksen voimalla toimivia käyttöliittymiä koneiden ohjaukseen. Fyysisen työn rasittavuus vähenee ja tehokkuus kasvaa. BCI-teknologiaa hyödyntämällä on mahdollista kehittää mukautuvia järjestelmiä, jotka tunnistavat työntekijän kognitiivisen tilan ja muuttavat työympäristön sen mukaisesti. Muutokset voivat olla esimerkiksi valaistuksen tai työtilan asetusten säätämistä työntekijän vireystilan perusteella. [6] Neuroteknologia ja BCI ottavat huomioon myös saavutettavuuden työelämässä. Henkilöt, joilla on esimerkiksi fyysisiä rajoitteita, voivat käyttää BCI-teknologiaa koneiden hallintaan ja ohjaamiseen. Tämä ominaisuus parantaa työvoiman monimuotoisuutta entisestään, ja teknologia mukautuu ihmiseen. [3] BCI voi toimia tulevaisuudessa keskeisenä työkaluna uusissa työnjaon malleissa. Koneet eivät tue ihmistä vain fyysisessä työssä, ne ovat mukana päätöksenteossa ja luovassa ongelmanratkaisussa [19].

## 4 Työnjaon Malli

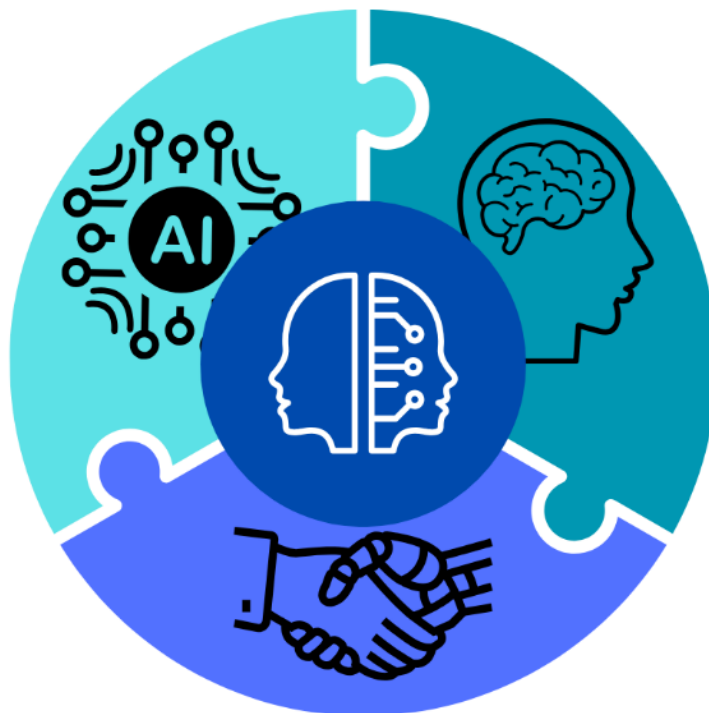
### 4.1 Mallin rakentaminen

Teollisuus 5.0:n ytimessä on ihmisen ja teknologian välinen symbioosi, joka korostaa ihmiskeskeisyyttä ja kestävyyttä. Uutta työnjaon mallia rakennettaessa tulee tarkastella ihmisen ja teknologian rooleja. Teknologia voi toimia joko tukevana, avustavana tai autonomisena toimijana ihmisen rinnalla. Tavoitteena on palauttaa ihmisen arvoa luova ja ohjaava rooli takaisin teollisuuden keskiöön [6]. Tässä tutkielmassa esitetty malli perustuu kolmeen työnjaon tasoon, jotka yhdessä muodostavat yhteistyön rungon. Työnjaon tasot ovat seuraavat:

**Autonominen teknologia:** Tähän tasoon kuuluu digitaaliset teknologiat, kuten tekoäly ja koneoppiminen, jotka suorittavat niille määrättyjä tehtäviä itsenäisesti ilman ihmisen jatkuvaa huomiota. Tyypillisiä autonomisesti suoritettavia toimintoja ovat esimerkiksi datan kerääminen ja sen analysointi, prosessien automaattinen ohjaus ja kunnossapidon ennakointi. Autonominen teknologia soveltuu parhaiten vakioituihin ja toistuviin tehtäviin, joissa ennustettavuus on korkea ja päätökset on mahdollista tehdä sääntöjen pohjalta. [4]

**Ihminen-teknologia-yhteistyö:** Tässä tasossa korostuu ihmisen ja teknologian välinen vuorovaikutus. Yhteistyön edellytyksenä on saumaton kommunikaatio ja teknologian mukautuvuus, joiden ansiosta teknologia tunnistaa ihmisen toiminnan ja pystyy reagoimaan sen pohjalta. Esimerkiksi yhteistyörobotit kuuluvat tähän työnjaon tasoon, ne kykenevät työskentelemään rinnakkain ihmisen kanssa suorittaen esimerkiksi fyysisesti raskaita tai toistuvia tehtäviä. Samalla ihminen puolestaan vastaa ohjauksesta, laadunvalvonnasta ja päätöksenteosta. [17]

**Inhimillinen päätöksenteko:** Tämä taso pitää sisällään luovuutta, kriittistä ajattelua ja eettistä harkintaa vaativat tehtävät. Teknologia toimii ikään kuin tiedon jalostajana ja esikäsittelijänä, mutta lopullinen päätöksenteko säilyy ihmisellä. Esimerkiksi tekoäly voi tarjota vaihtoehtoja ja tukea päätöksenteossa, joista ihminen valitsee parhaimman ja tekee lopullisen päätöksen. [19]



Kuva 5. Teollisuus 5.0 työnjaon malli

Esitetyn mallin tasojen tarkoituksena ei ole jakaa tehtäviä tiukasti rooleittain, vaan kuvata sellaista vuorovaikutusta, jossa roolit voivat myös vaihtua tilanteen ja teknologian kehityksen mukaan. Päämääränä on ihmiskeskeisyys, eli teknologia toimii ihmisen ehdoilla ja ihmistä varten.

#### 4.2 Mallin kuvaus

Tämän työnjaon mallin vahvuutena on sen joustavuus ja helppo skaalautuvuus eri teollisuuden aloille. Mallia voidaan soveltaa erilaisissa tuotantoympäristöissä, joissa teknologian kehittyneisyys voi vaihdella yksinkertaisesta automaatiosta edistyneisiin koneoppimismalleihin. Tämä malli toimii työkaluna, jonka avulla on mahdollista jäsenellä ihmisen ja teknologian välistä työsuhdetta ja symbioosia. Samalla kehittyy työnjaon tehokkuus, turvallisuus ja mielekkyys.

Työnjaon malli on havainnollistettu *taulukossa 1*. Taulukossa esitetään työnjaon eri tasot, ihmisen ja teknologian vastuutehtävät sekä lisäksi esimerkkejä käyttötarkoituksista.

Taulukko 1. Työnjaon malli

<b>Työnjaon tasot</b>	<b>Ihmisen vastuutehtävät</b>	<b>Teknologian vastuutehtävät</b>	<b>Esimerkki käyttötarkoituksesta</b>
Autonominen teknologia	Valvonta, virhetilanteiden arviointi/hallinta	Ennakoiva kunnossapito, itseohjautuva prosessin hallinta	Varastonhallinta, logistiikka, automaattinen laadunvalvonta, tuotantolinjan seuranta
Ihminen-teknologia-yhteistyö	Ohjaus, valvonta, päätöksenteko, ongelmanratkaisu	Reaaliaikainen analytiikka, visuaalinen tuki, turvallisuus	Kokoonpanoteollisuus, XR-tuki, älyäs huolto, koulutus ja perehdytys virtuaaliympäristöissä
Inhimillinen päätöksenteko	Strateginen suunnittelu, luovuus, ongelmanratkaisu	Tiedon esikäsittely, vaihtoehtojen simulointi	Terveydenhuolto, kriisinhallinta, tuotantoprosessien kehittäminen

Malliin sisältyy myös työntekijän aseman vahvistaminen ja kestävä teknologian kehitys. Kun roolit ja vastuut on määritelty selkeästi, ennaltaehkäistään työkuorman epätasainen jakautuminen ja työn hallittavuus lisääntyy. Tärkeää on kuitenkin huomata, että mallit eivät ole täysin staattisia. Teknologian kehittyessä siirtymiä tasojen välillä voi tapahtua luonnollisesti. Mallin soveltuvuus ei rajoitu ainoastaan teollisuuteen, vaan sen periaatteet ovat sovellettavissa myös esimerkiksi terveydenhuollon, logistiikan ja koulutuksen aloille. Malli sopii kaikkeen, jossa ihmisen asiantuntemus ja teknologian tehokkuus täydentävät ja palvelevat toisiaan.

## 5 Yhteenveto

Tässä tutkielmassa on tarkasteltu teollisuuden kehitystä teollisuus 4.0:sta kohti teollisuus 5.0:aa, keskittyen erityisesti ihmisen ja teknologian väliseen työnjakoon. Tutkielman tavoitteena oli analysoida ja esitellä molempien konseptien tärkeimpiä teknologioita sekä jäsenellä, miten teknologian kehitys on vaikuttanut ihmisen rooliin teollisessa tuotannossa. Tämän lisäksi tutkielmassa esitetään uusi työnjaon malli, jonka avulla ihminen palautetaan teollisuuden keskiöön. Mallin tavoitteena on kehittää ja selkeyttää ihmisen ja teknologian välistä yhteistyötä tulevaisuudessa.

Teollisuus 4.0:n aikakausi merkitsi tuotantoympäristöjen digitalisoitumista, automaation laajentumista sekä datan tehokasta hyödyntämistä. Keskeisiä teollisuus 4.0:n mahdollistaneita teknologioita olivat muun muassa robotiikka, IoT ja IIoT, tekoäly, massadata, kyberfyysiset järjestelmät sekä digitaalinen kaksonen. Näiden teknologioiden käyttöönotto on edelleenkin merkittävä osa teollisuutta ja niiden avulla on pystytty parantamaan huomattavasti tuotannon tehokkuutta, laatua ja ennakoitavuutta. Samanaikaisesti kehityksen varjopuolella oli ihmisen roolin ja merkityksen heikkeneminen sekä inhimillisten taitojen jääminen teknologian varjoon.

Teollisuus 5.0 on syntynyt vastauksena teollisuus 4.0:n pohjalta syntyneisiin haasteisiin. Teollisuus 5.0:n tavoitteena on vahvistaa ihmiskeskeisyyttä, työn merkityksellisyyttä ja kestävyyttä teollisuudessa. Tärkeänä päämääränä on siirtyä pelkästä teknologian kehittämisestä kohti inhimillisempää ja vuorovaikutteisempaa tuotantoa, jossa teknologia ja ihminen täydentävät toisiaan. Tutkielmassa on tarkasteltu tärkeitä teollisuus 5.0:n mahdollistavia teknologioita: yhteistyörobotteja, ihmiskeskeistä tekoälyä ja koneoppimista, XR-, AR- ja VR-teknologioita, neuroteknologiaa sekä aivo-tietokone-rajapintoja. Näiden teknologioiden avulla on mahdollista saavuttaa tai ainakin päästä lähemmäksi teollisuus 5.0:n tavoitetta, ihmisen palauttamista takaisin teollisuuden keskiöön.

Tutkielman tuloksena on esitetty uusi työnjaon malli teollisuus 5.0 kontekstiin. Mallissa ihmisen ja teknologian tehtävät ja roolit jaettiin kolmeen eri tasoon: autonominen teknologia, ihminen-teknologia-yhteistyö ja inhimillinen päätöksenteko. Malli tarjoaa selkeän rakenteen ja pohjan, jonka avulla voidaan suunnitella tulevaisuuden työympäristöjä.

Yhteenvetona ja lopputuloksena voidaan todeta, että Teollisuus 4.0 ja 5.0 eivät ole toisiaan poissulkevia kehitysvaiheita, vaan teollisuus 5.0 rakentuu pitkälti teollisuus 4.0:n

teknologisen perustan varaan. Teollisuus 5.0 tuo kuitenkin uudenlaisen inhimillisen näkökulman teollisuuden kehittämiseen. Tulevaisuuden työympäristöissä menestyksekkäin ratkaisu ei perustu teknologian maksimaaliseen hyödyntämiseen, vaan ihmisen ja teknologian tasapainoiseen yhteistyöhön. Teknologian rooli on tukea ihmisen kykyjä, ei syrjäytä niitä.

## Lähteet

- [1] A. Adel, "Future of industry 5.0 in society: human-centric solutions, challenges and prospective research areas", *J. Cloud Comput.*, vsk. 11, nro 1, s. 40, syys 2022, doi: 10.1186/s13677-022-00314-5.
- [2] J. Leng *ym.*, "Unlocking the power of industrial artificial intelligence towards Industry 5.0: Insights, pathways, and challenges", *J. Manuf. Syst.*, vsk. 73, ss. 349–363, huhti 2024, doi: 10.1016/j.jmsy.2024.02.010.
- [3] M. Ghobakhloo, M. Iranmanesh, M. Fathi, A. Rejeb, B. Foroughi, ja D. Nikbin, "Beyond Industry 4.0: a systematic review of Industry 5.0 technologies and implications for social, environmental and economic sustainability", *Asia-Pac. J. Bus. Adm.*, touko 2024, doi: 10.1108/APJBA-08-2023-0384.
- [4] J. Leng *ym.*, "Industry 5.0: Prospect and retrospect", *J. Manuf. Syst.*, vsk. 65, ss. 279–295, loka 2022, doi: 10.1016/j.jmsy.2022.09.017.
- [5] S. Nahavandi, "Industry 5.0—A Human-Centric Solution", *Sustainability*, vsk. 11, nro 16, s. 4371, elo 2019, doi: 10.3390/su11164371.
- [6] M. C. Zizic, M. Mladineo, N. Gjeldum, ja L. Celent, "From Industry 4.0 towards Industry 5.0: A Review and Analysis of Paradigm Shift for the People, Organization and Technology", *Energies*, vsk. 15, nro 14, s. 5221, heinä 2022, doi: 10.3390/en15145221.
- [7] F. Longo, A. Padovano, ja S. Umbrello, "Value-Oriented and Ethical Technology Engineering in Industry 5.0: A Human-Centric Perspective for the Design of the Factory of the Future", *Appl. Sci.*, vsk. 10, nro 12, s. 4182, kesä 2020, doi: 10.3390/app10124182.
- [8] M. Khan, A. Haleem, ja M. Javaid, "Changes and improvements in Industry 5.0: A strategic approach to overcome the challenges of Industry 4.0", *Green Technol. Sustain.*, vsk. 1, nro 2, s. 100020, touko 2023, doi: 10.1016/j.grets.2023.100020.
- [9] X. Xu, Y. Lu, B. Vogel-Heuser, ja L. Wang, "Industry 4.0 and Industry 5.0—Inception, conception and perception", *J. Manuf. Syst.*, vsk. 61, ss. 530–535, loka 2021, doi: 10.1016/j.jmsy.2021.10.006.
- [10] X. Tu, J. Autiosalo, R. Ala-Laurinaho, C. Yang, P. Salminen, ja K. Tammi, "TwinXR: Method for using digital twin descriptions in industrial eXtended reality applications", *Front. Virtual Real.*, vsk. 4, s. 1019080, tammi 2023, doi: 10.3389/frvir.2023.1019080.
- [11] A. Ahmed Murtaza, A. Saher, M. Hamza Zafar, S. Kumayl Raza Moosavi, M. Faisal Aftab, ja F. Sanfilippo, "Paradigm shift for predictive maintenance and condition monitoring from Industry 4.0 to Industry 5.0: A systematic review, challenges and case study", *Results Eng.*, vsk. 24, s. 102935, joulu 2024, doi: 10.1016/j.rineng.2024.102935.
- [12] M. M. Mabkhot *ym.*, "Mapping Industry 4.0 Enabling Technologies into United Nations Sustainability Development Goals", *Sustainability*, vsk. 13, nro 5, s. 2560, helmi 2021, doi: 10.3390/su13052560.
- [13] F. A. Bhat ja S. Parvez, "Emerging Challenges in the Sustainable Manufacturing System: From Industry 4.0 to Industry 5.0", *J. Inst. Eng. India Ser. C*, vsk. 105, nro 5, ss. 1385–1399, loka 2024, doi: 10.1007/s40032-024-01046-y.
- [14] R. S. Kenett ja J. Bortman, "The digital twin in Industry 4.0: A wide-angle perspective", *Qual. Reliab. Eng. Int.*, vsk. 38, nro 3, ss. 1357–1366, huhti 2022, doi: 10.1002/qre.2948.
- [15] M. H. Zafar, E. F. Langås, ja F. Sanfilippo, "Exploring the synergies between collaborative robotics, digital twins, augmentation, and industry 5.0 for smart manufacturing: A state-of-the-art review", *Robot. Comput.-Integr. Manuf.*, vsk. 89, s. 102769, loka 2024, doi: 10.1016/j.rcim.2024.102769.

- [16] P. Aaltonen ja E. Kurvinen, Toim., *Contemporary Issues in Industry 5.0: Towards an AI Integrated Society*. teoksessa Technology, Work and Globalization. Cham: Springer Nature Switzerland, 2025. doi: 10.1007/978-3-031-74779-3.
- [17] Md. M. Rahman, F. Khatun, I. Jahan, R. Devnath, ja Md. A.-A. Bhuiyan, ”Cobotics: The Evolving Roles and Prospects of Next-Generation Collaborative Robots in Industry 5.0”, *J. Robot.*, vsk. 2024, nro 1, s. 2918089, tammi 2024, doi: 10.1155/2024/2918089.
- [18] D. Ivanov, ”The Industry 5.0 framework: viability-based integration of the resilience, sustainability, and human-centricity perspectives”, *Int. J. Prod. Res.*, vsk. 61, nro 5, ss. 1683–1695, maaliskuu 2023, doi: 10.1080/00207543.2022.2118892.
- [19] H. Alimam, G. Mazzuto, N. Tozzi, F. Emanuele Ciarapica, ja M. Bevilacqua, ”The resurrection of digital triplet: A cognitive pillar of human-machine integration at the dawn of industry 5.0”, *J. King Saud Univ. - Comput. Inf. Sci.*, vsk. 35, nro 10, s. 101846, joulukuu 2023, doi: 10.1016/j.jksuci.2023.101846.